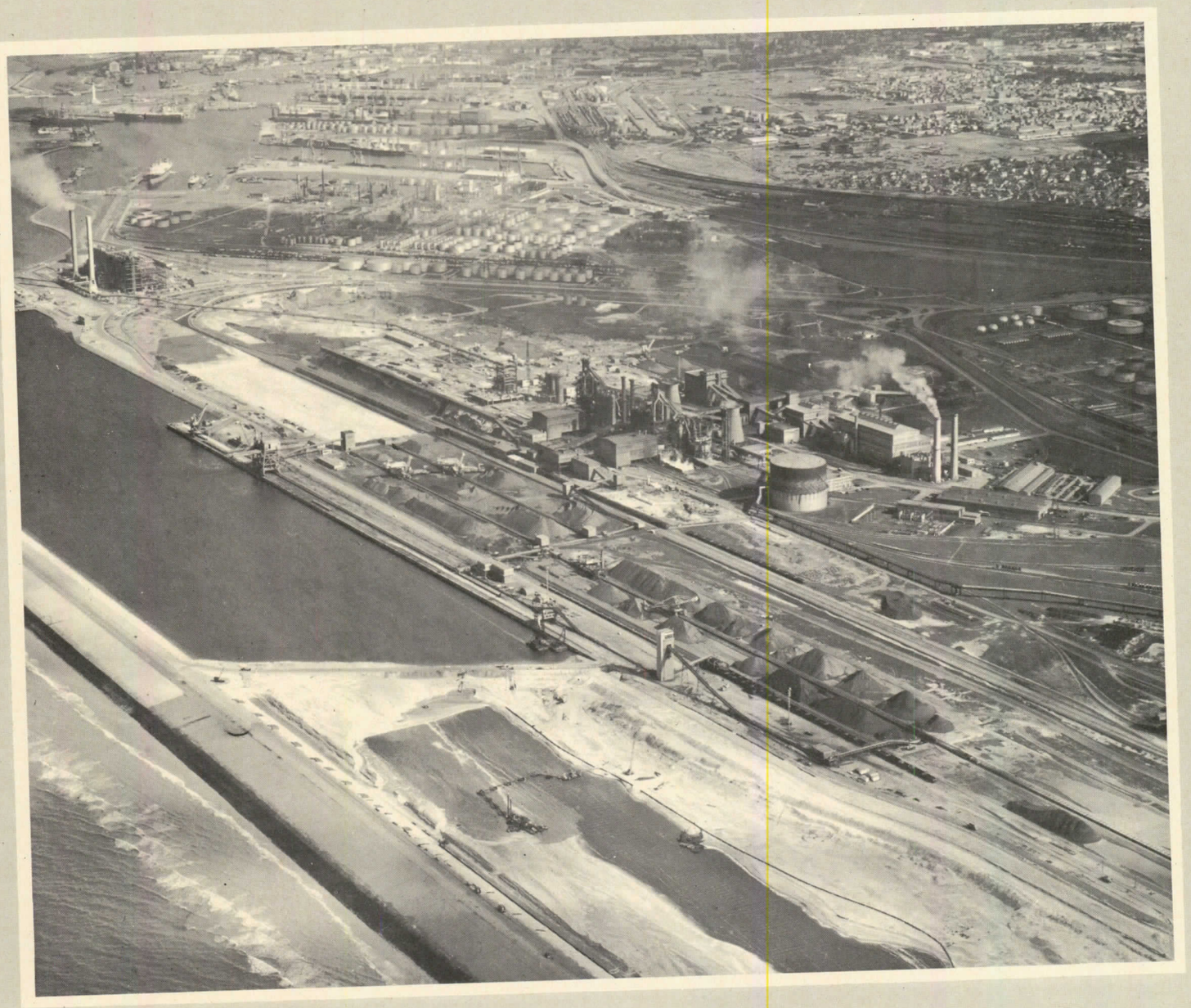
INDUSTRIJA I TEHNIKA



Pogled na industrijski kompleks Denkerka. *Fot. Guy Proisy.*

Otpornost materijala

UVOD

Eksperimentalno proučavanje konstrukcionih materijala, njihove otpornosti na primenjene sile, njihove deformacije pre kidanja, njihovog ponašanja u izradevinama i njihovog uzajamnog delovanja kada se više različitih materijala primene u istoj konstrukciji nalaže da se odrede izvesne zakonitosti koje potiču od iskustva, ali koje imaju opšti značaj i važe za realne materijale čije reakcije na spoljne uticaje, kao i deformacije koje pri tom nastaju imaju nešto zajedničko, mada se ne pokoravaju nekom jednostavnom i jedinstvenom zakonu. Reč je o eksperimentalnoj otpornosti materijala, kojoj nikako nije cilj da zameni teoriju otpornosti materijala, što znači da je zasnovana na uprošćenim i sasvim opštim pretpostavkama, koje su samo približne stvarnosti i koje se ponekad znatno razlikuju od teorije. U sadašnje vreme, zahvaljujući napretku inženjerskih laboratorija, eksperimentalno proučavanje otpornosti materijala postaje sve značajnije i obimnije; ono se ne zadovoljava posmatranjem mehaničkih osobina materijala u elastičnoj fazi, nego pristupa oblasti plastičnosti, čije je proučavanje počelo docnije i koja inače obavezno utiče na složeno ponašanje neodredenih sistema, sa obiljem veza, i na izvesne posledice kao što su puzanje, relaksacija, prilagođavanje i podešavanje. Ali ovo, pre svega eksperimentalno proučavanje otpornosti materijala ne može se odvajati od klasičnog proučavanja, zasnovanog na pretpostavkama koje treba tačno opisati i ograničenog uglavnom na elastičnu oblast, koje je sačuvalo svoju vrednost u raznovrsnim slučajevima, kao što su stabilnost konstrukcija i sklopova, otpor ležišta, izvijanje, uslovi bezbednosti gradnje itd. Ono je posebno korisno u metalogradnji. Namera konstruktora i jeste da obezbedi gradnju stabilnih, sigurnih i trajnih konstrukcija, sa materijalima i sredstvima koja mu stoje na raspolaganju.

Elastičnost, krutost i stišljivost materijala

MODUL ELASTIČNOSTI. Ako je F sila na zatezanje (ili pritisak) prizmatične epruvete preseka A i dužine z (*sl.* 1) i ako je Δz nastala promena dužine, onda je u elastičnoj oblasti

$$\varepsilon = \frac{\Delta z}{z} = \frac{1}{E} \times \frac{F}{A}.$$

E je Jungov (Young) modul ili modul elastičnosti; $\frac{\Delta z}{z}$ je dilatacija ε ili relativno izduženje; $\frac{F}{A}$ je napon σ ili sila po jedinici površine. Dakle, može se napisati

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}.$$

MODUL KLIZANJA. To je modul G, koji se isto tako naziva *Kulonov* (Coulomb) *modul*, *modul torzije* ili *modul smicanja*. Ako sila na smicanje F, primenjena na osnovu A prizme, čija je visina z (*sl.* 2), izaziva pomeranje Δz te osnove na njenoj ravni, onda je

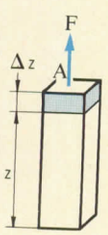
$$\frac{\Delta z}{z} = \frac{1}{G} \cdot \frac{F}{A}.$$

$\frac{F}{A}$ je napon na smicanje τ. Što se tiče Δz, ono je uvek vrlo malo u odnosu na z; može se napisati

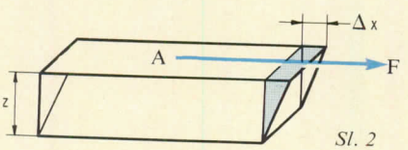
$$\frac{\Delta z}{z} = \operatorname{tg} \alpha \simeq \alpha.$$

α je ugao deformacije ili ugao uvijanja.

Dakle, dobija se $\alpha = \frac{\tau}{G}$.



Sl. 1



Sl. 2

POASONOV (POISSON) KOEFICIJENT. Posmatrajmo valjak visine z i prečnika x; podvrgnimo ga zateznoj sili; za telo u elastičnoj fazi nastaje izduženje Δz i kontrakcija Δx u poprečnom smeru.

Količnik μ kontrakcije po jedinici dimenzije u poprečnom smeru prema izduženju po jedinici dužine u smeru sile naziva se *Poasonovim koeficijentom*:

$$\mu = \frac{\Delta x}{x} : \frac{\Delta z}{z}$$

što se takođe može napisati u obliku

$$\frac{\Delta x}{\Delta z} = + \mu \frac{x}{z}.$$

Ovaj koeficijent je u vezi sa stišljivošću čvrstog tela. Za tela normalne elastičnosti (npr., čelik) njegova apsolutna vrednost je uvek manja od 1/2: μ ima negativnu vrednost. Za tela čija je elastičnost tipa gume, koja se deformiše klizanjem molekula bez promene međumolekulskih rastojanja, on ima maksimalnu vrednost, tj. njegova apsolutna vrednost iznosi 1/2: zapremina deformisanog tela se ne menja.

Zapremina gornjeg valjka je

$$V = \frac{\pi}{4} z x^2.$$

Ako izjednačimo izvod sa 0 (nikakva promena zapremine), dobijamo

$$\Delta V = \frac{\pi}{4} (2zx\Delta x + x^2 \Delta z) = 0$$

ili

$$2z\Delta x + x\Delta z = 0$$

$$\frac{|\Delta x|}{|\Delta z|} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{x}{z}.$$

MODUL KOMPRESIJE. Povećamo li pritisak na jediničnu zapreminu materijala za ΔF, nastaće smanjenje zapremine za ΔV. Modul kompresije K definiše se kao

$$K = \Delta F : \frac{\Delta V}{V}.$$

Ako je ε_v relativna promena zapremine, onda je

$$K = \frac{\Delta F}{\varepsilon_v} \text{ ili } \varepsilon_v = \frac{\Delta F}{K}.$$

VEZE IZMEĐU MODULA ELASTIČNOSTI, KOMPRESIJE I POASONOVOG KOEFICIJENTA. Ove veze su sledeće:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \text{ i } K = \frac{E}{3(1-2\mu)}.$$

Znajući koliko je E i G, može se izračunati μ i K.

Vrednosti modula elastičnosti, ili Jungovog modula E, i modula klizanja, ili Kulonovog modula G, izražene u kg/mm² za neke materijale

Materijali	Jungov modul E	Kulonov modul G
Železo i čelik	21000	8000
Hladno deformisani bakar	12000	4000
Nikl	22000	8000
Cink	8000	3400
Aluminijum	7300	2500
Olovo	1800	700
Kalaj	5300	
Mesing	3000	
Bronza	6000	

GRANIČNE KRIVE ELASTIČNE OTPORNOSTI. Ako se *homogeno* i *izotropno* čvrsto telo podvrgne dejstvu spoljnih sila, nastaju u svakoj tački izvesne deformacije zbog učešća molekula u prenošenju sila. Naponi koji nastaju usled tih deformacija zavise od prirode materijala, njegovog fizičkog stanja, dimenzije i oblika; u pogledu deformacija i napona nema razlike u ponašanju različitih tačaka u koherentnom materijalu.

U telu *bez strukture i bez viskoziteta*, u idealnom telu, kao što je tečnost velike pokretljivosti, naponi su normalni na sve elemente površine oko bilo koje tačke tog tela; za jednu istu tačku naponi su identični.

U *viskoznom telu, ali bez strukture*, sveukupni naponi nisu normalni na elemente površine oko jedne tačke za vreme deformacionog kretanja; ali oni ponovo postaju normalni i konstantni za sve bilo kako odabrane elemente površine oko iste tačke, čim se ponovo uspostavi ravnoteža.

U *viskoznom telu koje ima i strukturu* (između ostalih, čvrsto telo, a posebno konstrukcioni materijali), naponi, koji potiču od spoljnih sila i, eventualno, rezultantni unutrašnji naponi, nisu više normalni, sem izuzetaka, na sve moguće elemente površine oko jedne određene tačke tela. Ipak, za svaku tačku bilo kojeg homogenog i izotropnog tela postoje tri elementa površine sa pripadajućim upravnim naponima; ove tri površine su normalne jedna na drugu. U tom slučaju skup napona se predstavlja elipsoidom (sl. 3), za razliku od mirnih tečnosti u kojima se može predstaviti loptom. Ose ovog elipsoida predstavljaju pravce napona, koji pripadaju elementima ravni koje su normalne na njih, a svaki drugi poluprečnik elipsoida predstavlja jedan kosi napon u odnosu na element ravni kojoj pripada. Elipsoid napona naziva se *Lameovim* (*Lamé*) *elipsoidom*, čija je jednačina

$$\frac{x^2}{\sigma_1^2} + \frac{y^2}{\sigma_2^2} + \frac{z^2}{\sigma_3^2} = 1$$

pri čemu su σ_1, σ_2 i σ_3 normalni naponi, koji se isto tako nazivaju i *glavnim naponima*.

Uzmimo dve ose $O\sigma$ i $O\tau$ (sl. 4). Zamislimo duž ose $O\tau$ trasu elementa posmatrane ravni oko tačke. Nanesimo tri glavna napona na osu σ od koordinatnog početka (OA, OB, OC). Pod pretpostavkom da je $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, možemo nacrtati, pomoću tako određenih tačaka A, B i C, tri kruga čiji su prečnici dužine AB, BC i AC. Spoljni krug prečnika AC naziva se *Morovim* (Mohr) *krugom*; on je nezavisan od srednjeg glavnog napona OB.

U elastičnom području napadna tačka M bilo kog napona OM jednog tela leži u unutrašnjosti osenčene zone na slici, između tri kruga ili, u graničnom slučaju, na njenoj ivici. Najveći napon u datom pravcu očigledno je takav kao OP, čija se napadna tačka P nalazi na samom obimu Morovog kruga. Ugao α segmenta CP sa $O\sigma$ je ugao koji obrazuje normala na element površine sa najvećim glavnim naponom; komplementarni ugao β je ugao između normale na element i najmanjeg glavnog napona.

Što se tiče srednjeg glavnog napona, on se u ovom slučaju nalazi u ravni elementa i, prema tome, obrazuje sa normalom ugao $\frac{\pi}{2}$.

Uz izloženo Morovo prikazivanje napona treba odrediti i graničnu krivu elastične otpornosti, koja je jedna od osnova modernog proučavanja otpornosti materijala u najopštijem slučaju. Ako se jedan homogeni i izotropni materijal izloži dejstvu rastućih spoljnih sila, u datom trenutku biće prekoračena granica elastičnosti u nekom pravcu u datoj površini; prema tome, nastaće popuštanje plastičnim klizanjem po toj površini; ovo klizanje može, bar za neka tela, da bude kratko i da se završi stvarnom dekohezijom molekula, tj. razdvajanjem. Klizanje je pravi »prekid« tela koje je dostiglo svoju granicu elastičnosti, čak ako i ne dođe do dekohezije, i nastaje onda kada odgovarajući napon u posmatranoj tački elementa klizanja dostigne određenu vrednost za dati nagib prema tom elementu; prema tome plastično klizanje određuju *veličina* napona i njegov *pravac* u odnosu na odgovarajući element. Ovo se, očigledno, odnosi samo na tela koja imaju normalnu elastičnost, a ne na tela koja imaju elastičnost kao guma. U jednom homogenom i izotropnom telu izloženom silama, koje izazivaju klizanje i započinju prekid u jednoj tački, postoji veza između tangentne komponente τ u ravni elementa i normalne komponente σ napona. Drugim rečima, u tački u kojoj počinje plastično klizanje, kao početna faza prekida materijala, postoji odnos

$$\tau = f(\sigma).$$

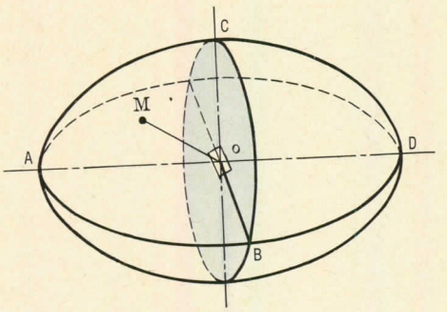
Grafički prikaz τ u funkciji σ je upravo ono što se naziva *graničnom krivom* elastične otpornosti. Ona je karakteristika prirode tela i njegovog fizičkog stanja u bilo kojoj posmatranoj tački.

Zamislimo da je nacrtana ova kriva za jedan određeni materijal; ako se ovaj materijal izloži rastućim silama, dokle god odgovarajući Morov krug ne dodirne graničnu krivu, nijedan elastični napon neće zadovoljiti odnos $\tau = f(\sigma)$ i neće se dogoditi prekid bilo plastičnim klizanjem bilo pravim razdvajanjem.

Ako Morov krug dodiruje graničnu krivu (tačka M na graničnoj krivi, sl. 5), vektor OM predstavlja napon prekida za odgovarajući element površine SS′; projekcija OM na $O\tau$ na trag ravni tog elementa daje tangencijalni napon koji izaziva klizanje, a $O\sigma$ je vrednost normalne komponente.

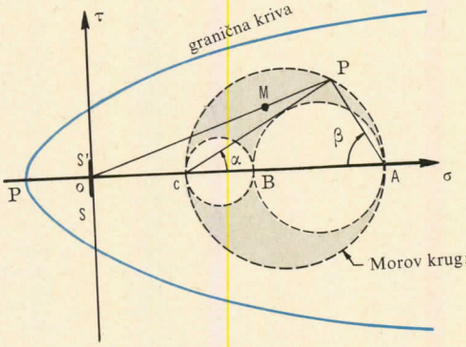
Granična kriva elastične otpornosti nije ništa drugo nego obvojnica svih Morovih krugova koji izazivaju prekid; zaista, kada vektor napona OM izaziva prekid, onda se njegova napadna tačka nalazi na obimu Morovog kruga, pošto dostiže maksimalnu vrednost; ona takođe sigurno leži i na graničnoj krivoj, po definiciji. Dakle, svi Morovi krugovi koji dovode do prekida sačinjavaju jedan neprekidan niz, tj. oni proizlaze jedan iz drugog po jednoj neprekidnoj funkciji; svi oni dodiruju graničnu krivu; zbog toga je ona njihova obvojnica, prema definiciji krivih linija obvojnica. Ovaj zaključak važi *u praksi*, mada ovo rasuđivanje nije sasvim tačno sa gledišta čiste matematike, pošto skup posmatranih Morovih krugova sačinjava jednu familiju sa dva nezavisna parametra.

Kada se vektor nalazi na obimu Morovog kruga, a ne u njegovoj unutrašnjosti, ravan elementa SS′ trase $O\tau$ sadrži srednji glavni napon σ_2; ravan trase $O\tau$ je zbog toga normalna na ravan krajnjih glavnih napona σ_1 i σ_3, u ovom Morovom pri-

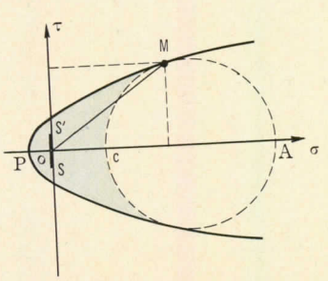


Lameov elipsoid.

Sl. 3

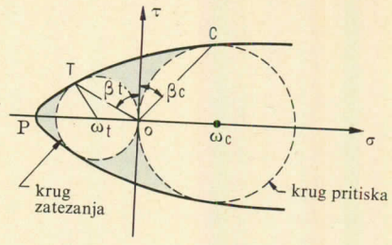


Sl. 4
Morov krug i granična kriva.



Sl. 5

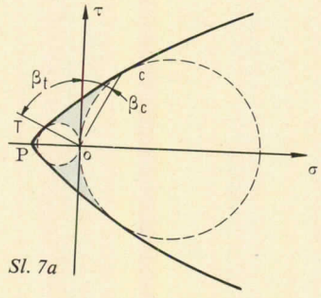
kazu. U laboratorijama se granična kriva određuje kao obvojnica izvesnog broja Morovih krugova, naročito kruga prostih pritisaka i kruga prostih zatezanja, koji oba prolaze kroz koordinatni početak O, pošto je u tom slučaju $\sigma_2 = \sigma_3 = O$. Praktično, crta se obvojnica krugova koji prolaze kroz koordinatni početak i čiji prečnici imaju odgovarajuću vrednost prostog pritiska i prostog zatezanja. Krug pritiska je desno od koordinatnog početka, a krug zatezanja levo (sl. 6). Kriva obvojnica uz to dodiruje krug čiji je centar u koordinatnom početku, a poluprečnik mu je veličina čistog napona na smicanje. Vrh P odgovara trostrukom zateznom naponu prekida, koji se naziva »dekohezija« u jednom posebnom smislu, koji se od uobičajenog smisla razlikuje po tome što on jednostavno znači: pravo razdvajanje, koje se razlikuje od »prekida« bez dekohezije, koji se događa prostim molekularnim klizanjem.



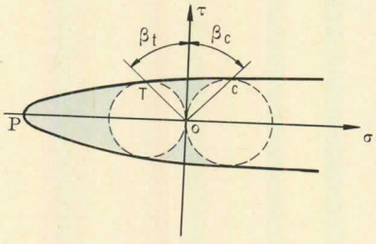
Sl. 6

Granična kriva daje podatke o obliku prekida jednog tela izloženog prostom zatezanju ili pritisku a taj oblik označava stepen »krtosti« tela.

Zaista, *krta tela*, ne popuštajući deformaciji koherentnim klizanjem, lome se zatezanjem pri naponu koji je izrazito manji nego pri pritisku. Pri zatezanju javlja se napon klizanja, kome se dodaje normalni napon koji pomaže odvajanje elemenata. Suprotno tome, pri pritisku normalni napon pomaže da se oni održe u dodiru, od čega potiče i raširen oblik granične krive, koji je utoliko širi ukoliko je telo krtije. Opšti oblik je parabolična kriva, više ili manje otvorenih grana i upravljenih udesno (sl. 7a).

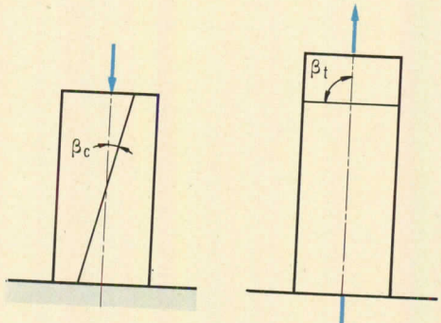


Sl. 7a



Sl. 7b

S druge strane, *tela plastičnih osobina*, koja imaju izraženu sposobnost koherentnog klizanja, deformišu se viskoznim klizanjem, a napon koji dopušta kretanje klizanjem gotovo se ne menja, bilo da je to zatezanje ili pritisak. Uglovi β_c i β_t (sl. 7b) su uglovi koje obrazuju pravci napona sa ravni klizanja pri pritisku i zatezanju respektivno. U graničnom slučaju, umesto parabolične krive dobile bi se dve paralelne prave sa jedne i druge strane na istom rastojanju od ose $O\sigma$, koja je njihova osa simetrije. U slučaju krtih tela (sl. 8), ugao β_c je mali pri pritisku, a ugao β_t je blizu 90° pri zatezanju, od čega potiče oblik loma. U slučaju tela sa plastičnim osobinama (sl. 7b i 9) uglovi β_c i β_t pravca sile sa ravni klizanja vrlo su blizu 45°, od čega potiče oblik prekida.



lom krtog tela pod pritiskom
kidanje krtog tela pri zatezanju

Sl. 8. Pravac ravni klizanja pri kidanju krtih tela.

Deformacije

Deformacije i naponi povezani su u tom smislu što su deformacije posledica napona. Deformacija je jasna pojava koja se može lako meriti. Nasuprot tome, sile i naponi nisu vidljivi; oni se zamišljaju prema deformacijama, ali je tu uključen i jedan metafizički smisao: o njima se sudi samo na osnovu njihovih dejstava — pomeranja i deformacija.

PROSTE DEFORMACIJE. To su *sabijanje* ili pritiskivanje, *zatezanje*, *smicanje*, *savijanje* i *torzija* (uvijanje), kojima se može dodati *izvijanje*.

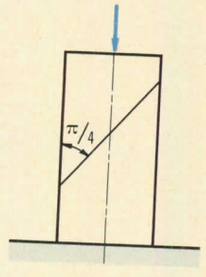
Dve jednake sile suprotnog smera izazivaju *zatezanje* ili *pritisak* — zavisno od toga da li teže da udalje ili približe svoje dejstvo.

Da bi došlo do *savijanja* jednog predmeta, npr., grede ili štapa (sl. 10), potrebna je sila normalna na osu predmeta oslonjenog na dva kruta oslonca ili ukleštenog na jednom njegovom kraju.

Da bi se izvršilo *uvijanje*, npr., na jednoj gredi, treba primeniti dve paralelne i međusobno jednake sile suprotnog smera, koje leže u ravni normalnoj na osu grede i na jednakom rastojanju od te ose (sl. 11).

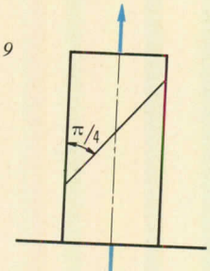
Izvijanje nastaje u predmetima velike dužine koji su izloženi pritisku; ako se predmet savija i ujedno pritiska, savijanje se povećava pod dejstvom sile, sve do prekida usled ugiba.

Pravac ravni klizanja pri kidanju plastičnih tela.



lom plastičnog tela pod pritiskom

Sl. 9

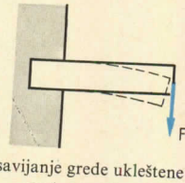


kidanje plastičnog tela pri zatezanju

SLOŽENE DEFORMACIJE. Sile koje izazivaju navedene proste deformacije mogu i jednovremeno da deluju.

Zbog toga nastaje:

— pritisak sa savijanjem ili istezanje sa savijanjem;
— smicanje sa uvijanjem;
— zatezanje ili pritisak sa uvijanjem;
— savijanje sa uvijanjem.



savijanje grede ukleštene na jednom kraju

Sl. 10



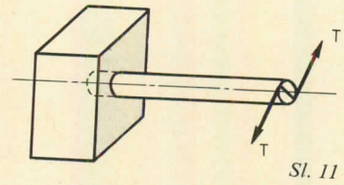
savijanje grede koja leži na dva oslonca

PRIMENE. *Sopstvena otpornost zatezanju*. Jedna čelična žica gustine 7,7 i zatezne čvrstoće od 42 kg/mm², koja je obešena u jednoj krutoj tački, prekinuće se pri zatezanju usled sopstvene težine ako njena dužina dostigne vrednost od $\frac{42000}{7,7}$ ili približno 5400 metara. Njena granica elastičnosti je 24 kg, a ukupno izduženje (izduženje pri prekidu) iznosi 20 %; plastično izduženje počinje na oko $\frac{24000}{7,7}$ = 3100 metara. Ako se zanemari neznatno elastično izduženje, plastično izduženje se dešava na prvih 5400—3100 = 2300 metara. Ono iznosi prosečno $\frac{20}{2}$ = 10 % ili 230 metara.

Nazivom sopstvena otpornost zatezanju nekog materijala označava se količnik između zatezne čvrstoće i specifične mase.

Nit plastične materije tipa najlona, specifične mase jednake 1,00, imala bi istu sopstvenu otpornost kao čelik ako bi njena zatezna čvrstoća bila $\frac{42}{7,7}$ = 5,4 kg/mm².

Torzija valjka u spregu sila F primenjenih na krajevima prečnika pravog preseka.



Sl. 11

Sopstvena otpornost pritisku. Jedan vertikalni cilindrični stub, oslonjen na čvrstu stenu i sa dovoljno velikom osnovom (da se ne bi »izvio«), koji je načinjen od betona čvrstoće na pritisak od 400 kg/cm² i specifične težine 2,4, mogao bi da bude visok $\frac{40000}{24}$ = 1667 m a da se ne polomi. Ali to je čisto teorijsko razmatranje,

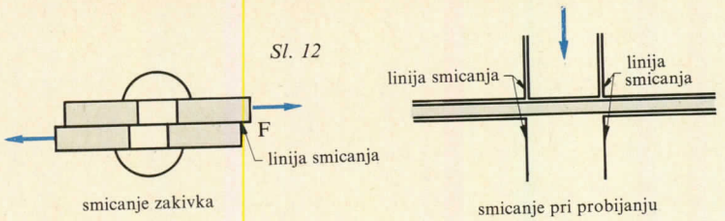
pošto bi se u praksi drukčije postupilo: načinio bi se stub u obliku Ajfelove kule da bi se ostvario jednaki napon na pritisak na svim nivoima. Na ovaj način, teorijski, ne postoji granica dozvoljene visine, ali za velike visine površina osnove dosta brzo postaje ograničenje. Zato je teško izraditi oblakodere više od 300 metara: veličina potrebne osnove raste, u stvari, brže od visine i to sve brže i brže. (Međutim, u poslednje vreme razvoj građevinskih konstrukcija, kao i konstruktivnih materijala toliko je napredovao da se već grade oblakoderi visoki i preko 340 metara).

IZVIJANJE. Obrazac za prosti pritisak, koji daje napon, npr., jednog vertikalno postavljenog valjka važi samo ako njegova visina nije preterana u odnosu na poprečni presek; u suprotnom, postoji opasnost od izvijanja.

Vitkost je odnos $\frac{l}{r}$ visine l i poluprečnika r poprečnog preseka. Za dati štap čiji je jedan kraj uklešten, postoji kritično opterećenje koje izaziva izvijanje za datu vitkost. Izvijanje se proučava pomoću Ojlerovog (Euler) obrasca, Rankinovog (Rankine) obrasca, itd.

SMICANJE. Smicanje je rezultat dejstva poprečne sile koja izaziva uzajamno klizanje dva neposredno bliska preseka. Napon smicanja određen je *transverzalnom silom*. Ako je F sila koja izaziva smicanje, a A površina smicanja, npr., površina grupe zakivaka između dva lima koji se vuku svaki u suprotnom smeru (sl. 12), napon na smicanje τ je $\frac{F}{A}$.

Sl. 12

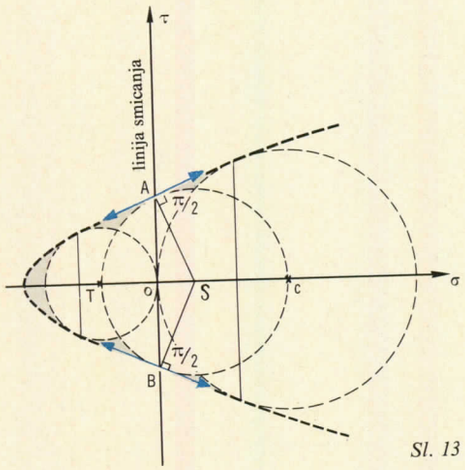


smicanje zakivka

smicanje pri probijanju

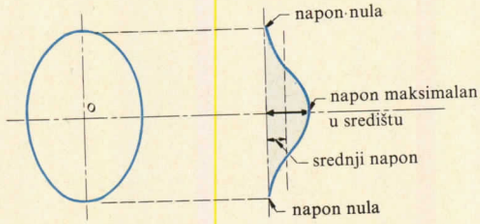
Smicanje može biti *prosto*, kao u slučaju smicanja zakivaka, ili *složeno*, ako je, npr., združeno sa pritiskom (sl. 13). Normala na graničnu krivu u tački preseka sa osom smicanja — vertikalnom osom $O\tau$ — ne prolazi kroz tačku O, a Morov krug, koji dodiruje tu krivu, pokazuje da postoji pritisak potreban za klizanje duž $O\tau$ pri čemu se centar tog kruga nalazi desno od koordinatnog početka O.

Pritisak je potreban da bi se smicanje dogodilo po ravni klizanja $O\tau$. U stvari, postoji krug središta S, a ne krug središta O, kao krug smicanja, pri čemu su tačke A i B dodira sa graničnom krivom takve da su SA i SB normale u A i B na tangente granične krive u tim tačkama.



Sl. 13

Transverzalna sila koja izaziva kidanje pri smicanju je maksimalna transverzalna sila koju može podneti predmet. Ali, u stvari, može postojati lestvica transverzalnih sila koje su niže od te vrednosti. U opštem slučaju napon smicanja je više ili manje združen sa naponom savijanja ili, posmatrajući kroz deformacije, celokupno klizanje usled poprečne sile (ili smicajuće sile) događa se i uz savijanje. Tipičan primer su makaze čija dva kraka najpre u većoj ili manjoj meri saviju predmet pre nego što ga preseku. U slučaju savijanja, transverzalna sila se u nekom preseku savijene grede dobija kada se načini zbir projekcija u tom preseku *svih spoljnih sila primenjenih levo od posmatranog preseka*, ili primenjenih desno od preseka, ali sa promenjenim znacima. Pod spoljnim silama podrazumevaju se ne samo sile neposredno primenjene na gredu već i sile veza, kao što su otpori oslonaca.

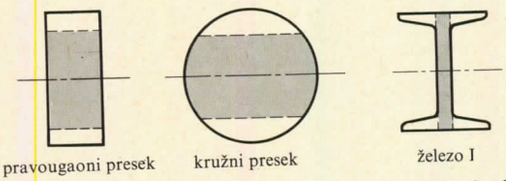


Sl. 14
Raspodela tangentnih napona u preseku grede.

Transverzalna sila po jedinici površine je napon koji se dobija deljenjem zbira projekcija sila smeštenih levo od preseka sa površinom tog preseka. Za proračun transverzalne sile u opterećenoj gredi postavljenoj na dva oslonca treba uzeti u obzir ne samo neposredno primenjene sile, kao npr. u osovinama nekog vozila, već i težinu grede: opterećenja u tački s jedne strane, i ravnomerno raspoređeno opterećenje, s druge. Ravnomerno raspoređeni teret prikazuje se opterećenjem q po jedinici dužine grede, npr., po dužnom metru.

Osim o projekciji na posmatrani presek pojedinačnih opterećenja ili *preopterećenja* i ravnomerno raspoređenog opterećenja, obično težina grede po dužnom metru (*stalno opterećenje*), treba, razumljivo, voditi računa i o otporima oslonaca ili silama veza. U slučaju grede dužine l i težine q po dužnom metru, otpor jednog od oslonaca iznosi $\frac{ql}{2}$ ako greda leži na dva prosta oslonca, tj. ako to nije greda koja leži na nizu stubova (slučaj koji se teže rešava).

Smanjeni preseci raznih vrsta preseka u funkciji stvarnog preseka S.



pravougaoni presek A' = 2/3 A

kružni presek A' = 3/4 A

železo I A' = A_r (A_r = presek rebra)

Sl. 15

Smicajni naponi na različitim tačkama poprečnog preseka nisu ravnomerno raspoređeni i, u stvari, nisu jednaki srednjem naponu $\tau = \frac{F}{A}$, pošto zbog savijanja koje je združeno sa smicanjem, nema samo poprečnog smicanja, nego, isto tako, i podužnog klizanja, kao što se može videti pri savijanju svežnja združenih vlakana — napon smicanja je nula na periferiji i maksimalan u središtu — tako da bi maksimalni napon koji treba uzeti u obzir pri razmatranju uslova sigurnosti bio taj maksimalan napon, koji je često dva puta veći od srednjeg smicajnog napona τ (sl. 14). Za određivanje uslova sigurnosti mora se stvarni presek zameniti nekim smanjenim presekom, čija veličina zavisi naročito od momenta inercije preseka u odnosu na osu savijanja (prosto savijanje, a ne složeno); smanjeni preseci, koji se u nekim slučajevima mogu izračunati (sl. 15) primenom teorije elastičnosti, su sledeći:

— pravougaoni presek $A' = \frac{2}{3}A$;

— kružni presek $A' = \frac{3}{4}A$;

— presek u obliku »dvostrukog T« $A' = A_r$

(A_r je površina rebra, lamele nisu uračunate).

U praksi se uzima da je otpornost na smicanje betona jednaka *desetom* delu otpornosti na pritisak, broj koji je gotovo jednak otpornosti na zatezanje, mada u praksi u ovom drugom slučaju treba da bude manja: obično se uzima da je zatezna čvrstoća jednaka *dvanaestom* delu čvrstoće na pritisak.

Modul klizanja G uvek je manji od Jungovog modula ili modula elastičnosti E obično je malo manji od $\frac{2}{3}$ E za metale u svakodnevnoj upotrebi.

Za čelik E = 22000 kg/mm², a G = 9000 kg/mm² (manje od $\frac{2}{3}$ E, koje bi iznosilo 14000 kg/mm²).

Za gvožđe G iznosi 4000 kg/mm²; za drvo G se nalazi između 400 i 600 kg/mm². U gredi je podužni napon na klizanje jednak u svim tačkama poprečnom naponu na klizanje. Ovaj teorijski odnos može se dobro primeniti na materijale kao što je čelik, ali važi samo za homogene i, naročito, za izotropne materijale. On nije tačan za *vlaknaste materijale*, kao što su drvo, u kome su podužna čvrsta vlakna od lignina slepljena pomoću plastične materije, ili »celuloze«. U tim materijalima je podužni napon na klizanje samo deo poprečnog napona na klizanje, u opsegu od $\frac{1}{6}$ do $\frac{1}{\Omega}$.

TORZIJA. Uvijanje ili torzija je deformacija koja je u dosta bliskoj vezi sa smicanjem i uključuje isti modul klizanja G.

U *šupljoj cevi* dosta tankih zidova dejstvo torzije u poprečnom preseku može se poreditи sa prostim smicanjem.

U *punoj cevi* veličina smicanja u svakoj tački koja se nalazi na jednakom rastojanju od ose jeste jednaka; ali se veličina smicanja menja proporcionalno rastojanju elementa površine od ose uvijanja. Podužna vlakna u jednom torzionom kretanju kao što je prenosna osovina između turbine i generatora, koja su, kad miruju, generatrise pravog valjka, postaju zavojnice stalnog koraka, dok se ne pojavi torziono sužavanje slično sužavanju pri zatezanju. U slučaju kada se pojavi sužavanje metala usled torzije, zavojnice menjaju korak i skupljaju se u či-

tavom području koje je izloženo sužavanju (sl. 16), a u graničnom slučaju, za vreme prekida, jedan okret zavojnice je praktično jednak obimu normalnom na osu.

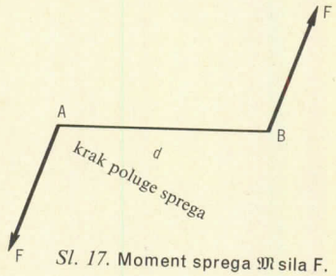
Prosti torzijski napon u tački A preseka jednak je

$$\tau = Gr\theta$$

gde je θ ugao torzije, G — Kulonov modul, a r — rastojanje od ose.



Sl. 16. Torzija metalne šipke sa helikoidalnom deformacijom izvodnica.



Sl. 17. Moment sprega $\mathfrak{M}$ sila F.

Modul klizanja G, koji se, takođe, naziva *modul smicanja* ili *Kulonov modul*, dužina l jedne žice kružnog preseka zategnute pomoću tereta, poluprečnik preseka r i moment $\mathfrak{M}$ sprega sila (sl. 17), koji uvija žicu za ugao θ, vezani su odnosom

$$\frac{\pi r^4}{2} = \frac{\mathfrak{M} l}{G\theta}.$$

Ako žica nije kružnog preseka, postoji odnos

$$\frac{A^4}{I} = k\frac{\mathfrak{M} l}{G\theta}$$

gde je I moment inercije preseka žice u odnosu na osu, koja je na nju vertikalna i prolazi kroz težište, A je površina tog preseka a k je promenljivi koeficijent koji iznosi:

0,0253 za elipsu;
0,0234 za kvadratni presek;
0,0238 za pravougaonik čija je strana a = 2b;
0,0249 „ „ „ „ „ a = 4b;
0,0260 „ „ „ „ „ a = 8b.

Moment inercije nekog preseka u odnosu na osu jednak je zbiru elementarnih površina preseka, pomnoženih sa kvadratom njihovog rastojanja od ose. Postoje tablice momenata inercije za razne vrste uobičajenih preseka žica, cevi, greda.

Napomena. Mada se u principu otpornost materijala najviše primenjuje na prizmatične predmete koji su dugački u odnosu na presek, uz pretpostavku očuvanja ravnosti poprečnih preseka u toku deformacije ovih prizmatičnih predmeta (kao što su grede), ipak se tu mogu uključiti i neka ispitivanja kao što su ispitivanja opruga.

Na primer, izduženje spiralne valjkaste opruge (zavojna opruga) dato je formulom

$$\Delta z = F\frac{2lR^2}{\pi G r^4}$$

gde je Δz povećanje visine opruge z (smatra se da je ova visina z zanemarljiva u odnosu na dužinu l, a zavojci da su sasvim blizu jedan drugom i da se ne dodiruju), l = dužina žice, r = poluprečnik žice kružnog preseka, R = poluprečnik valjka oko kojeg je žica namotana, G = modul krutosti i F = sila koja izaziva izduženje opruge.

Primeri. 1. Koje je izduženje Δh zavojne opruge načinjene od 1 metra čelične žice (čije je G = 9000 × 10^8 jedinica C.G.S.), prečnika 1 mm, koja je namotana na valjak prečnika 1 cm, pod dejstvom opterećenja od 1 kilograma? Ovo izduženje iznosi:

$$\Delta h = \frac{2 \times 1000 \times 5{,}5^2}{3{,}1416 \times 9000 \times 0{,}5^4} = 34{,}2\,\text{mm}.$$

2. Koji je moment $\mathfrak{M}$ sprega kome je izložena srebrna žica (čije je G = 27 × 10^{10} jedinica C.G.S.) dužine 50 cm i prečnika 0,2 mm, za ugao torzije od 10°? Veličina ovog momenta iznosi:

$$\mathfrak{M} = 27 \times 10^{10} \times \frac{\pi}{2} \times 0{,}01^4 \times \frac{1}{50} \times 10^\circ \times \frac{\pi}{180^\circ} = 15\ \text{erga}.$$

3. Koji je moment $\mathfrak{M}$ sprega kome je izložena, za torziju od 10°, spiralna opruga načinjena od srebrne žice (čiji je Jungov modul = 75 × 10^{10}) dužine 50 cm i prečnika 0,2 mm? Moment inercije iznosi:

$$I = \frac{\pi r^4}{4}.$$

Otuda

$$\mathfrak{M} = 75 \times 10^{10} \times \frac{\pi}{4} \times 0{,}01^4 \times \frac{1}{50} \times 10^\circ \frac{\pi}{180^\circ} = 20{,}6\ \text{erga}.$$

Primedba. Izduženje zavojne opruge pri istom opterećenju veće je od izduženja žice zatezanjem. Stoga bi i za žicu iz prvog navedenog primera izduženje pod istim opterećenjem od 1 kg bilo samo

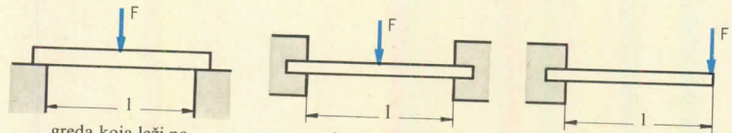
$$\Delta l = \frac{1}{22000} \times \frac{3{,}14}{4} \times 10000 = 0{,}36\,\text{cm}$$

umesto 3,42 cm, što je oko 10 puta manje.

Krutost pri torziji. U praksi se smatra da postoji opasnost za štap izložen uvijanju, ako je ugao torzije veći od 1/4 stepena po dužnom metru.

Prosto savijanje

RAVNO SAVIJANJE. PROSTA GREDA. Neka je horizontalna greda izložena vertikalnim silama. Pri ravnom savijanju presek grede i primenjene sile,



Sl. 18. Prosto savijanje.

kao i otpori oslonca, dopuštaju vertikalnu ravan simetrije; svako horizontalno vlakno postaje posle deformacije kriva smeštena u nekoj vertikalnoj ravni. Zato je deformacija ravno savijanje. Ako se označi sa I moment inercije pravog preseka u odnosu na osu koja prolazi kroz težište ovog pravog preseka i koja je upravna na ravan simetrije, a sa E Jungov modul, može se ustanoviti ugib f grede dužine l pod dejstvom opterećenja F. Rezultat zavisi od toga da li greda prosto leži svojim krajevima na dva oslonca, ili su oba kraja ukleštena, ili samo jedan (sl. 18) i da li je opterećenje u jednoj jedinoj tački ili je, pak, ravnomerno raspoređeno duž grede.

	NAČIN KONSTRUKCIJE GREDE	VELIČINA UGIBA
Slučaj jednog jedinog opterećenja F u tački	greda koja leži na dva prosta oslonca	$f = \frac{Fl^3}{48EI}$
	greda ukleštena na oba kraja	$f' = \frac{Fl^3}{192EI} = \frac{f}{4}$
	greda ukleštena na jednom kraju	$f'' = \frac{Fl^3}{3EI} = 16f$
Slučaj opterećenja F ravnomerno raspoređenog duž grede	greda na dva oslonca	$f = \frac{5Fl^3}{384EI}$
	greda sa dva ukleštenja	$f' = \frac{Fl^3}{384EI} = \frac{f}{5}$
	greda samo sa jednim ukleštenjem	$f' = \frac{Fl^3}{8EI} = 9{,}6f$

U *gredi na osloncima* može se odrediti napon zatezanja i napon pritiska u najnapregnutijim vlaknima (spoljna vlakna). Ako je M napadni moment savijanja u posmatranom preseku, ako je I moment inercije u čistom preseku (umanjenom za rupe od zakivaka) preseka A u odnosu na osu prostog savijanja koja prolazi kroz težište, ako su y i y' rastojanja do te ose od spoljnih vlakana, pritisnutog i zategnutog, onda se napon σ u ova dva slučaja izračunava sledećim formulama:

– pri pritisku $\sigma = \frac{My}{I}$

– pri zatezanju $\sigma' = \frac{My'}{I}$

$\frac{I}{y}$ i $\frac{I}{y'}$ se nazivaju *modulima otpornosti*.

Ako je σ_d stepen usvojene sigurnosti (veličina maksimalno dozvoljenog napona), mora se imati:

– za najpritisnutije vlakno $\frac{M}{\frac{I}{y}} < \sigma_d$

– za najzategnutije vlakno $\frac{M}{\frac{I'}{y'}} > \sigma'_d$

U slučaju *simetričnog* I *profila* (sl. 19) ima se $y = y' = \frac{h}{2}$ (gde je h visina). Prema tome, ako je reč o metalu, kao što je slučaj sa čelikom, za koji je stepen sigurnosti $\delta_d = \delta'_d$ (pritisak ili zatezanje), onda je

$$\sigma = \frac{Mh}{2I},$$

a uslov za jednoznačnu sigurnost je

$$\frac{Mh}{2I} < \sigma_d.$$

Moment inercije I grede u odnosu na njenu osu, veličina y, kao i veličina modula inercije prikazani su za nekoliko slučajeva.

Oblik preseka	Moment inercije I	Rastojanje od spoljnjeg vlakna do neutralnog vlakna y	Modul inercije $\frac{I}{y}$
Kvadratni presek strane a, osa savijanja prolazi kroz njegovu sredinu.	$\frac{a^4}{12}$	$\frac{a}{2}$	$\frac{a^3}{6}$
Pravougaoni presek: širina b visina h	$\frac{bh^3}{12}$	$\frac{h}{2}$	$\frac{bh^2}{6}$
Kružni presek prečnika d, osa savijanja prolazi kroz centar	$\frac{\pi d^4}{64}$	$\frac{d}{2}$	$\frac{\pi d^3}{32}$
Elipsa: mala osa b, velika osa h.	$\frac{\pi bh^3}{64}$	$\frac{h}{2}$	$\frac{\pi bh^2}{32}$

MOMENT SAVIJANJA. Pri ravnom savijanju napadni moment savijanja u nekom preseku jednak je zbiru momenata, u odnosu na težište ovog preseka, spoljnih sila (neposredno primenjene sile i sile veza, gde su uključeni i otpori oslonaca) levo od preseka, ili zbiru, sa promenjenim znakom, momenata spoljnih sila desno od preseka.

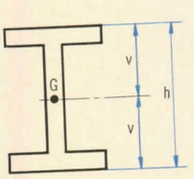
NORMALNI NAPON U PRIZMI IZLOŽENOJ SAVIJANJU POD KONSTANTNIM MOMENTOM. Ako je F (sl. 20) spoljna sila, a širina, b visina i l dužina, normalni napon σ_d ima vrednost

– za pravougaoni presek $\sigma_d = \frac{6Fl}{ab^2}$;

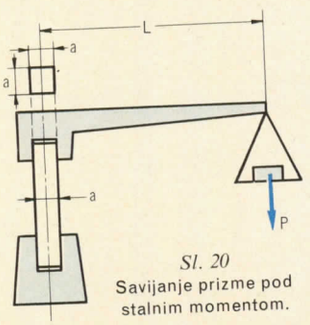
– za kvadratni presek $\sigma_d = \frac{6Fl}{a^3}$.

MAKSIMALNI NORMALNI NAPON U GREDI PRAVOUGAONOG PRESEKA KOJA LEŽI NA DVA OSLONCA, OPTEREĆENOJ U SREDINI KONCENTRISANOM SILOM F.

Ako je M moment savijanja, I moment inercije, y rastojanje najudaljenijih vlakana do neutralne ose, a širina prizme i b visina prizme, nastaje:



Sl. 19
Greda I profila (simetričan profil).



Sl. 20
Savijanje prizme pod stalnim momentom.

Veličina koeficijenta sigurnosti ν za razne materijale	
Materijali	Koeficijenat sigurnosti
Metali u stabilnim konstrukcijama koje nisu izložene jakim udarima	4 do 6
Metalna tela izložena vibracijama ili jakim udarima (gvožđe se isključuje u ovom slučaju)	8 do 10
Predmeti od običnog livenog gvožđa koji su izloženi savijanju	8
Drvo	7 do 10
Tesani kamen	10
Malteri i betoni	10

$$\sigma_d = \frac{M}{\frac{I}{y}} = \frac{3Fl}{2ab^2}$$

a u slučaju kvadratnog preseka $a = b$ (sl. 21):

$$\sigma_d = \frac{3Fl}{2a^3}$$

PRAKTIČNO OPTEREĆENJE I KOEFICIJENAT SIGURNOSTI. Praktično opterećenje σ_d je deo $\frac{1}{\nu}$ opterećenja pri prekidu. Veličina ν naziva se *koeficijentom sigurnosti*.

Za armirani beton $\nu = 3{,}6$. U stvari, uzima se $\frac{28}{100}$ otpornosti na kidanja, ali koeficijent sigurnosti mora zavisiti od vrste materijala, od uslova upotrebe predmeta i čak od stepena rizika kome se izlaže.

POKRETNA OPTEREĆENJA. UTICAJNE LINIJE. Da bi se ispitalo dejstvo pokretnih opterećenja (vozila na mostu), trebalo bi ih postaviti sa točkovima u najnepovoljniji položaj. To se može ostvariti neposredno proračunom, ali je taj metod složen. Problem se pojednostavljuje ispitivanjem *uticajnih linija* elastičnih dejstava, npr., momenata savijanja ili transverzalnih sila. Uticajna linija momenta savijanja M u jednom stalnom preseku A apscise x pod dejstvom nekog pokretnog opterećenja F apscise y ima takvu ordinatu, u tački y, da je

$$z = \frac{M}{F}$$

pri čemu se z računa upravno na opterećenje F. Ako se nacrta uticajna linija z, iz nje se može izvesti moment savijanja $M = Fz$. Ako je u pitanju konvoj sastavljen od više pokretnih opterećenja, F_1, F_2, F_3,... onda nastaje:

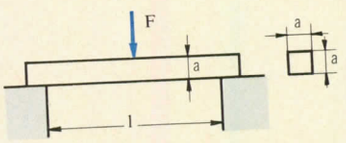
$$M = F_1z_1 + F_2z_2 + F_3z_3 + \dots$$

Mogu se dobiti uticajne linije svih elastičnih dejstava za određeni presek, npr., normalnih sila, ugiba itd.

KONTINUIRANI NOSAČ. Prava greda se naziva kontinuiranom ako ima više od dva oslonca; ona leži na svim svojim osloncima, najmanje na tri; pošto su opterećenja upravna ona je izložena ravnom savijanju. Razlike nivoa oslonaca moraju biti *vrlo male* (stubovi moraju biti savršeno postavljeni), inače grede moraju biti nezavisne. Kontinuirani nosač je tip neodređenog sistema (sa prekomernim brojem veza); statika ne omogućuje određivanje otpora raznih oslonaca. Ova teškoća se prevazilazi tako što se umesto reakcija oslonaca ispituju momenti savijanja na tim mestima.

Složeno savijanje

Grede se mogu savijati uz istovremeni pritisak ili zatezanje. Tako su i dimnjak ili vitki toranj izloženi pritisku usled svoje težine i dejstvu savijanja usled jakog vetra.



Sl. 21

Rešetkasta greda

To je sistem koji se sastoji od više štapova sastavljenih na njihovim krajevima ili »čvorovima«. Štapovi su povezani svojim krajevima pomoću zglobova. Spoljne sile dejstvuju preko čvorova rešetke. Zbog toga štapovi trpe samo opterećenja zatezanja ili pritiska.

Rešetka može biti određeni ili neodređeni sistem.

U *prostoj rešetki* ili *trougaonom sistemu* bilo koji poprečni presek susreće samo tri štapa (sl. 22). To je određeni sistem. Pošto se prethodno odrede otpori oslonaca, izračunavaju se zatezanja ili pritisci u štapovima raznim metodima, od kojih su najvažniji: Kremonov (Cremona) i Riterov (Ritter). *Riterov metod* ili *metod momenata* zasniva se na sledećem principu: poprečni presek seče samo tri štapa; jednakost između momenata spoljnjih sila i otpora oslonaca, koji se nalaze levo od preseka S_i, i zbira momenata sila F, koje se javljaju u tri presečena štapa, a u odnosu na čvor suprotan jednom od njih, tj. u tački preseka dva druga štapa. Ako je M moment u odnosu na čvor nasuprot sila levo od preseka S_i, a h normalno rastojanje čvora nasuprot štapa koji prenosi silu F, onda je

$$F=\frac{M}{h}.$$

U *višestrukim rešetkama* (poprečni presek seče više od tri štapa) sistem postaje *neodreden*; teškoća se prevazilazi (približno) rastavljanjem višestrukih rešetki, koje su izložene silama F, u n prostih rešetki, od kojih je svaka određena i izložena u svojim čvorovima spoljnim silama koje imaju iste napadne tačke i iste pravce kao i sile koje postoje u neodređenom sistemu, ali im je veličina $\frac{F}{n}$. Zatim se superponiraju elastična dejstva, koja su dobijena u tih n prostih rešetki, stavljajući da je tražena sila u bilo kom od štapova jednaka zbiru sila koje se javljaju u tom istom štapu u n prostih rešetki:

$$F=F_1+F_2+F_3+\dots$$

Sistem krutih veza

Štapovi se spajaju pomoću krutih čvorova. Ovde su najvažniji momenti savijanja.

Ispitivanje ploča

To je ispitivanje važno, ali je složeno i izlazi iz područja otpornosti materijala; njime se u izvesnom broju slučajeva bavi opšta teorija elastičnosti, a može se vršiti i eksperimentalnim metodima.

Ravnomerno opterećena kružna ploča koja slobodno leži na svojoj ivici (sl. 23). Ako je σ_d dozvoljeni napon na zatezanje (veličina koja se ne prekoračuje radi sigurnosti), ako je f ugib, q opterećenje raspoređeno po kvadratnom metru, r poluprečnik ploče i h njena debljina, tada je

$$h\geqslant 0{,}956\, r\sqrt{\frac{q}{\sigma_d}},$$

a ugib je

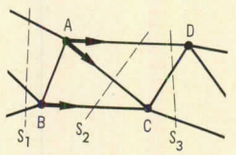
$$f=0{,}738\,\frac{qr^4}{Eh^3}.$$

Očigledno, maksimalni napon se javlja u središtu ploče.

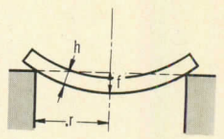
Ukleštena kružna ploča ravnomerno opterećena (sl. 24). U ovom slučaju maksimalni napon se ispoljava na ivici ploče; ugib je mnogo manji.

Stepen sigurnosti na zatezanje određuje se pomoću odnosa

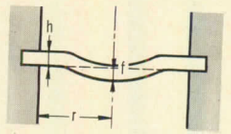
$$h\geqslant 0{,}703\, r\sqrt{\frac{q}{\sigma_d}},$$



Sl. 22



Sl. 23



Sl. 24

a ugib je

$$f=0{,}175\,\frac{qr^4}{Eh^3}.$$

Pravougaona ploča strane a i b ($b<a$) koja slobodno leži i nosi ravnomeran teret p po kvadratnom metru. Dozvoljeni napon σ_d na zatezanje je

$$\sigma_d>\frac{90}{\pi^4}\times\frac{qa^4b^2}{h^2(a^2+b^2)^2}$$

ili

$$h\geqslant 0{,}96\times\frac{ab}{a^2+b^2}\sqrt{\frac{q}{\sigma_d}}.$$

Ugib je

$$f=0{,}19\,\frac{qa^4b^4}{Eh^3(a^2+b^2)^2}.$$

U slučaju kvadratne ploče uzima se $a=b$.

Pravougaona ploča ukleštena na svojim ivicama koja nosi ravnomerno raspoređen teret q po kvadratnom metru. Sa $b<a$ uslov je

$$\sigma_d\geqslant\frac{qa^4b^2}{2h^3(a^4+b^4)}\text{ ili }h\geqslant\frac{a^2b}{\sqrt{a^4+b^4}}\sqrt{\frac{q}{2\sigma_d}}$$

Ugib na sredini ploče je

$$f=\frac{qa^4b^4}{32Eh^3(a^4+b^4)}.$$

Slobodna kružna ploča izložena opterećenju F usredsređenom na njenom centru C. Opterećenje F nije tačkasto, nego ispoljava svoje dejstvo na mali koncentrični krug poluprečnika r_c, koji je mnogo manji od poluprečnika r ploče. Uslov je

$$\frac{45}{32\pi}\times\frac{F}{h^2}\left(\log\frac{r}{r_c}+\frac{4}{5}\right)\leqslant\sigma_d.$$

Ugib je

$$f=\frac{117}{64\pi}\times\frac{Fr^2}{Eh^3}.$$

Kružna ploča ukleštena po svom obimu i poduprta na visinu ukleštenja pomoću oslonca pod pločama; prečnika r_c, koji je vrlo mali prema poluprečniku r ploče. Ako je σ_d dozvoljeni napon na zatezanje, potreban uslov je

$$\frac{45}{128}\times\frac{qr^2}{h^2}\left(\log\frac{r}{r_c}+\frac{r_c^2}{r^2}-1\right)\leqslant\sigma_d.$$

Slobodno oslonjena pravougaona ploča opterećena koncentrisanom silom u sredini. Uz $b<a$ važi uslov

$$2{,}28\,\frac{Fa^3b}{h^2(a^2+b^2)}\leqslant\sigma_d$$

ili

$$h\geqslant 1{,}51\sqrt{\frac{b}{a}}\times\frac{a^2}{a^2+b^2}\sqrt{\frac{F}{\sigma_d}}.$$

Ugib je jednak

$$f=0{,}46\,\frac{Fa^3b^3}{Eh^3(a^2+b^2)}.$$

Eksperimentalno ispitivanje otpornosti materijala metodima fotoelastometrije

OPŠTI POJMOVI. Ovaj moderni i tačni postupak zasniva se na eksperimentalnim sličnostima.

Inženjer koji izvodi neki projekat mora da vodi računa o nekim propisanim uslovima, kao što su, npr., nosivost mosta, vrste opterećenja koje treba predvideti itd.; na osnovu toga on mora da obavi različita ispitivanja potrebna za ostvarenje projekta, kao što su izbor materijala, tip gradnje, racionalni oblici, dimenzije delova. Osim toga, radi neophodnih uslova sigurnosti, treba da oceni stepen upotrebe gradnje, da odredi veličine ugiba itd. Za ova ispitivanja inženjer se koristi postojećim, kao i sopstvenim iskustvom, a služi se, razumljivo, proračunom po metodima otpornosti materijala; ali iskustvo i proračun nisu uvek dovoljni

da bi se načinio pogodan projekt; svakako, može se usvojiti ova ili ona vrsta gradnje na osnovu sličnosti sa već postojećim ili na osnovu estetskih razmatranja; to važi i za najracionalnije oblike; proračunom se dobijaju podaci o posledicama koje bi mogle nastati zbog usvajanja ovog ili onog oblika gradnje na osnovu unapred određenog najpogodnijeg oblika. Međutim, ponekad proračun postaje suviše složen te se verovatnoća greške povećava; ili, pak, neke pretpostavke u vezi sa otpornosti materijala nisu više tačne s obzirom na neke usvojene elemente; osim toga, ako je pošao od neke pretpostavke, radi uprošćenja, kako bi proračun priveo kraju, inženjer više ne zna koliki je stepen aproksimacije koju je ta pretpostavka unela u proračun, pošto proračuni relativnih grešaka ili stepena aproksimacije nisu više mogući u slučajevima (koji se često javljaju) kada se mora pribeći diferencijalnom ili integralnom računu.

Ako neki oblici dovode do koncentracije opterećenja u određenim zonama objekta, ponekad se javljaju teškoće pri pokušaju da se ti oblici izmene, a da se ne moraju uzeti preterani koeficijenti sigurnosti (koji su suviše skupi) na nekim tačkama, jer se mora unapred znati potrebno pojačanje drugih tačaka. Kada je projekt završen, potrebno je u toku izgradnje vršiti određena proveravanja ili različita merenja; kada je gradnja završena, treba izvršiti druga merenja, npr., ugiba, skupljanja, širenja. Najzad, treba omogućiti da se gradnja »osluškuje«, čak i kad je već u upotrebi, da bi se pratio tok nekih pojava.

U trima fazama dok se gradnja ili konstrukcija projektuje, izvodi i proverava, stoje inženjeru na raspolaganju određeni metodi ispitivanja koje vrše specijalizovane laboratorije. Najvažniji i najmoderniji je, bez pogovora, *metod fotoelastometrije* za određivanje najracionalnijih oblika gradnji i za prethodna merenja napona u različitim tačkama, korišćenjem smanjenih modela od providne plastične mase. Fotoelastometriju je uveo Avgustin Mesnager; sada se primenjuje u celom svetu. Njen je cilj pre svega određivanje elastičnih napona u svakoj tački projektovane konstrukcije kada su poznate primenjene sile, služeći se modelima od odžarenog stakla (kao što je radio Mesnager pri ispitivanju mosta kod mesta Balm) ili, u današnje vreme, od pogodnih elastičnih plastičnih materijala: araldita, trolona itd. Korišćeni providni materijali treba da imaju dovoljno široko elastično područje, da budu izotropni i da nemaju unutrašnje napone.

Teorija elastičnosti, koja se poziva na poznavanje unutrašnje ravnoteže i na Hukov zakon (proporcionalnost napona i elastičnih deformacija, sa superpozicijom dejstava koja se smatraju kao dodatna), vodi do diferencijalnih jednačina koje se mogu integrisati samo u posebnim slučajevima, najčešće bez naročite veze sa stvarnim slučajevima u praksi. Metodi otpornosti materijala pojednostavili su proračune pomoću pretpostavki koje se odnose na srednje vlakno i na normalne preseke, ali se oni primenjuju samo na dugačke prizmatične elemente; uostalom, proračuni ostaju vrlo složeni za neke moderne probleme, a proveravanja su dugotrajna i ponekad nesigurna; osim toga, kada je potrebno uvesti posebne pretpostavke, postaje gotovo nemoguće razmatranje ostvarenog stepena aproksimacije. S druge strane, pri projektovanju određene gradnje može se doći do nedovoljno racionalnih oblika, koji su bremeniti zonama usredsređenih opterećenja, budućim začecima pukotina, ili koji zahtevaju usvajanje preterano velikog stepena zamora. Fotoelastometrija je za inženjera jemstvo da se u svojim zamislima i proračunima može osloniti na jedan metod eksperimentalnog proveravanja koji omogućuje dobru raspodelu napona i eventualnu kontrolu određenih pretpostavki.

Fotoelastometrija je dugo primenjivana samo na ravne elemente, ograničene paralelnim stranama i izložene opterećenjima koja dejstvuju u njihovoj ravni simetrije. Mnogobrojne gradnje, kao što su mostovi, obično odgovaraju ovim uslovima. Osim toga mnogo se koriste metodi trodimenzionalne fotoelastometrije, kao što je »zamrzavanje napona«, tako da se model zagreje na temperaturi pri kojoj se javlja razvlačenje. Zatim se ohladi pod opterećenjem, pa se iseče na paralelne kriške i ispituje njihovo dvojno prelamanje.

Kao što joj ime kaže, fotoelastometrija je optički metod određivanja elastičnih napona kojima su podvrgnute različite tačke neke opterećene konstrukcije. Ona se obavlja na umanjenom modelu od providnog materijala, kao što je izotropni trolon, i bez prethodnih unutrašnjih napona, pomoću *polarizovanog svetla*; osim toga, nije obavezno da model bude strogo sličan stvarnoj gradnji; dovoljno je da se usvoje pravougaoni preseci iste površine, istih momenata inercije i istog položaja neutralnog vlakna da bi model bio strogo homotetičan u svim detaljima, srazmerno određenom smanjenju. Raspodela napona na različite pravce elemenata oko tačke vrši se u dvodimenzionom elastičnom sistemu duž prečnika »Lameove elipse«: ako su σ_1 i σ_2 glavni naponi u pravcu osa, elipsa ima jednačinu

$$\frac{x^2}{\sigma_1}+\frac{y^2}{\sigma_2}=1$$

Naponi i pravci elemenata koji im odgovaraju su »konjugovani«, spregnuti, u odnosu na elipsu napona:

$$\frac{x^2}{\sigma_1}+\frac{y^2}{\sigma_2}=\pm 1,$$

pri čemu se σ_1 i σ_2 uzimaju kao pozitivni pri zatezanju, a kao negativni pri pritisku. Ako bi bili poznati naponi σ_1 i σ_2, koji se nazivaju *glavnim naponima*, tj. naponi primenjeni u glavnim pravcima, u kojima su pomenuti naponi združeni sa ravnim elementima i koji su normalni na njih, odjednom bi bile poznate i Lameova elipsa i elipsa napona; dakle, bili bi poznati svi naponi oko tačke, te bi njeno elastično stanje bilo sasvim određeno. Umesto Lameovom elipsom pogodnije je služiti se Morovim krugom (sl. 25). Na osu $O\sigma$ nanosi se $OA=\sigma_1$ i $OB=\sigma_2$; OM predstavlja napon koji se odnosi na elemenat trase OS; P je podnožje upravne apscise od M do OB, vektor OP je normalni napon, a vektor PM napon smicanja.

Ugao $\widehat{MAB}=\theta$ jeste ugao koji gradi normala na element sa najvećim glavnim naponom; zato pravac ON, koji sa $O\sigma$ gradi ugao θ predstavlja normalu na element na koji je primenjen napon OM; zato se trasa OS tog elementa dobija kada se u O podigne vertikala na ON.

Iz toga se odmah dobija:

– napon smicanja $MP=\frac{\sigma_1-\sigma_2}{2}\sin 2\theta=\tau$;

– normalni napon $OP=\frac{\sigma_1+\sigma_2}{2}+\frac{\sigma_1-\sigma_2}{2}\cos 2\theta=\sigma$.

Na taj način se bilo koji napon određuje zavisno od glavnih napona i ugla θ.

OSNOVA FOTOELASTOMETRIJSKOG METODA. Mogu li se ispitivati stvarni naponi jedne konstrukcije služeći se staklom ili providnom plastičnom materijom čiji je Jungov modul različit od modula stvarnog materijala, čelika ili betona? U trodimenzionalnoj elastičnosti to nije nikako moguće. Ali ako se posmatra ravna konstrukcija izložena silama u svojoj ravni, onda je veličina napona u svakoj tački nezavisna od materijala, tj. od njegovog modula elastičnosti, pod uslovom, koji se obično ostvaruje, da primenjene spoljne sile budu nezavisne od tog modula, kao što je postavio matematičar Moris Levi (Maurice Levy).

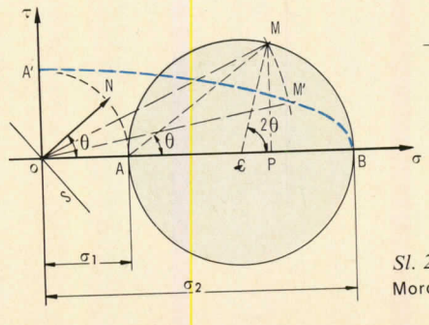
Smanjivanjem jedne konstrukcije u srazmeri $\frac{1}{\lambda^2}$, naponi tačno odgovaraju naponima konstrukcije ako se primenjene sile smanje u srazmeri $\frac{1}{\lambda^2}$. Ali se ova identičnost može ostvariti jedino ako deformacije ostanu *elastične* u smanjenom modelu kao što su u stvarnoj konstrukciji. Dakle, ako postoji opasnost da se plastični transparentni materijal deformiše plastično pod dejstvom napona, očigledno je da neće biti identičnosti napona sa stvarnom konstrukcijom, pošto će model pretrpeti izvesno prilagođavanje. U tom slučaju treba smanjiti spoljne sile u srazmeri $\frac{1}{\mu^2}>\frac{1}{\lambda^2}$; stvarni naponi biće jednaki izmerenim naponima pomnoženim sa $(\mu/\lambda)^2$.

Fotoelastični metod sastoji se u određivanju *izostatičkih linija*, tj. dvostruke mreže trajektorija, u stvari, tangenti i ortogonala, u svakoj tački, u glavnim pravcima, tj. u osama Lameove elipse. S druge strane, određuju se razlike glavnih napona $\sigma_1-\sigma_2$ u svakoj tački. Jednim komplementarnim metodom može se isto tako odrediti njihov zbir $\sigma_1+\sigma_2$ u svakoj tački. Tako se dobijaju veličina i pravac napona σ_1 i σ_2 za svaku tačku koja se smatra interesantnom: na taj način je problem rešen. Može se, uostalom, izostaviti određivanje zbira $\sigma_1+\sigma_2$, pošto postoji metod koji omogućuje izračunavanje σ_1 i σ_2 samo iz razlike $\sigma_1-\sigma_2$ (metod grafičkog integralenja).

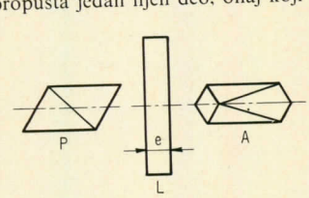
Ispitivanje se može dopuniti određivanjem pravaca najvećeg smicanja, koji daju linije nagnute za 45° prema glavnim pravcima i linije najvećeg zatezanja. Poznavanje ovih pravaca je dragoceno da bi se u armiranom betonu odredili pravci uzengija i zategnutih štapova.

PRINCIP FOTOELASTOMETRIJSKOG METODA. Kada jedan svetlosni zrak (sl. 26) padne na Nikolovu (Nicol) prizmu ili polaroid P, izlazni zrak je polarizovan u nekom određenom pravcu; ako se ovaj primi u jedan drugi polaroid koji se ukršta pod pravim uglom, analizator A, nastaje ekstinkcija, gašenje. Ako se između te dve tako postavljene prizme unese transparentna i izotropna ploča paralelnih strana, ekstinkcija još traje. Ali ako se ta ploča izloži sili, npr., zateznoj, svetlost će se ponovo pojaviti. Ako se radi sa običnom belom svetlošću, svetlost koja se ponovo javlja, biće obojena. Razlog ovoj pojavi je sledeći: u tački gde zrak polarizovan u linearno polarizovanu svetlost pada na ploču, svetlost putuje sporije u smeru u kome je napon najveći i brže u smeru u kome je napon najmanji. Usled toga se ova linearno polarizovana svetlost polarizuje u dvema upravnim ravnima u kojima su naponi maksimalni i minimalni. Drugim rečima, svetlost izlazi polarizovana duž osa Lameove elipse.

Pošto ovo linearno polarizovano talasno kretanje po dvema upravnim ravnima ima faznu razliku zbog različitog kretanja dva zraka, na izlazu iz ploče javlja se eliptično polarizovana svetlost, i analizator propušta jedan njen deo, onaj koji



Sl. 25
Morov krug u ravnoj elastičnosti.



Sl. 26
Staklena ploča između dve Nikolove prizme ukrštene pod pravim uglom.

je razložen duž njegovog privilegovanog pravca; to objašnjava ponovno uspostavljanje svetlosti.

Postoje dva slučaja kada je svetlost ugašena:

1. Kada su ravni glavnih pravaca na mestu upada u ploču paralelne sa ravnima polarizacije dve ukrštene prizme. U tom slučaju upadna linearno polarizovana svetlost prolazi kroz pločicu bez deformacije i nailazi na analizator u ravni ekstinkcije;

2. Kada su naponi σ_1 i σ_2 jednaki. Tada je Lameova elipsa, u stvari, krug, i svaki je pravac u njemu glavni: Morov krug se svodi na tačku. U tim tačkama svetlost prolazi kroz pločicu bez deformacije pošto su naponi tu jednaki u svim pravcima.

Naročito ako je $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$ (slučaj neutralne linije), dolazi isto tako do ekstinkcije. Tačke u kojima je $\sigma_1 = \sigma_2$ nazivaju se *singularnim tačkama.*

Ako umesto svetlosnog zraka na pločicu pada snop paralelnih zraka, na izlazu iz analizatora vidi se osvetljena pločica, ali preko nje ide jedna crna linija. To je *izoklina linija*, nazvana tako zato što je ona mesto tačaka gde su glavni pravci napona paralelni osama ukrštenih prizmi.

Ako se sistem ukrštenih Nikolovih prizmi okrene oko njihove ose, stvarajući neki ugao, izoklina linija se pomeri i deformiše. Kada se tako pređe 90°, dobije se skup izoklina koje odgovaraju određenim pravcima osa prizmi. Sve izokline prolaze kroz singularne tačke $\sigma_1 = \sigma_2$ koje ostaju nepromenjene.

Pomoću izoklinih linija mogu se lako nacrtati izostatičke linije, koje su, u svakoj tački, tangente i ortogonale na pravce glavnih napona u tim tačkama (sl. 27). Neka su C_1 i C_2 dve susedne izokline, Δ_1 i Δ_2 pravci osa jednog od polaroida, npr., polarizatora, koji odgovaraju tim izoklinama; neka tačka M_1 bude na C_1; želimo da nađemo M_2 na C_2 izostatske linije koja prolazi kroz M_1. Dovoljno je da se kroz M_1 povuče prava M_1M_2 koja je bisektrisa ugla, čije je teme M_1 a kraci su mu linije Δ_1' i Δ_2', koje su paralelne sa Δ_1 i Δ_2. Zaista, trougao AM_1M_2 je ravnokrak, pošto je svaki od uglova osnove jednak polovini ugla koji obrazuju Δ_1 i Δ_2; odatle $AM_1 = AM_2$. Tako se postupa od tačke do tačke; upravne linije u M_1 i M_2 na Δ_1' i Δ_2' seku se u O, koje je centar krivine izostatske linije između susednih tačaka M_1 i M_2; tako se pravi izostatska linija pomoću niza malih uzastopnih lukova kruga. Tako se dobiju glavni pravci u svakoj tački.

Da bi se dobile veličine σ_1 i σ_2, čiji su pravci već poznati, najpre se određuje razlika $\sigma_1 - \sigma_2$. Zbog toga se posmatraju izohromatske linije, koje su linije jednakog obojenja i istovremeno linije jednake razlike glavnih napona. Stoga treba ponovo uzeti sistem dve Nikolove prizme i videti šta se događa u monohromatskom svetlu. Već je ustanovljeno da se javlja gašenje duž izoklinih linija i u singularnim tačkama za koje je $\sigma_1 = \sigma_2$. Prema tome, kako se sada javljaju izohromatske linije? Svetlost putuje brže duž najmanjeg napona, a sporije duž najvećeg. Razlika u putovanju ili optičko kašnjenje (što odgovara nastajanju fazne razlike oscilacija) proporcionalni su zato debljini pločice e i razlici napona $\sigma_1 - \sigma_2$. Najzad, sve monohromatske svetlosti ne putuju na isti način: razlika pređenih putanja je utoliko veća što je dužina talasa manja. Konačno, razlika u fazi između dva talasna kretanja je proporcionalna

$$\frac{e}{\lambda}(\sigma_1 - \sigma_2)$$

i iznosi $\varphi = A\frac{e}{\lambda}(\sigma_1 - \sigma_2)$. Ona je nula za $\sigma_1 = \sigma_2$, kao i za $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$. Ponovo se nalaze singularne tačke.

Fazna razlika je jednaka celom broju umnoška 2π, ako je

$$2k\pi = A\frac{e}{\lambda}(\sigma_1 - \sigma_2),$$

tj.

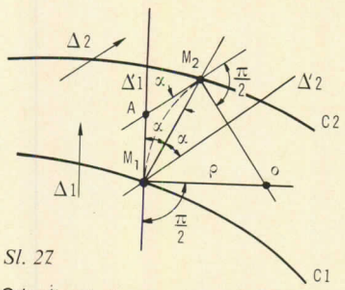
$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{2k\pi\lambda}{AE} = \frac{k\lambda}{\frac{A}{2\pi}e}$$

ili

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{k\lambda}{Ce}.$$

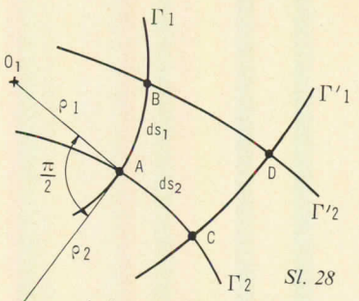
Veličina $C = \frac{A}{2\pi}$ važna je konstanta u fotoelastometriji; to je konstanta koja je svojstvena upotrebljenom transparentnom materijalu; ona se naziva *fotoelastičnom konstantom;* jedinica je *brevster*, po imenu fizičara koji je otkrio dvojno prelamanje 1815: ona je mala za staklo, ali, suprotno, ona je vrlo velika za plastične materije kao što su araldit i naročito trolon.

U nekoj datoj tački jednog modela gde se postupno povećava skup primenjenih opterećenja, uočava se u *monohromatskoj svetlosti* prvo ekstinkcija koja odgovara k = 1 za veličinu $\sigma_1 - \sigma_2 = \lambda/Ce$. Ako se spoljne sile dalje povećavaju, svetlost se ponovo javlja u posmatranoj tački, zatim se ponovo gasi za $\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{2\lambda}{Ce}$; ona se po treći put gasi za $\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{3\lambda}{Ce}$ itd. Zato se u svakoj tački modela dobijaju jedna za drugom ekstinkcione linije, koje se nazivaju »ekstinkcije prvog reda«, »drugog reda« itd., za veličine $\sigma_1 - \sigma_2$ koje su postupni umnošci prve vrednosti ekstinkcije.



Sl. 27

Određivanje izostatičkih linija, tačku po tačku, pomoću izoklina.



Sl. 28

Lukovi izostatičkih krivih ukršteni pod pravim uglom.

Iz prethodne vrednosti dobija se

$$\lambda = \frac{A}{2k\pi}e(\sigma_1 - \sigma_2)$$

ili

$$\lambda = \frac{C(\sigma_1 - \sigma_2)e}{k}.$$

U običnoj svetlosti za sve tačke gde su razlike napona $\sigma_1 - \sigma_2$ konstantne, veličine posmatranih λ odgovaraju obojenim zračenjima koja nastaju iz spektra. Zato će kriva imati ujednačeno obojenje ako razlika $\sigma_1 - \sigma_2$ ostane konstantna, a to obojenje se ostvaruje obustavljanjem zračenja talasne dužine λ_1, λ_2, λ_3,... koja se dobijaju stavljajući da je $k = 1, 2, 3,...$ u prethodnom obrascu. Ova linija jednakog obojenja naziva se *izohroma.* Umesto da se radi sa običnom svetlosti, pogodnije je da se koristi *monohromatska svetlost*; na taj način se dobijaju fine i jasne crne linije.

Kada se model izloži malim naponima, nema crnih linija tipa izohroma; javljaju se samo izokline. Isto se događa ako je fotoelastična konstanta mala, kao što je slučaj sa staklom. Ako se proporcionalno povećavaju sve spoljne sile, izokline ostaju nepromenjene, ali se pojavljuju prve crne linije tipa izohroma i pomeraju se; izokline pričinjavaju smetnje i mogu se ukloniti imajući u vidu činjenicu da su izohrome nezavisne od pravca osa prizmi, što nije slučaj sa izoklinama. Ove se mogu ukloniti brzim okretanjem sistema Nikolovih prizmi oko zajedničke ose. Jednostavnije je da se upotrebi cirkularno polarizovana svetlost, čime se isto tako uklanjaju izokline. Cirkularno polarizovana svetlost osciluje podjednako u svim pravcima, te rotacija sistema prizmi oko zajedničke ose ne vrši nikakav uticaj, što isključuje pojavu izoklina. Ovakvo uklanjanje izoklina postiže se tako što se iza polarizatora postavi jedna četvrt-talasna pločica od liskuna, tako da na napregnutu ploču pada cirkularna polarizovana svetlost. Jedna druga četvrt-talasna pločica od liskuna postavlja se iza napregnute ploče, odnosno ispred analizatora i ona preobraća cirkularno polarizovanu svetlost u linearno polarizovanu. Položaj pločica je određen: one se postavljaju tako da njihove optičke ose budu upravne, a sa osom prizmi grade ugao od 45°. Dovoljno je da se poznaje $\sigma_1 - \sigma_2$ u jednoj određenoj tački da bi se imale vrednosti $\sigma_1 - \sigma_2$ na celoj crnoj izohromi. Za ovo se upotrebljava Babine-Žamenov (Babinet-Jamin) kompenzator.

Poznavajući razliku $\sigma_1 - \sigma_2$, može se dobiti σ_1 i σ_2 integracijom. U sopstvenim koordinatama δ_1 i δ_2 odgovaraju sledećim diferencijalnim jednačinama:

$$\frac{\partial\sigma_1}{\partial S_1} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\rho_2} = 0, \quad \frac{\partial\sigma_2}{\partial S_2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\rho_1} = 0;$$

∂S_1 i ∂S_2 su elementi izostatičkog luka, P_1 i P_2 su poluprečnici krivine koja odgovara izostatičkim linijama Γ_1 i Γ_2, koje su upravne na A (sl. 28). Odatle se ima

$$\sigma_1 = \sigma_{1,0} + \int_0^{S_1} \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\rho_2}\,dS_1$$

$$\sigma_2 = \sigma_{2,0} + \int_0^{S_2} \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\rho_1}\,dS_2.$$

Vrši se grafička integracija, u delovima, postupno jedan za drugim. Umesto da se vrše ove grafičke integracije, može se određivati zbir $\sigma_1 + \sigma_2$ različitim metodima, a naročito merenjem kontrakcije ili dilatacije ploče debljine e u posmatranoj tački (Mesnagerov metod). Ako naznačimo Poasonov koeficijenat sa μ, onda je

$$\Delta e_1 = \frac{e}{E}\sigma_1 \text{ za napon } \sigma_1$$

$$\Delta e_2 = \frac{e}{E}\sigma_2 \text{ za napon } \sigma_2$$

$$\Delta e = \Delta e_1 + \Delta e_2 = \frac{e\mu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2).$$

Poznato je e, μ i E. Meri se Δe; odatle se dobija zbir $\sigma_1 + \sigma_2$. Postoji i drugi metod,

Kokerov (Coker) i Filonov (Filon) metod. Najzad, postoji *metod električnih analogija* i *apsidometrijski metod* (sličnost sa membranama).

PRIMENA PIEZOELEKTRICITETA KVARCA NA ODREĐIVANJE SILA KOJE SE VRLO BRZO MENJAJU.

Ovaj metod se može koristiti, npr., za određivanje vibracija građevina. Pogodno isečena pločica kvarca pokazuje električne napone Q koji su proporcionalni pritiscima p, kojima su izložene njene strane: $Q = k \cdot p$, $k = 6{,}45 \times 10^{-8}$ (jedinice C. G. S.).

Uređaj sa kvarcom (sl. 29) sadrži:
— kvarcni dinamometar;
— elektrometarsku cev;
— cevni pojačivač;
— uređaj za očitavanje (oscilograf). On se sastoji od pločice koja je postavljena između krakova permanentnog magneta i koja se održava normalno na linije sila pomoću dve opruge; ona može da oscilira bez trenja i bez odstupanja oko svoje ose, povlačeći jedno malo ogledalo.

Ovaj sistem sa kvarcom omogućuje da se ispituju vrlo brze promene pritiska: udarac malja, pritisak u termičkim mašinama, pritisci u vatrenom oružju, sile na železničkoj pruzi, vibracije nepokretnih konstrukcija i konstrukcija pod dejstvom pokretnih opterećenja. Takođe se mogu ispitivati podmorske dubine pomoću ultrazvuka, određivati moduli elastičnosti različitih materijala ili se mogu napraviti vrlo osetljivi mikrofoni.

Primene i dopune

GREDA UKLEŠTENA NA JEDNOM KRAJU, SLOBODNA NA DRUGOM. Pri savijanju grede pod dejstvom sila primenjenih u njenoj ravni simetrije, vlakna ispupčene strane se izdužuju, a vlakna izdubljene strane se skraćuju. Između ove dve strane postoji neutralno vlakno, koje za vreme savijanja zadržava istu dužinu.

Ravan neutralnih vlakana, koja je normalna na ravan primenjenih sila, prolazi kroz centar inercije pravog preseka grede, razumljivo, pod uslovom da deformacije ne prekorače oblast elastičnosti, tj. pod uslovom da se deformacije ne protežu do tačke kada delimično postaju konačne kada prestane dejstvo sila.

U pravom preseku, tj. normalnom na neutralno vlakno, deluje s jedne strane *spreg*, čiji se moment (proizvod jedne od sila sprega i njenog kraka poluge) naziva *momentom savijanja*, i s druge strane — *sila* za koju se obično pretpostavlja da je tangencijalna, tj. smeštena u ravni pravog preseka, što nije potpuno tačno, i koja se označava kao *transverzalna sila* (presečna sila).

Teorija otpornosti materijala razmatra deformacije usled sprega, tj. deformacije koje nastaju pod dejstvom momenta savijanja, nezavisno od mnogo slabijih deformacija usled transverzalne sile.

Ako se sa M označi momenat savijanja desno od nekog preseka dolazi se do izraza

$$M = \frac{EI}{\rho} \text{ ili } \frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI}$$

gde je ρ poluprečnik krivine neutralnog vlakna u tački susreta sa posmatranim pravim presekom, I je moment inercije pravog preseka u odnosu na osu (horizontalnu u gredi gde su primenjene sile vertikalne) koja prolazi kroz neutralno vlakno, i E je modul elastičnosti ili Jungov modul. Čitava ova teorija pretpostavlja da pravi preseci ostaju normalni i da, osim toga, ne menjaju svoj oblik. U stvari, podužno pritisnuti delovi šire se poprečno, a zategnuti se skupljaju. Osim toga, što je još važnije, pravi preseci, u stvari, ne ostaju ravni: oni se iskrivljuju. Ovo se nikada ne sme izgubiti iz vida da ne bi došlo do iznenađenja zbog razlika između teorije i stvarnosti. Ako se u savijenoj gredi, pre savijanja probuši vrlo mali pravolinijski otvor koji može da propušta vidljivi zrak, duž vertikale na ravan neutralnih vlakana, dakle, u osi pravog preseka, obično se utvrđuje da posle određenog savijanja vidljivi zrak više ne prolazi, pošto otvor, koji je u početku bio pravolinijski, ima oblik slova S.

Ispitivanje obrasca za krivinu $\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI}$ pokazuje da za ostvarivanje najmanjeg savijanja, tj. da bi se imala najmanja krivina $\frac{1}{\rho}$, treba ostvariti najveći moment inercije I, a da se pri tom, radi postizanja najveće moguće visine za istu dužinsku težinu materijala, ne pretera sa smanjivanjem širine grede, pošto postoji opasnost uvijanja.

Odatle potiče i oblik »dvostruko T« greda za podove i metalnih greda za mostove, sa središnim rebrom i dva pojasa pričvršćena ugaonim gvožđem.

Za gredu uklještenu na jednom kraju i slobodnu na drugom, ugib ima vrednost

$$f'' = \frac{Fl^3}{3EI}.$$

Do ovog se obrasca lako dolazi imajući u vidu da je

$$M = \frac{EI}{\rho} = EI\frac{d^2x}{dz^2}.$$

Osa x je horizontalna, a osa z je vertikalna i upravljena odozdo nagore. Vrši se integraljenje jednačine

$$\frac{d^2x}{dz^2} = \frac{M}{EI}.$$

Posebni slučajevi.

Pravougaona greda širine a *i visine* b *u ravni savijanja.* Postoji

$$I = \frac{ab^3}{12}$$

a odatle ugib

$$f''' = \frac{4Fl^3}{ab^3E}.$$

Ako je presek kvadratni ($a = b$), dobijamo:

$$f''' = \frac{4Fl^3}{a^4E}.$$

Greda kružnog preseka poluprečnika R. Moment inercije ima vrednost:

$$I = \frac{\pi R^4}{4}$$

a odatle

$$f''' = \frac{4}{3} \times \frac{Fl^3}{\pi ER^4}.$$

UGIB GREDE KOJA SE SASTOJI OD n PLOČA UKUPNE DEBLJINE b.

Isto se događa kao da svaka ploča (sl. 30) učestvuje sa $\frac{1}{n}$ opterećenja F usredsređenog u sredini grede. Prema tome ugib je

$$f_1 = \frac{4Fl^3}{nab^3E}.$$

Ali ako se ploče spoje zakivcima tako da obrazuju gredu od n slojeva, onda nastaje

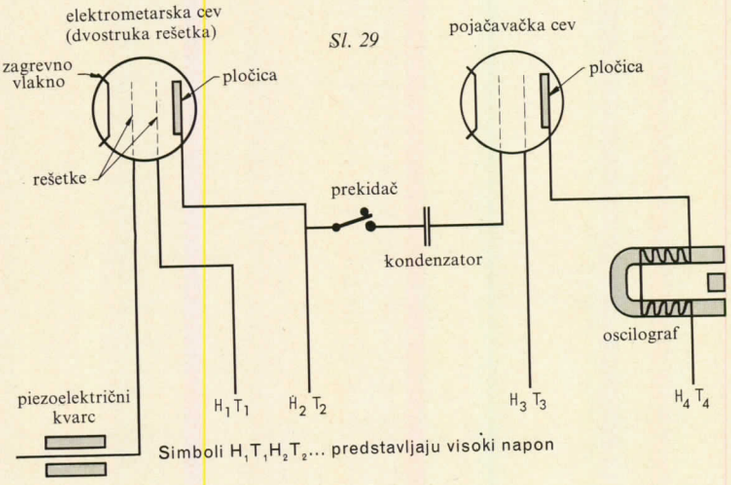
$$f_2 = \frac{4Fl^3}{E} \cdot \frac{1}{a(nb)^3}.$$

Odatle izlazi da je $f_1 = n^2 f_2$. Ako je, npr., $n = 3$, tada je $f_1 = 9f_2$. Ako se skupe zajedno 52 karte, dobijamo

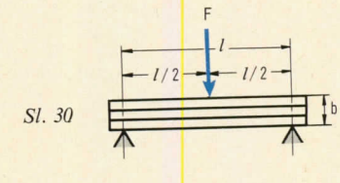
f_1 (slobodne karte) $= 52 \times 52 \times f_2$ (slepljene karte) $= 2704\, f_2$.

Prema tome, ugib skupa od 52 slobodne karte je gotovo 3000 puta veći od istog slepljenog skupa pod istim opterećenjem. To takođe objašnjava veliku savitljivost čeličnih gibnjeva.

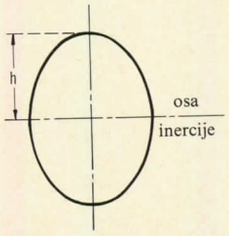
OTPORNOST NA SAVIJANJE. PONSELEOV KRITERIJUM. MODUL PRESEKA. Označimo sa R najveću silu istezanja ili pritiska po jedinici površine, tj. najveći »napon« koji je materijal u stanju da podnese u elastičnoj oblasti, tj. da ne dođe do trajne deformacije. Neka je h najveće rastojanje spoljnog vlakna od ose inercije pravog preseka grede (sl. 31); najveće relativno istezanje $\varepsilon = \frac{h}{\rho}$, gde je ρ poluprečnik krivine.



Sl. 29



Sl. 30



Sl. 31

Prema tome najveće dozvoljeno istezanje je $R = E\varepsilon$. Iz obrasca $M = \frac{EI}{\rho}$ dobija se $\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI}$; odatle $\varepsilon = \frac{M}{E} \times \frac{h}{I}$ i $RI = hM$.

Pod pretpostavkom da je materijal homogen, uslov za elastičnu otpornost savijanju određuje se nejednakošću $M < R\frac{I}{h}$.

Ovaj obrazac se naziva »Ponseleov (Poncelet) kriterijum«, u kome je važan količnik $\frac{I}{h}$ koji se označava kao *otporni moment preseka*.

U stvarnosti ovo pravilo sadrži vrlo važan koeficijenat sigurnosti; zaista istezanje raste od neutralnog vlakna do ivice grede, gde materijal biva ojačan od njemu susednog materijala, tako da se savijanjem mogu ostvariti znatno veća izduženja nego pri prostom zatezanju.

GREDA JEDNAKE OTPORNOSTI. Gredom »jednake otpornosti« naziva se greda, čije je najveće dozvoljeno istezanje $\varepsilon = \frac{h}{\rho}$ isto za sve prave preseke. Ona zadovoljava uslov

$$\frac{Mh}{I} = K = \mathscr{R} \quad (K = \text{konstanta})$$

ili $M = \mathscr{R}\frac{I}{h}$.

Otpornost $\mathscr{R}$, ili *napon dozvoljenog zamora*, utvrđena je propisima. Ona je praktično znatno niža od napona koji dovodi do prekida plastičnim klizanjem ili do pravog prekida (iz razloga sigurnosti).

PRIMENA GREDE PRAVOUGAONOG PRAVOG PRESEKA. Ako joj je vodoravna širina a i visina b, dobijamo

$$I = \frac{ab^3}{12} \text{ i } h = \frac{b}{2}$$

ili

$$\frac{I}{h} = \frac{ab^3}{6}.$$

Uslov jednake otpornosti je

$$\frac{M}{ab^2} = K.$$

Da bi se rešio problem, mora se propisati dopunski odnos

$$\varphi(a, b) = 0.$$

OPTEREĆENJE USREDSREĐENO NA SLOBODNOM KRAJU UKLEŠTENE GREDE. Zanemaruje se sopstvena težina grede dužine l, ako je F opterećenje na slobodnom kraju, x rastojanje pravog preseka od uklještenja ($x < l$), dobija se

$$\frac{l - x}{ab^2} = K.$$

Ovaj obrazac daje nulu za $l = x$ (debljina na kraju grede je nula); u stvari, potrebna je neka debljina da bi se izdržala transverzalna sila o kojoj proračun ne vodi računa.

U nekom preseku na rastojanju x od uklještenja transverzalna sila F_τ ima vrednost

$$F_\tau = -\frac{dM}{dx}.$$

Pošto je $F_\tau = F$ u svim presecima takve grede (jedna jedina sila na slobodnom kraju), dobijamo:

$$-\frac{dM}{dx} = -\frac{d}{dx}(l - x)F = F.$$

Treba napomenuti da je transverzalna sila jednaka izvodu ugibnog momenta sa promenjenim znakom.

SLUČAJ RAVNOMERNO RASPOREĐENOG OPTEREĆENJA p. Uslov jednake otpornosti je u tom slučaju

$$\frac{(l - x)^2}{ab^2} = K.$$

GREDA KOJA LEŽI NA DVA PROSTA OSLONCA I NOSI RAVNOMERNO RASPOREĐENO OPTEREĆENJE. Pretpostavimo da je greda odsečena u visini oslonaca (sl. 32).

1. Opterećenje q je ravnomerno raspoređeno (po jedinici dužine). Rastojanje oslonaca je l, i na njihovoj visini se greda završava. Presecimo gredu sasvim blizu oslonaca, sa njihove unutrašnje strane; transverzalna sila je F_τ.

Zbog simetrije dobija se $R = F_\tau = \frac{ql}{2}$, pri čemu je R upravni otpor svakog oslonca.

Momenti savijanja u krajnjim presecima su nula. Presecimo gredu po preseku apscise x. Transverzalna sila je jednaka težini dela grede smanjenoj za otpor oslonca R. Neka je

$$F_\tau = q\left(\frac{l}{2} - x\right) - \frac{ql}{2} = -qx.$$

Iz toga je $M = -\int F_\tau dx = \frac{q}{2}(x^2 - \frac{l^2}{4})$.

Očigledno, moment je negativan; konkavna strana savijene grede okrenuta je prema gore.

Za deo grede koji je smešten između levog oslonca i sredine, transverzalna sila, za neku tačku smeštenu u toj zoni, jednaka je težini celog dela smeštenog desno od te tačke manje otpor R, što daje

$$F_\tau = q\left(\frac{l}{2} - x\right) - \frac{ql}{2} = -qx.$$

Kriva koja predstavlja transverzalne sile je prava *aob*. Izraz za M je isti kao i gore; kriva koja predstavlja momente savijanja je parabola drugog stepena. Kada se dvaput integrali jednačina momenta M, koja je gore data, dobija se profil posle deformacije.

Dobijamo $z = 0$ za $x = \pm\frac{l}{2}$,

gde je z ordinata različitih tačaka deformisane grede računata pozitivno nadole.

Ima se $$z = f - \frac{q}{48EI}(3l^2x^2 - 2x^4).$$

Ugib je jednak $$f = \frac{5ql^4}{384EI}.$$

2. Često je korisno da se ima jednačina krive uzimajući jedan od krajeva grede kao koordinatni početak. Kada se ponovo izvede proračun, dobija se

$$F_\tau = q(l - x) - \frac{ql}{2},$$

$$M = -\frac{q}{2}x(l - x),$$

$$EI\,z = \frac{q}{24}(x^4 - 2x^3l + l^3x).$$

Kao vežba, može se proračunati ugib direktno iz obrasca

$$f = \frac{1}{EI}\int_0^{\frac{l}{2}}(l - x)M dx.$$

Pod znakom »zbira« uvodi se veličina momenta M.

$$M = \frac{q}{2}\left(x^2 - \frac{l^2}{4}\right)$$

a iz toga integrala za rešavanje

$$f = \frac{q}{2} \times \frac{1}{EI}\int_0^{\frac{l}{2}}\left(l - x\right)\left(x^2 - \frac{l^2}{4}\right)dx.$$

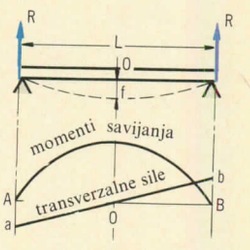
PRINCIP GIBNJEVA. Zamislimo da se gibanj sastoji od ploča iste debljine, kružnog profila i istog polupreč nika krivine r (sl. 33). Neka je F primenjena sila na svakom kraju. U delu AB otpor pruža samo glavna ploča, ona gornja. Promena krivine se dobija iz jednačine

$$EI\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{\rho}\right) = F(L - x).$$

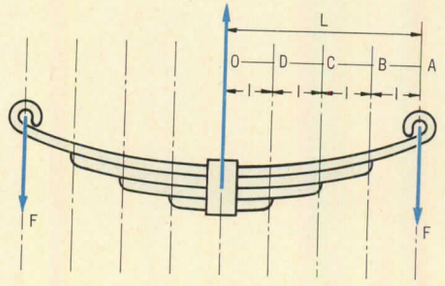
Stavljajući

$$Q = \frac{F}{EI}.$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{r} - Q(L - x).$$



Sl. 32



Sl. 33

U delu BC otpor pružaju prva dva lista; dobija se

$$2EI\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{\rho}\right)=F(L-x)$$

iz čega

$$\frac{1}{\rho}=\frac{1}{r}-\frac{Q}{2}(L-x)$$

i tako redom.

Deformacija raste od A do B, od B do C, od C do D itd., ali ona se naglo smanjuje u pravim presecima A, B, C,..., tako da praktično poprima iste vrednosti na različitim stepenicama od krajeva do stepenice u sredini. Na taj način se dobija čvrsto telo praktično iste otpornosti, ali velike savitljivosti, zbog nezavisnosti ploča, koje mogu slobodno da se gibaju i pri tom ostaju u slobodnom dodiru, gotovo bez trenja. Kad bi ploče bile zavarene, savitljivost bi bila mnogo manja. Neka je l širina svakog prepusta. Dobija se $nl = L$ za n stepenica. Ugib za prepust i $(i<n)$ je

$$f_i=\frac{1}{iEI}\int(L-x)M\,dx$$

ili

$$f_i=\frac{F}{iEE}\int(L-x)^2\,dx.$$

Integracijom od $x=il$ do $x=(i-1)l$ dobija se

$$f_i=\frac{FL^3}{EI}\times\frac{3i^2-3i-1}{3i}.$$

Ovi se ugibi sabiraju, stavljajući postupno $i=1, 2,\ldots, n$. Približna veličina ukupnog ugiba f data je obrascem

$$f=\frac{FL^3}{2nEI}=\frac{FL^2l}{2EI}.$$

Primer. *Proračun gibnjeva šinskih vozila.* U ovom slučaju ugib f za normalno opterećenje 2F iznosi obično 1 cm za lokomotive i 10 cm za vagone. Neka ε bude najveće dozvoljeno istezanje. Ako je e debljina lista ili »ploče«, dobijamo:

$$e=2r\varepsilon.$$

S druge strane,

$$f_1=\frac{L^2}{2r}=\frac{FL^2l}{2EI}$$

i

$$l=\frac{L}{n}=\frac{EI}{Fr}.$$

Poznajući f_1 i L sračunava se r. Poslednji obrazac daje l i n. Obično se koriste trake širine 8 cm.

GREDA UKLEŠTENA NA OBA KRAJA. Razmotriće se dva slučaja prema tome da li je opterećenje ravnomerno raspoređeno ili je usredsređeno na sredini grede.

RAVNOMERNO RASPOREĐENO OPTEREĆENJE. Neka q bude opterećenje po jedinici dužine grede. Uklještenje izaziva vertikalni otpor $R=\frac{ql}{2}$, upravljen nagore, na svakom kraju. Osim toga, nastaje i spreg uklještenja M_0. U preseku apscise x, računato pozitivno od sredine O grede, transverzalna sila je

$$F_\tau=\left(\frac{l}{2}-x\right)\;q-\frac{lq}{2}=-qx;$$

odatle je moment savijanja na apscisi x

$$M=\frac{q}{2}\left(x^2-\frac{l^2}{4}\right)+M_0$$

gde je M_0 veličina momenta uklještenja.

Dobija se

$$M_0=\frac{ql^2}{12}.$$

Ugib je

$$f=\frac{ql^4}{384EI}.$$

On je pet puta manji od ugiba grede koja slobodno leži na dva prosta oslonca. Deformisana greda ima dve prevojne tačke smeštene na rastojanju $0.211l$ od uklještenja. Ugibni moment na sredini grede ima veličinu $M=\frac{ql^2}{24}$. Spreg na visini uklještenja je jednak $\frac{ql^2}{12}$. To je *moment uklještenja.*

Opterećenje F usredsređeno na sredini. Pretpostavlja se da je težina grede zanemarljiva (sl. 34). Otpor svakog oslonca je

$$F_0=-\frac{F}{2}.$$

Dobija se $M=-\frac{F}{2}\left(\frac{l}{2}-x\right)+M_0$

za $x=\frac{l}{2}$, spreg M se svodi na M_0.

Dobija se $M_0=\frac{Fl}{8}$.

Moment savijanja $M=\frac{F}{2}\left(x-\frac{l}{4}\right)$ se poništava za $x=\frac{l}{4}$ i, zbog simetrije, za

$$f=-\frac{l}{4}.$$

U slučaju dva preseka postoje prevojne tačke. Dobijamo takođe

$$f=\frac{Fl^3}{192EI}.$$

GREDA UKLEŠTENA NA JEDNOM I SLOBODNO OSLONJENA NA DRUGOM KRAJU. Isto tako se razmatraju dva slučaja prema tome da li je opterećenje ravnomerno raspoređeno ili usredsređeno u tački.

Ravnomerno raspoređeno opterećenje. Za otpor oslonaca nalazi se (sl. 35):

— na osloncu uklještenja, $R=\frac{5}{8}ql$;

— na prostom osloncu, $R'=\frac{3}{8}ql$.

Moment savijanja u preseku apscise x (računato od uklještenja) je

$$M=\frac{q}{8}(4x^2-5lx+l^2).$$

Moment savijanja jednak je nuli za $x=\frac{l}{4}$ (tačka prevoja krivine grede).

Maksimalni moment je za $x=\frac{5l}{8}$ i iznosi $M_{maks.}=-\frac{9ql^2}{128}$.

Maksimalni ugib ima veličinu $f=\frac{ql^4}{184EI}$.

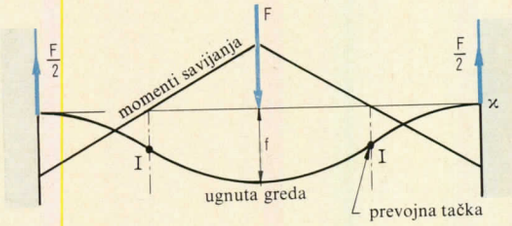
Opterećenje F usredsređeno na jednoj tački grede. Pretpostavlja se da je težina grede (sl. 36) zanemarljiva u odnosu na opterećenje F. Ako je l rastojanje opterećenja od tačke uklještenja, a l' od prostog oslonca, dobija se $l+l'=L$.

Ako je R vertikalni otpor uklještenja, a R′ otpor prostog oslonca, dobija se $R+R'=F$. U delu l moment savijanja je

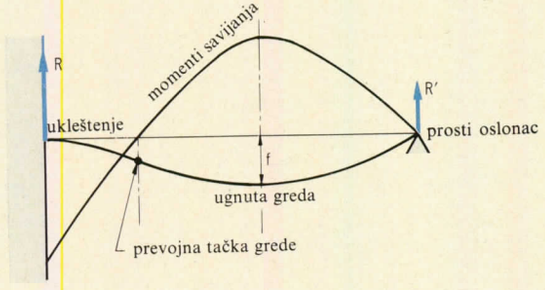
$$M=F(l-x)-R'(L-x)$$

gde je x apscisa sile F računata od uklještenja. U delu l grede nalazimo

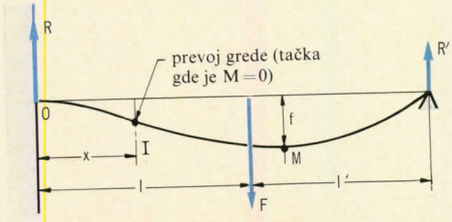
$$M'=-R'(L-x).$$



Sl. 34



Sl. 35



Sl. 36

Integralenjem se nalazi

$$R = \frac{Fl'}{2L^3}(3l^2 + 6ll' + 2l'^2)$$

i

$$R' = \frac{F}{2L^3} l^2 (2l + 3l').$$

Moment savijanja M_0 kod ukleštenja ima veličinu

$$M_0 = \frac{F}{2L^2} ll' (l + 2l').$$

U tački u kojoj je moment savijanja nula, postoji prevojna tačka grede. Veličina apscise x je tada

$$x = \frac{M_0}{R} = \frac{Ll(l + 2l')}{3l^2 + 6ll' + 2l'^2}.$$

U posebnom slučaju gde je $l = l'$ (opterećenje primenjeno na sredini grede), dobija se

$$R = \frac{11F}{16} \text{ i } R' = \frac{5F}{16}.$$

$$M_0 = \frac{3}{16} FL.$$

$$M = \frac{F}{16}(3L - 11x) \text{ i } M' = -\frac{5F}{16}(L - x)$$

za $x = \frac{3L}{11}$ dobija se $M = 0$;

za $x = \frac{L}{2}$ dobija se $M = M' = -\frac{5FL}{32}$.

Maksimalni ugib je $f = \frac{1}{48\sqrt{5}} \times \frac{FL^3}{EI}$.

Ovaj ugib je $\sqrt{5}$, odnosno 2,24 puta manji od ugiba grede koja leži na prostim osloncima.

GREDA SA VIŠE RASPONA. Treba razlikovati više slučajeva.

Opšti slučaj. Reč je o dugačkoj gredi koja ne leži samo na dva, već na više oslonaca. U proračunima se pretpostavlja da je linija oslonaca potpuno horizontalna prava i da takva ostaje i kada je greda opterećena. Prema tome, polazi se od toga da stubovi ne podležu uleganju (stena ili nestišljivo zemljište). Da bi se ustanovili uslovi ravnoteže, potrebno je odrediti transverzalne sile i momente savijanja. Rešenje je olakšano primenom uticajnih linija, koje u svakom preseku daju bilo moment savijanja, bilo transverzalnu silu, bilo ugibe od jedinične sile koja deluje u određenom preseku; zatim se primenjuje princip superpozicije dejstava u svim presecima, za različita opterećenja primenjena na određenim presecima. Ako se u mislima preseče greda na bilo kom mestu, transverzalna sila je sila koju treba primeniti tangentno na tom pravom preseku da bi se održala prethodna ravnoteža: to je tangentno dejstvo smicanja koje ispoljava deo grede u zamišljenom preseku. Oslonac stvara prekid u transverzalnim silama. Nasuprot tome, oslonci ne stvaraju prekid u funkciji momenta savijanja. Elemenat grede iznad oslonca deformiše se tako da utiče na susedne odsečke grede jednakim spregovima suprotnog znaka (moment savijanja).

Poseban slučaj grede na tri oslonca. U slučaju dve kruto spojene grede, jednake dužine i podjednako opterećene, problem neprekidne grede je identičan i ima ista rešenja kao i problem grede ukleštene na jednom kraju, koja se na drugom kraju oslanja na slobodni oslonac (slučaj ravnomerno raspoređenog opterećenja q). Zaista, zbog simetrije, kriva koja obrazuje srednje vlakno grede je vodoravna na stubu; sa svakim odsečkom se događa isto što i sa gredom ukleštenom na srednjem stubu, koja se oslanja na prosto ležište: na svakom ležištu normalni otpor je isti. Ali je na stubu otpor oslonca dva puta veći od otpora proračunatog za slučaj ukleštene grede, pošto ovaj stub nosi dve grede, dok u slučaju ukleštenog nosača nosi samo njega.

Ako je posredi ukleštenje, ovaj poslednji uravnotežava spreg M_0; ako je reč o neprekidnoj gredi sa dva raspona, drugi odsečak uravnotežava spreg; stub pruža samo vertikalni otpor i ne deformiše se.

Značaj sleganja oslonaca. Za sve grede sa više oslonaca eventualno sleganje je od izvanredne važnosti. U proračunima se pretpostavlja da greda leži na stubovima čiji su vrhovi ili oslonci na istoj horizontalnoj pravoj. Ali sleganje jednog stuba može potpuno da promeni uslove ravnoteže i da uveliko poveća napone koji dejstvuju u određenim presecima.

Greda sa zglobovima. Grede sa spojenim rasponima sve češće se zamenjuju gredama sa zglobovima, koje su poznate pod imenom Gerberovi nosači.

Obično se u takvom mostu središna greda (npr., u slučaju tri raspona, tri stuba i dva krajnja oslonca, (sl.37) proteže izvan svojih oslonaca, a ivične grede se vezuju za krajeve središne grede. Na vezama, koje su pravi zglobovi, ne postoji otpor savijanju, te je, zbog toga, moment savijanja ravan nuli; zato na zglobovima nastaje *prevoj*.

Kod drugog tipa grede sa zglobovima (tri raspona, dva stuba i dva krajnja oslonca), ivične grede se protežu u središni raspon (sl.38) i nose središnu gredu pomoću dva zgloba; i tu nastaje prevoj na nivou zglobova, što se svodi na slučaj grede sa dva prosta oslonca, opterećena na krajevima koji predstavljaju konzole. Eventualna sleganja nemaju više nikakav značaj.

Najzad, kod trećeg tipa (sl. 39) srednji raspon je postavljen na dva oslonca i obrazuje dve konzole.

IZVIJANJE DUGAČKIH GREDA KOJE SU OPTEREĆENE NA KRAJU. Problem je sledeći: uspravna greda, npr. stub, opterećena je simetrično postavljenim teretom, uz pretpostavku da nije toliki da bi je razorio.

Ali se može dogoditi druga nezgoda, znatno pre razaranja, ukoliko je greda tanka u odnosu na svoju visinu; može da se »izvije«, tj. da se deformiše u obliku sinusoide, koja, kad jednom nastane, može da se uveća prekomerno i da izazove razaranje stuba. Za to je dovoljna i mala ekscentričnost tereta na stubu čiji je presek suviše mali. Problem je rešio Ojler (Euler) za razne slučajeve (sl. 40).

Greda sa zglobovima na krajevima. Pretpostavlja se da se krajevi mogu okretati ne napuštajući istu vertikalu. Momenti savijanja su tu ravni nuli. Zbog toga su krajevi prevojne tačke za deformisanu gredu. Ojler je pokazao da će se greda sigurno izviti i slomiti, ako postoji sledeći odnos u vezi sa vertikalnim opterećenjem F:

$$F > \frac{\pi^2 EI}{l^2},$$

gde je l dužina grede, E-Jungov modul, a I-moment inercije preseka.

Kriva izvijanja je sinusoida. Ako se zadovolji ova nejednakost, ugib vrlo brzo raste, a ravnoteža se dostiže tek posle nesrazmerne deformacije sa razlikom

$$F - \frac{\pi^2 EI}{l^2}.$$

Propisi nalažu koeficijent sigurnosti ν, što znači da je maksimalna dozvoljena vrednost za F

$$F_{max} = \frac{\pi^2 EI}{\nu l^2}.$$

Greda ukleštena u osnovi i slobodna na drugom kraju. To je, npr., slučaj kolca ili stuba ukopanog u zemlji ili učvršćenog na krutom podnožju, čiji je drugi kraj slobodan. Ovde je Ojlerov uslov

$$F \leq \frac{\pi^2 EI}{4l^2}.$$

Greda ukleštena na oba kraja. Uslov za nastajanje izvijanja je ovde

$$F > \frac{4\pi^2 EI}{l^2}.$$

Greda ukleštena na dva kraja izvija se pri četiri puta većem opterećenju nego greda sa zglobovima na krajevima, a pri šesnaest puta većem opterećenju nego greda ukleštena na jednom kraju i sa zglobom na drugom.

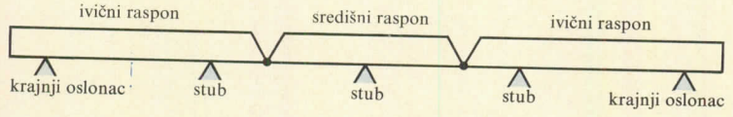
Ako F prekorači tu vrednost, nastaje izvijanje. Propisi nalažu da se i u ovom slučaju uvede koeficijent sigurnosti ν, pa se dobija:

$$F < \frac{\pi^2 EI}{\nu l^2}.$$

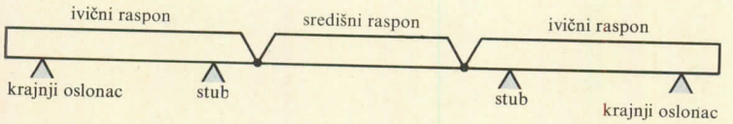
Preveo **Đorđe Lazarević**

Marius DURIEZ

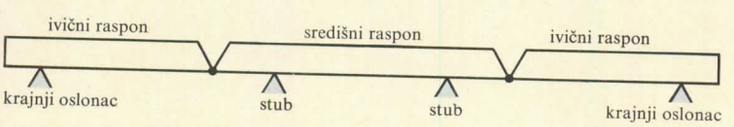
Sl. 37



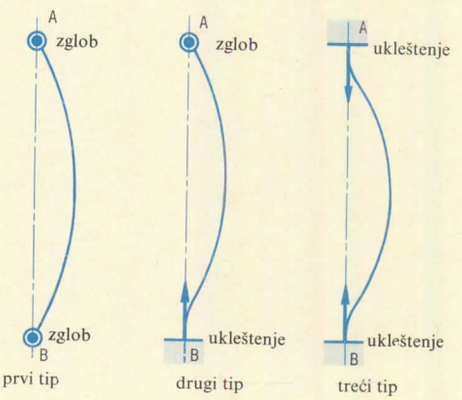
Sl. 38



Sl. 39



Sl. 40



METALURGIJA

Istorijat

KAMENO DOBA

Metali nisu bili prisutni u istoriji hiljadama godina. Čovek je prošao kroz paleolitsko i zatim kroz mezolitsko doba a da nije koristio niti čak poznavao neki od njih. Do 6000. god. pre n. e. on živi od lova i ubiranja plodova, zatim, od tog vremena, on počinje da se bavi stočarstvom i zemljoradnjom, što ga nagoni da živi manje nomadski. Neolitsko doba, koje zatim nastaje, obeleženo je pojavom naseobina koje je izgradila ljudska ruka. Oko 5000. pre n. e. oranje se obavlja oruđima od klesanog kamena. Narodi današnjeg Srednjeg istoka dobijaju tada bakar i zlato u elementarnom stanju. Oni uviđaju da se ta tela lako kuju i trude se da ih oblikuju kovanjem i brušenjem. Na taj način izrađuju oružje i oruđa, kao i nakit, čiji je oblik sličan obliku odgovarajućih predmeta od kamena i kosti. Oko 4500. god. pre naše ere nastaje pojava sirove grnčarije, a 500 godina kasnije javlja se i pečena. U grnčarskim pećima mogu se zagrevati komadi metala i ubrzo se uočava da topla obrada povećava mogućnosti oblikovanja i uklanja otvrdnjavanje, koje se javlja posle hladne obrade.

Trgovina se razvija u obliku primitivne razmene. Ona se zasniva uglavnom na oruđima, oružju i grnčariji. Metalni predmeti su u opticaju svugde, mada ih nema dovoljno. Uprkos takvom prometu, tek će se hiljadu godina kasnije zlato i srebro u čistom stanju koristiti u dolini Nila, a biće potrebno da se čeka dva, odnosno tri milenijuma da se koristi u Kini i zapadnoj Evropi. Ovi metali nikako ne istiskuju kamen i kost, koji će još dugo služiti. Ceo milenijum od početka njegovog korišćenja bakar ima sporedan značaj. Ovaj se period može nazvati bakarnim. On počinje između 5000. i 2000. pre n. e., već prema razmatranom području.

BAKARNO I BRONZANO DOBA

Oko 4300. pre n. e. na severoistoku Persije bakar se prvi put dobija iz minerala malahita ili hidratisanog karbonata bakra. To je, nesumnjivo, slučajno otkriće. Komad minerala se verovatno našao sa drvenim ugljem u grnčarskoj peći. Ali već pre toga u istim pećima je pretapan elementarni bakar. Tada se raspolaže značajnim izvorom metala, budući da je malahita bilo u izobilju u tim oblastima.

Prvi su zasnovali »bakarnu civilizaciju« Sumeri, koji se u IV milenijumu pre n. e. nastanjuju u Mesopotamiji i već 3500. pre n. e. zavode metaluršku industriju. Nastaju prvi gradovi, od kojih je najčuveniji Ur. Oko 2500. pre n. e. u njima ima puno zanatlija koji će ostaviti za sobom oruđa, oružje i predmete velike umetničke vrednosti. Ove zanatlije se bave topljenjem i kovanjem. Koriste se kalupima od ilovače i kamena. Ponekad su kalupi na rasklapanje, ali će se peščani kalupi pojaviti tek u srednjem veku.

Od 3500. pre n. e. pojavljuje se i olovo. Dobija se iz sulfida olova, galenita. Izdvajanje je olakšano zbog dosta niske temperature topljenja olova (327°C), ali ovaj metal ostaje malo iskorišćen jer je suviše mek. Ipak je otkrivena olovna kanalizacija za vodu u Uru iz kraja IV milenijuma.

Srebro je takođe poznato, ali najčešće je legirano sa zlatom u različitim proporcijama. Ove legure, na koje se nailazi u prirodi, nazivaju se *elektrum*.

God. 3000. pre naše ere počinje u Egiptu bakarno doba. Veština topljenja postojala je već u periodu pre dinastija (oko 3600. pre n. e.), kada su počeli da se razlikuju liveni predmeti od kamenih ili koštanih. Na početku III milenijuma pre naše ere izrađuju se kamene testere koje će omogućiti gradnju piramida. Oko 2500. pre n. e. koristi se proces livenja pomoću potrošnog voska, a oko 1700. pre n. e. već je poznato livenje šupljih predmeta. Razmena sve više dolazi do izražaja u Sredozemlju zahvaljujući Krićanima i Trojancima. Od 2500. pre n. e. u zapadnoj Evropi se izrađuju predmeti od bakra. Oblast današnje Almerije u Španiji postaje i izvoznik između 2400. i 2000. pre n. e. U listu proizvođača ubrajaju se, između ostalih, i područja Dunavske nizije (2200.), severne Italije (2000.) i Velike Britanije (1900. pre n. e.). Ali se bakarno doba, koje se u ovim zemljama proteže kroz deset do petnaest vekova, ne podudara sa pojavom urbane civilizacije.

Oko 3000. pre n. e. pojavljuju se legure bakra sa malim sadržajem kalaja. Ove prve bronze su svakako nastale zbog slučajnog prisustva rude kalaja u rudi bakra koju je trebalo preraditi. Ove legure se bolje liju od bakra i otpornije su. Narodi Mesopotamije, zatim Egipta i srednje Evrope izrađuju mešanjem ruda legure sve bogatije kalajem. Otkrivena je jedna sumerska ogrlica iz 2700. pre n. e. od čistog kalaja, ali se kalaj zaista javlja u značajnim količinama tek oko 1800. pre n. e.

Malo-pomalo bronza se izrađuje od bakra i rude kalaja pomešanih sa drvenim ugljem, a zatim, oko 1500. pre n. e. neposrednim stapanjem elementarnih sastavnih delova.

U Evropi ima više rude kalaja nego u Aziji i Africi, i to će izazvati porast razmene i seobu zanatlija.

Bronza malo-pomalo dobija prevagu nad bakrom, ali tek 1500. pre n. e. ona zauzima prvo mesto u Mesopotamiji, Egiptu, Kritu, Kipru i u Troji. God. 1450. pre n. e. dveri hrama u Tebi su izrađene od bronze, ali u grobu Tutankamona, koji je umro oko 1346. pre naše ere, zakopano je mnogo više predmeta od bakra nego od bronze. Ostale zemlje Sredozemlja, od Španije do Dunava, još žive u bakarnom dobu. Narodi sadašnje Francuske, Velike Britanije i Nemačke tek što su izišli iz neolitskog perioda, dok će Skandinavci stupiti u njega tek 1200. pre naše ere.

POČECI ŽELEZNOG DOBA

ŽELEZO. Arheolozi su u Egiptu otkrili ogrlicu od željeza koja potiče iz perioda pre dinastija, a u Uru jedan oblikovani predmet sa početka III milenijuma pre n. e. Ovi predmeti i neki drugi, u vrlo malom broju, jedinstveni su primeri koje je teško objasniti. Oni su od željeza koje je obradila ljudska ruka, a koje ne potiče od meteorita.

Oko 1400. pre naše ere Hetiti dobijaju željezo iz hematita, oksida željeza, ali brigu oko oblikovanja ovog novog metala prepuštaju Asircima i Sirijcima. Oko 1200. pre n. e. ruši se velika hetitska civilizacija, ali se metalurgija željeza širi po istočnom Sredozemlju. Godine 900. pre n. e. trideset tona željeza ugrađeno je u Solomonov hram u Jerusalimu. Egipat se snabdeva u Palestini i zadovoljava se preradom uvezenog metala. Željezo se dobija redukcijom oksida u čvrstom stanju. Potom se dobijeni čvrsti komadi spajaju ručnim kovanjem. Metal ima malo ugljenika, te je zbog toga dosta mek. Ali od 1200. pre n. e. narodi Srednjeg istoka nalaze da mu se tvrdoća može povećati ako se željezo zagreva u dodiru za drvenim ugljem, tj. kada mu se poveća sadržaj ugljenika. Ovo naugljenisavanje u čvrstom stanju vrlo je slabo i sporo i prodire samo u tanki površinski sloj. Pri svemu tome je dovoljno da bi se oko 900. pre n. e. otkrio fenomen kaljenja.

Uprkos ovom napretku, oruđa od željeza vrlo sporo nalaze primenu. Ipak, zahvaljajući jednoj veštini, pojavljuju se krupni komadi naugljenisanog željeza: tanki komadi se naugljenisavaju površinski i zatim se spajaju na vruće kovanjem. Oko 700. pre n. e. u Egiptu pod asirskom vladavinom željezo preuzima vodeće mesto od bronze.

Grci takođe dolaze do novog metala, koji osvaja istovremeno italijanska i iberijska ostrva (od 600. do 400. pre n. e.) i nešto docnije stiže do Kelta. Rimljani će takođe brzo priznati veliki značaj željeza, i proizvedeno oružje puni mnoga skladišta koja legije podižu u svim pokorenim zemljama. Oni otkrivaju povoljno dejstvo otpuštanja koje zakaljenom metalu uz delimično obnavljanje duktilnosti ostavlja dovoljnu čvrstinu. Ali je kontrola sadržaja ugljenika, temperature i vremena obrade loša, te je retkost da se obavi bez greške celokupna obrada, uključujući naugljenisavanje, kaljenje i otpuštanje, i takvo će stanje ostati više od jednog milenijuma. Tako se može objasniti legendarno ime nekih mačeva kao što su Durandal i Ekskalibur, koji svoju slavu isto toliko duguju uspešnoj metalurškoj obradi koliko i hrabrosti Rolanda i kralja Artura. Oblikovanje se takođe razvija. Izvlačenje se obavlja pravilno. U ruševinama Pompeje (79. pre n. e.) nađeno je već načinjeno od tri struka sa po petnaest žica.

Na istoku počev od 1000. pre n. e. željezo je dobro poznato u Indiji, ali u Kini ono po značaju dostiže bronzu tek 200. pre n. e. Poznati stub od željeza u Delhiju (310. pre n. e.), visok 7 m i težak 6 tona, svedoči svojom čistoćom (99,72%) o veštini i znanju indijskih metalurga.

Željezo prodire u Afriku vrlo sporo i neka zabačena plemena ga upotrebljavaju tek od 1850.

Neželezni metali. U ovo novo doba nazvano »železno« nastaje procvat i drugih metala.

Zlato se pretapa od 3000. pre n. e., Sumerci ga liju postupkom sa potrošnim voskom 2800. pre n. e., a počev od 2000. pre n. e. Egipćani ga uveliko koriste. Oni iskorišćavaju rudne žice zlatonosnog kvarca, koji drobe i ispiraju. Poznate su im peći sa mehovima koje pokreće ljudska noga, što potvrđuju slike na zidovima Tebe (1450. pre n. e.) Od 2000. pre n. e. predmeti se oblažu zlatnim folijama debljine mikrona. Oko 680. pre n. e. podanici Giga, kralja Lidije, otkrivaju bogatu aluvijalnu naslagu na reci Paktol. Krez, najslavniji potomak Giga, uveliko iskorišćava ovu naslagu, koja se iscrpljuje oko 500. pre n. e. Ali ovaj veliki izvor zlata omogućuje da se poveća količina novca. Taj novac olakšava trgovinu grčkih i feničanskih gradova.

Srebro su naveliko koristili Grci, koji, mada nemaju značajnih otkrića u metalurgiji, usavršavaju poznate postupke. Proizvodnja Laurionskih rudnika obezbeđuje sredstva za izgradnju flote koja će poraziti Persijance kod Salamine. Kult posvećen bogu kovačke veštine, Hefestu, kao i odgovarajućem rimskom bogu Vulkanu, potvrđuje važnost koju je metalurgija već bila stekla.

Rimljani, žudni moći i slave, stavljaju metalurgiju zlata i srebra u službu svojih ambicija. Oni znatno povećavaju proizvodnju ovih metala u nizu teritorija koje su pale pod njihovu vlast. Ponekad im je glavni cilj osvajanja da se dočepaju neprijateljevih rudnika; tako je uništenje Kartagine (146. pre n. e.) donelo Rimljanima u posed iberske rudnike.

Živa, koju prvi spominje Aristotel, omogućuje Rimljanima da odvajaju ili da prečišćavaju zlato amalgamiranjem.

Kalaj se koristi u izradi bronze, a legiran sa olovom već služi za lemljenje.

Olovo ima opštu primenu za vodovod. Dugački vodovodi koji snabdevaju Rim truju vodu i delimično su razlog neplodnosti, koja zahvata rimski narod u IV veku.

Rimljani takođe izrađuju mesing od bakra i karbonata cinka ili kalamine, ali ne odvajaju cink.

Takvo je bilo stanje metalurgije sedam metala u antičko doba, kada su Heruli 476. zbacili poslednjeg imperatora Zapadnog Rimskog Carstva i potopili Evropu u mračnjaštvo od više vekova.

OD RIMSKOG CARSTVA DO POČETKA MODERNIH VREMENA

VARVARI U SREDNJEM VEKU. Varvari su uništili moćnu ekonomsku organizaciju Rimljana, a nisu bili sposobni da je zamene nekom drugom. I metalurgija opada u VI i VII veku.

Železo se mestimično iskorišćava, jer potrebni uređaji nisu veliki, dok korišćenje neželeznih metala, koji zahtevaju znatno veća sredstva naglo opada. Metali koji se upotrebljavaju u ovoj epohi potiču uglavnom od prerade i pljačke.

Muhamed (570—632) daje Arabljanima čudesan podstrek. Nekoliko desetina godina docnije dinastija Abasida ostaje na vlasti ogromnog carstva punih pet vekova. Harun-al-Rašid, savremenik Karla Velikog, simbol je jedne sjajne civilizacije, koja uspešno neguje umetnost, književnost i nauku.

Arabljani ponovo sakupljaju dotadašnje svetsko znanje o metalima i naročito se trude da prevedu sva dela prethodnih civilizacija. Pošto je ova sinteza obavljena, ona je omogućila kritički osvrt na metode, a zatim veliki tehnički napredak, koji je, npr., zanatlijama Toleda doneo svetsku slavu. Orijentalna kultura tada osvaja zapadnu Evropu raznim putevima. Najpre preko Španije i Sicilije, gde zapadni narodi dolaze iznenada u dodir sa razvijenim osvajačem, zatim preko Varvara, koji opšte sa Vizantijom i Istokom, i najzad, nešto kasnije, preko krstaša, od 1096. do 1270.

Tako nastaje renesansa metalurgije u zapadnoj i srednjoj Evropi. Ponovo se liju veliki odlivci od bronze, kao što su vrata katedrale u Eks-la-Šapelu (820.). Nešto docnije livena bronza zamenjuje železne ploče pri izradi zvona, dok železo na drugi način ponovo nalazi svoju primenu iz rimske epohe. Tehnika odvajanja i oblikovanja ostaje nepromenjenja. Kaljenje i otpuštanje ostaju kao vrlo nesigurni postupci. Metalurgija je u vlasti države ili crkve.

U XII veku Evropa je primila od Arabljana niz znanja. Osnivanje univerziteta u Parizu (1160) i u Oksfordu (1163), nešto pre pada Kordove (1236), predstavlja simbol intelektualnog i naučnog osamostaljenja, koje se zatim odvija veoma brzo.

SREDNJI VEK METALURGIJE. U drugom milenijumu naše ere metalurgija se sporo razvija, i kroz više vekova nema značajnijih događaja. Još uvek je poznato samo sedam antičkih metala. Od Španije do Švedske nivo znanja je prilično ujednačen.

Sa pojavom štamparija nastaje nagli razvoj legura olova. One služe za izradu slova i brzo zamenjuju drvo koje se u tu svrhu koristilo u početku.

Kalaisanje železa potapanjem u kalaj javlja se 1270. Velikodostojnici su više vekova držali monopol ove proizvodnje.

U XI veku potražnja za železom brzo raste. Proizvodnja oružja apsorbuje veliku količinu metala. U katalonskim pećima mogu se izrađivati veliki predmeti. Za pogon mehova koristi se energija rečne vode. Drveni zupčanici javljaju se u XIII veku, i 1249. nailazi se u Francuskoj na prvi mehanički čekić za kovanje. Metalurška industrija se zato smešta pored tekućih voda i, po mogućstvu, u blizini ruda i šuma. Nove mogućnosti duvanja dovode do povećanja zapremine peći do granice koju nameće neotpornost drvenog uglja na drobljenje. Ova granica pomera se tek u XVIII veku primenom koksa. Ipak, velike peći omogućuju izvesno naugljenisanje železa i maksimalna temperatura raste dok se ne dostigne temperatura topljenja železa, koja je dosta niska zbog ulaska ugljenika u čvrsti rastvor. Tako je 1311. prvi put dobijeno gvožđe u Nemačkoj. Tačno je da su Kinezi već 502. izlili jedan kip od gvožđa. To gvožđe, bogato fosforom, imalo je tačku topljenja od 1000°C.

Izrada i livenje gvožđa raširili su se po celoj Evropi u XV veku i uspelo je gvožđe prečistiti duvanjem vazduha po površini rastopljenog kupatila. Livenje u pesku se javlja oko 1400. Sto godina kasnije ukupna proizvodnja gvožđa dostiže 60000 tona godišnje.

ALHEMIJA. Od početka civilizacije čovek je uveliko razmišljao o sastavu materije. Demokrit u V veku pre n. e. ima genijalnu intuiciju o atomističkoj strukturi materije, ali Platon, a naročito Aristotel (oko 350 pre n. e.) nameću svoja gledišta, prema kojima se materija sastoji od četiri elemenata koji su suština vode, zemlje, vazduha, vatre, koji su združeni na različite načine i izmenjeni pomoću četiri više ili manje izražena kvaliteta: toplo, hladno, vlažno, suvo.

Najveća posledica ove doktrine od početka naše ere je pojava nečeg što bi se moglo nazvati »alhemija«. Bitni cilj alhemije, ako ne i jedini, postaje transmutacija metala, koja se sastoji jednostavno u tome da se izmeni kombinacija elemenata i raspodela kvaliteta. Tako se, npr., prema aleksandrijskim fizičarima, transmutacija metala može potpuno poreditи sa bojenjem tkanina.

Analogno Kinezima, koji su tražili »eliksir« sposoban da pospeši transmutaciju i da produži život, zapadnjaci, poučeni od Arabljana, smatraju da postoji supstancija koja je u stanju da doprinese uspehu neke radnje. Ova supstancija je kamen mudrosti. Ona odgovara prvobitnoj predstavi o katalizi.

Aristotelova doktrina, lišena eksperimentalne podloge i nešto izmenjena tokom vekova, vladaće više od dve hiljade godina.

NOVI SVET. Trgovina cveta na Sredozemlju. Đenova i Venecija vrše raspodelu robe koja stiže sa istoka. S druge strane, zlato odlazi iz zapadne Evrope.

Siti trgovačke zavisnosti od Sredozemlja, Portugalci traže nov put, i Vasko De Gama obilazi Afriku (1497). Španci traže put preko zapada, i Hristofor Kolombo (1492) pristaje na obale Novog sveta. On i konkvistadori nalaze tamo civilizacije koje, mada su u izvesnom pogledu velike, ipak žive u bakarno doba. Inke tope bakar manje od jednog veka. Asteci se zadovoljavaju da oblikuju zlato, bakar i srebro koje nalaze u prirodi. Za manje od jednog veka Španci, prenoseći velike količine zlata i srebra u Evropu, povećavaju za 50% količinu skupocenog metala u opticaju u Starom svetu. Evropa je žrtva inflacije. Španija, navikla na lak život, napušta svoju ekonomiju, a naročito zapostavlja svoje rudnike, tako da na kraju XVI veka gubi prvo mesto u Evropi u političkom i metalurškom pogledu.

MODERNA METALURGIJA

POLET PROIZVODNJE ŽELEZA. U XVI veku Paracelzus i naročito Agrikola u svom delu *De re metallica* (1530) vrše sintezu metalurških znanja svojih savremenika i njihova dela predstavljaju autoritet do sredine XVIII veka.

U ovom periodu zabeležen je znatan napredak. Proizvodi od gvožđa nalaze sve veću primenu. Godine 1664. dovođenje vode do Versaja obezbeđeno je cevovodima od gvožđa velikog preseka. Ali veličina visokih peći još je ograničena usled slabe otpornosti drvenog uglja. U Velikoj Britaniji oseća se nestašica drveta i razmišlja se kako da se taj nedostatak otkloni. I kad se počelo misliti na ogromne šumske rezerve Severne Amerike, Derbi (Darby) 1735. otkriva koksovanje kamenog uglja. Koks, ugalj koji je oslobođen svojih isparljivih sastojaka, postaje pogodan za proizvodnju gvožđa jer pri tom zadržava veliku čvrstoću. On, dakle, omogućava da se izgrade visoke peći velikog kapaciteta. Ovaj postupak osvaja celu Englesku (1750), zatim Francusku (1780) i docnije Rur (1850). Proizvodnja raste ravnomerno. God. 1779. prvi železni most, u rasponu od 30 m, opkoračuje reku Severn.

Veliko otkriće koksovanja pada u isto vreme sa napretkom u drugim područjima obrade metala. God. 1730. Englez Hantsmen (Huntsman) stapa na 1500°C šipke cementiranog železa, a Kort (Cort) proizvodi 1784. velike komade prečišćenog železa u plamenoj peći. U isto vreme Vat, sledeći Papena, stavlja metalurzima na raspolaganje parnu mašinu. Tada industrija železa napušta šume i rečne tokove da bi se smestila bliže uglju i vodenim putevima. Sredinom XIX veka potražnja znatno raste zahvaljujući brodskim konstrukcijama i železnici. God. 1856. Besemer pronalazi postupak konvertovanja duvanjem vazduha kroz gvožđe u rastopljenom stanju. Simens i Martin zatim ostvaruju prečišćavanje sirovog gvožđa i rekuperaciju otpadaka železa u topilišnoj peći.

Ali ovi postupci se ne primenjuju za gvožđe koje potiče od ruda sa dosta fosfora. Na sreću, Tomas (Thomas) i Džilkrist (Gilchrist) 1876. koriste bazno oblaganje peći i na taj način omogućuju napredak više oblasti, posebno Lorena. Od tada se prvenstveno povećavaju dimenzije tvornica i sledstveno obim proizvodnje. Oko 1965. ona je reda veličine 100 miliona tona godišnje u SAD, 80 u SSSR, 30 u Nemačkoj, 23 u Velikoj Britaniji, 18 u Francuskoj.

Pred kraj poslednjeg veka bitni napredak u proizvodnji železa počiva, svakako, na pojavi industrijskih elektropeći, u kojima je moguća izrada pod odličnim uslovima višekomponentnih legura, čije su karakteristike sve bolje podešene za uslove primene. Zahvaljujući korišćenju čistog kiseonika i zatim industrijskoj upotrebi vakuuma, sada proizvođači snabdevaju korisnike sirovinom visokog kvaliteta.

Najzad, teži se korišćenju što bogatijih ruda, koje se najčešće uvoze iz nerazvijenih zemalja. Zbog toga izgleda da se nova preduzeća za proizvodnju železa moraju sada graditi u blizini uvoznih luka.

MODERNA FIZIKA I METALURGIJA. Krenuvši posle Aristotela u bespuće, fizika je stagnirala dva milenijuma. Ali kritički duh XVII, a naročito XVIII veka, oslanjajući se na sve kvantitativniji ogled, poljulja važeće teorije. Godine 1784. Lavoazje (Lavoisier) objavljuje zakon o održanju materije. Ovaj zakon, a zatim zakoni Daltona i Prusta (Proust) otvaraju put modernoj fizici. Tada bivaju otkriveni mnogobrojni metali. Zaista, osim sedam antičkih metala do tada su otkriveni još samo arsen, antimon i bizmut, zatim cink i platina (1735). Neki drugi su bili izdvojeni u vrlo malim količinama (kobalt, nikl, mangan, volfram) ili je ustanovljeno njihovo postojanje, ali nisu bili izdvojeni (titan, berilijum, brom).

Dva su glavna razloga za višestruka otkrića koja slede: naime, elektroliza, koja omogućava Dejviju (Davy) 1807. da izdvoji natrijum i kalijum, kao i pojava drugih redukcionih materija osim ugljenika, kao što je vodonik, koji je izdvojio Kavendiš (Cavendish), i upravo natrijum i kalijum. Veler (Wöhler) izdvaja 1827. aluminijum. Sent Kler Devil (Sainte-Claire Deville), koga novčano pomaže Napoleon, uvodi 1854. industrijsku proizvodnju ovog metala. Herul (Héroult) 1886. izdvaja aluminijum elektrolizom jedne rastopljene soli. Ovaj postupak daje aluminijumu veliki podstrek, koji nalazi svoju primenu u mnogim područjima, posebno u aeronautici.

Godine 1869. Mendeljejev uvodi periodni sistem elemenata. Pokazuje se da je ova tablica vrlo plodo-

tvorna. Ona dopušta da se predvide novi elementi, koji ubrzo zatim bivaju otkriveni, i da se shvati njihova struktura. Spektroskopija od 1860. olakšava mnoga otkrića.

God. 1896. Bekerel (Becquerel) otkriva radioaktivnost uranijuma i torijuma. Pjer i Marija Kiri (Curie) izdvajaju 1898. polonijum, zatim radijum. Specijalna teorija relativiteta (Ajnštajn, 1905) a potom talasna mehanika De Broljija (de Broglie) 1924. omogućavaju da se razume struktura materije.

Pronalazak veštačke radioaktivnosti (Frederik i Irena Žolio-Kiri, 1934), zatim stvaranje veštačkih metala, kao prvi među njima tehnecijum, od manjeg je uticaja do drugog svetskog rata, koji izaziva veliko ubrzanje istraživanja. Sjedinjene Države vrše izdvajanje prvih transuranskih elemenata, posebno plutonijuma (1940), koji će biti sirovina za prvu atomsku bombu (1945).

Posle drugog svetskog rata nuklearna industrija izaziva veliki napredak metalurgije. Ona, u stvari, zahteva sve čistije metale i nove legure posebnih osobina. Osim toga, radioelementi, koji nalaze vrlo široko polje primene, postaju malo-pomalo proizvodi industrijskog obima.

Najzad odskora, prostorna industrija, preko originalnih problema koje postavlja metalurgiji, proširuje područje korišćenja metala, izaziva stvaranje novih legura i doprinosi napretku podstičući istraživanje.

NAUKA O METALIMA. Metodi vađenja i pripreme ruda praktično se nisu izmenili još od Agrikole, i čak od antičkog doba. Mehanizacija je jednostavno rasteretila čoveka i povećala proizvodnju. Međutim, može se navesti jedan novi postupak: to je flotacija.

Nasuprot tome, proizvodnja metala je mnogo napredovala za 150 godina zahvaljujući elektrolizi i redukciji pomoću materija moćnijih od ugljenika, kao i novim metodima prečišćavanja. Pri svemu tome bitna činjenica je pojava legura počev od 1890. Njihov razvoj je omogućen poznavanjem mikrografske strukture. Sorbi (Sorby) u Velikoj Britaniji i Osman (Osmand) u Francuskoj stvaraju metalografiju, koju je Reomir (Réaumur) 1722. bio zacrtao. Čelici na bazi nikla i hroma služe od 1890. za izradu velikih predmeta koji se mogu duboko kaliti. Brzina mehaničke obrade se brzo povećava 1900, zahvaljujući čelicima »rapidi« na bazi volframa i hroma. 1907. uvodi se prihvatljivi dijagram železo-ugljenik, a 1910. biva vrlo dobro objašnjena struktura austenitnog nerđajućeg čelika, koja je tek otkrivena. 1906. se utvrđuje strukturno otvrdnjavanje izvesnih legura aluminijuma, i izrađuje se duraluminijum, koji poseduje ovu osobinu.

Uz stvaranje ovih legura, koje su potrebne za mašinogradnju, ljudi se bave prečišćavanjem metala najpre za elektrogradnju (bakar), za elektroniku (silicijum, germanijum) i najzad za nuklearnu industriju.

X-zraci, koje je otkrio Rentgen (Röntgen) 1895, omogućuju da se odredi kristalografska struktura metala i legura. Poznajući ove metalografske i kristalografske strukture, mogu se unaprediti teorije koje pokušavaju da objasne različite osobine metala. Jedna od najplodnijih je teorija dislokacija.

Eksperimentatori imaju na raspolaganju sve moćnija sredstva za istraživanje, kao elektronski mikroskop i mikrosondu. Tako oni sakupljaju vanredne rezultate, za koje teoretičari pokazuju sve veće interesovanje.

Na taj način je metalurgija, koja je dugo bila tehnika, danas postala nauka koja je čvrsto vezana za skup fizičkih nauka.

OSOBINE METALA I LEGURA

Opšti pojmovi o metalnom stanju i strukturi metala

UVOD. Metali i legure pripadaju grupi čvrstih kristalnih tela. Ako se atomi, koji sačinjavaju ta tela, izjednače sa malim loptama, onda se može reći, figurativno, da se ove lopte nalaze na čvorovima trodimenzionalne pravilne rešetke koja zavisi od prirode metala. Natrijum-hlorid je jednostavan primer takve rešetke. Atomi hlora i natrijuma, od kojih se ona sastoji, zauzimaju rogljeve kocki koje obrazuju tu kristalnu rešetku.

Među kristalnim telima metal se odlikuje prirodom međuatomskih sila, koje obezbeđuju koheziju i krutost rešetke.

U natrijum-hloridu atom natrijuma koji je elektropozitivan poseduje jedan valentni elektron, koji treba samo da ustupi susednom elektronegativnom atomu hlora da bi ovaj popunio spoljnu ljusku valentnih elektrona (*sl.* 1); kristal natrijum- hlorida sastoji se, dakle, od skupine pozitivnih jona natrijuma i negativnih jona hlora, u kojoj su veze obezbeđene, u stvari, privlačnim i odbojnim elekrostatičkim silama, i u kojoj valentni elektroni nisu slobodni da se pomeraju pod dejstvom električnog polja. Dakle, takav jedan »jonski« kristal je slab provodnik elektriciteta.

Nasuprot tome, u jednom metalnom kristalu atomi koji zauzimaju čvorove kristalne rešetke nemaju valentne elektrone vezane za poseban jon, nego su svi zajednički. Skup valentnih elektrona svih atoma obrazuje elektronski oblak koji obezbeđuje koheziju tog kristala; elektrostatičke sile odbijanja među pozitivnim jonima, nastalim zbog gubitka valentnih elektrona, uravnotežene su privlačenjem koje u ovim jonima izaziva elektronski oblak, koji u izvesnom smislu ima ulogu lepka. Pošto valentni elektroni nisu vezani za posebne jone, oni se mogu kretati pod dejstvom električnog polja. To se prevodi tako što se kaže da su metali dobri provodnici elektriciteta. Ova osobina, zajedno sa »metalnim sjajem«, privlačna je za shematsku definiciju metalnog stanja; trebalo bi, radi tačnijeg izražavanja, dodati da električna provodljivost metala opada sa porastom temperature, za razliku od drugih nemetalnih tela, koja poseduju prve dve osobine, ali im provodljivost raste sa temperaturom.

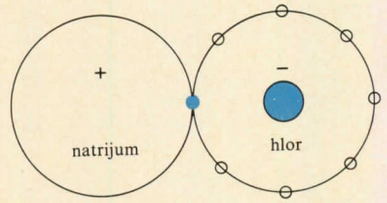
GLAVNI KRISTALNI SISTEMI. Tri glavna kristalna sistema koji se sreću kod metala su: prostorno centrirana kubna rešetka (*sl.* 2a), površinski centrirana kubna rešetka (*sl.* 2b) i gusto složeni heksagonalni sistem (*sl.* 2c).

Najvažniji uobičajeni metali imaju sledeće strukture:

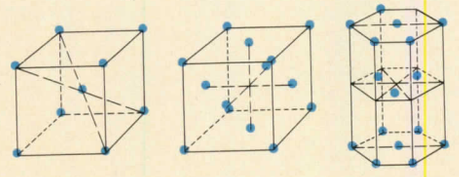
hrom, železo, molibden, volfram	prostorno centrirani kub
srebro, zlato, aluminijum, bakar, nikl, olovo	površinski centrirani kub .....
cink, magnezijum	gusto složeni heksagon

METAL I ČVRSTI RASTVORI. Ako se u kristalu čistog metala neki atomi zamene atomima drugog elementa, dobija se čvrsti rastvor tog elementa u osnovnom metalu. Ovaj »supstitucijski čvrsti rastvor« može na datoj temperaturi da postoji samo u granicama koncentracije koje su sasvim određene i koje zavise od oba sačinitelja.

Ako se nastavi sa zamenom atoma osnovnog metala stranim atomima, može nastati trenutak kada se, usled suviše poremećene ravnoteže sila veza, pojavljuju novi kristali, koji su bogatiji dodatnim elementima i imaju različitu kristalnu rešetku; ova faza postoji zajedno sa prvobitnim rastvorom, koji je zasićen dodatnim elementima i apsorbuje »višak« ovih elemenata. Klasičan primer je mesing za duboko izvlačenje, koji je čvrsti rastvor cinka u bakru; ako se nastavi dodavanje cinka, iznad koncentracije od 33 % ovog elementa nastaje nova faza različite kristalne strukture u unutrašnjosti matrice sa 33 %, koja sadrži 50 % cinka. Udeo faze sa 50 % raste, ali sastav početnog čvrstog rastvora ostaje nepromenjen sa 33 % cinka (*sl.* 3).



Sl. 1



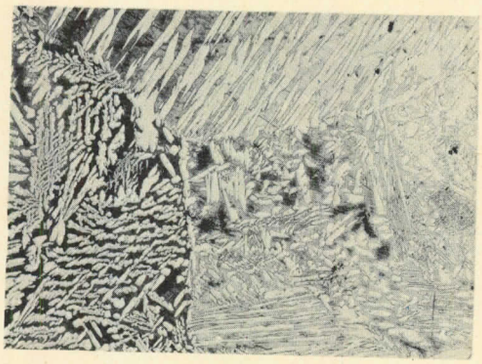
Sl. 2a *2b* *2c*

U nekim metalima se isto tako može dogoditi da strani atomi male dimenzije uđu između atoma osnove, izazivajući samo distorziju rešetke. To su intersticijalni čvrsti rastvori. Kao i kod prethodnih, ako se doda dovoljno drugog elementa, može se pojaviti nova faza. Dobro poznat primer intersticijalnog rastvora je meki čelik, koji je rastvor ugljenika u železu. Ako se sadržaj ugljenika poveća, pojavljuje se nova faza, cementit, koji se sreće kod tvrđih čelika.

ALOTROPSKE TRANSFORMACIJE. Kao mnoga čvrsta tela, neki metali imaju više alotropskih vrsta, od kojih svaka ima posebnu kristalnu strukturu. Jedna od njih je postojana na sobnoj temperaturi; druge se javljaju pri porastu ili snižavanju temperature (ili pritiska). Kada se menja temperatura, menjaju se i sile veza i može nastati trenutak kada početni kristalni sistem nije više postojan, te ga zamenjuje neki drugi. Prelaz od jedne alotropske vrste u drugu događa se na određenoj temperaturi, nazvanoj »temperatura transformacije«, uz oslobađanje ili apsorpciju toplote. Temperatura u metalu može da se menja tek pošto je postignuta potpuna transformacija.

Topljenje je poseban slučaj takve transformacije. To je kao kad se topi led, temperatura ostaje na 0°C dokle god ima leda u dodiru sa vodom. Ova transformacija se događa uz apsorpciju toplote (latentna toplota topljenja).

Železo, prostorno centrirani kub na sobnoj temperaturi, površinski centrirani kub između 910 i 1400°C, ponovo prostorno centrirani kub iznad 1400°C do temperature topljenja, karakterističan je primer polimorfnih tela.



Sl. 3. Legura bakar-cink (42%), u kojoj se vide dve različite faze (tamna i svetla). *Fot. X.*

Čvrsti rastvori mogu takođe da podležu alotropskim transformacijama u složenijim uslovima.

MONOKRISTAL I POLIKRISTAL. Uzorak metala ili legura obično se nalazi u obliku skupine većih ili manjih »zrna« (zavisno od slučaja, od nekoliko mikrona do nekoliko centimetara). Ova zrna potiču od rasta čvrste faze iz klica koje su prisutne u tečnoj fazi u trenutku očvršćavanja. Svaka klica rađa mali kristal koji lebdi u tečnoj fazi i, kada ona nestane, svi kristali se nalaze u međusobnom dodiru (*sl.* 3). Ova zrna se takođe mogu obrazovati u čvrstom stanju u toku alotropske transformacije. Svaki od tih malih kristala ima posebnu kristalnu orijentaciju, koja se menja od zrna do zrna. Uzorak se naziva polikristalom. Pod određenim uslovima obrade može se podstaći pojava i rast jednog jedinog zrna. Uzorak je, dakle, jedinstven kristal, ili monokristal, i takav kristal u opštem slučaju nema određeni geometrijski oblik kao kristal minerala (kvarc).

Osobine koje ne zavise od stanja savršenosti kristalne rešetke

Neke osobine kristalnog tela mogu se približno proceniti pod pretpostavkom da je ono nastalo pravilnim geometrijskim slaganjem atoma. Obratno, druge osobine pokazuju prema proračunu ogromna odstupanja koja potiču od izvesnih nepravilnosti ili nesavršenosti kristalne strukture. Prve osobine, »neosetljive prema stepenu savršenosti strukture«, mogu se podeliti u dve grupe.

»ZAPREMINSKE« OSOBINE

To su osobine koje ne zavise od kristalne orijentacije. Dakle, potrebni uzorci za njihovo merenje mogu, isto tako, da budu polikristali kao i monokristali, a u poslednjem slučaju nekorisno je određivati orijentaciju epruvete.

GUSTINA. Može se izračunati gustina jednog metala ako su poznati geometrija njegovog kristalnog sistema, broj atoma po osnovnoj ćeliji rešetke i masa atoma. Isto važi i za čvrste rastvore u kojima se dimenzije osnovne ćelije menjaju linearno sa koncentracijom legirajućeg dodatka. Nađene vrednosti su obično u dobroj saglasnosti sa iskustvom.

PROMENA ZAPREMINE PRI TOPLJENJU. Ova osobina, koja pokazuje razliku između gustine u čvrstom stanju i gustine u rastopljenom stanju, ima veliki praktični značaj u topioništvu, kao što pokazuju primeri u priloženoj tablici.

Element	Porast zapremine (u procentima)
Bakar	4,15
Zlato	5,1
Aluminijum	6
Olovo	3,5
Germanijum	—12

USMERENE OSOBINE

U monokristalu neke osobine se menjaju zavisno od kristalne orijentacije, ponekad u velikom razmeru. Kaže se da monokristal ispoljava pojavu *anizotropije*. Zbog toga se pri davanju vrednosti takve veličine mora neophodno naznačiti prema kom kristalografskom pravcu je bilo obavljeno merenje ili izveden proračun.

MODUL ELASTIČNOSTI. Na jednu metalnu epruvetu može se do izvesnih granica primeniti napon koji će izazvati reverzibilnu elastičnu deformaciju (epruveta dobija prvobitne dimenzije kada se obustavi naprezanje), koja je srazmerna tom opterećenju. Konstanta proporcionalnosti ili modul elastičnosti predstavlja uticaj sila veze između atoma od kojih je sastavljen metal. Merena na jednom kristalu, shodno kristalnoj orijentaciji, ona može znatno da odstupa od srednje vrednosti koja predstavlja modul elastičnosti statistički izotropnog kristalnog agregata.

Metal	Modul elastičnosti (u kg/mm²)		
	maksimum	minimum	polikristal
Aluminijum	7730	6400	7030
Bakar	19100	6800	11300
Železo	28900	13500	21900
Cink	12650	3500	10200

KOEFICIJENT DILATACIJE. Kada se jedan metal zagreva, kaže se da se on obično širi. Ovo širenje je rezultat promene sila veze među atomima sa temperaturom. U metalima sa kristalnim sistemom prostorno centriranog kuba (ili površinski centriranog), koeficijent dilatacije ne zavisi od kristalne orijentacije, dok se u drugim sistemima on može ogromno menjati i čak dobijati negativne vrednosti; tako za cinkom može da ide od 14.10^{-6} do 64.10^{-6} a za uranijum od $-9{,}3.10^{-6}$ do $36{,}7.10^{-6}$. Dakle, kristal urana se skuplja u jednom pravcu, dok se širi u drugim.

MAGNETNE OSOBINE. U feromagnetnim materijalima namagnetisanje je veće u određenim pravcima, koji se nazivaju *pravci lakog namagnetisanja.*

ANIZOTROPIJA U POLIKRISTALNOM AGREGATU. Uopšte uzev, poznavanje anizotropije ima u praksi veliki značaj, pošto se tu najviše koriste metali u polikristalnom obliku: ono dopušta da se objasne i suzbijaju izvesni defekti za koje je ona odgovorna, naročito kada zrna u metalu nemaju haotičnu orijentaciju, već suprotno, usled izvesnih operacija oblikovanja (valjanje) imaju povlašćenu kristalografsku orijentaciju ili »teksturu« koja polikristalu daje jedan karakter blizak monokristalu.

Nasuprot tome, anizotropija može da se u nekim drugim slučajevima iskoristi ako se obrazuje pogodna tekstura, koja »pojačava« neku datu osobinu u željenom pravcu. Na primer, u jednom magnetnom kolu podešava se da pravac lakog namagnetisanja zrna bude u pogodnom pravcu (transformatorski limovi od legure gvožđe-silicijum).

Najzad, njeno merenje može da bude sredstvo za otkrivanje prisustva teksture u metalu. Zbog toga se modul elastičnosti meri u raznim pravcima i na različitim mestima jednog komada.

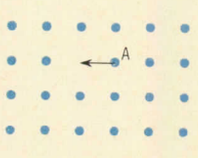
Defekti u kristalima

Raspored atoma u jednom kristalu metala nije, u stvari, tako savršen i pravilan kao pri geometrijskom slaganju, o kome smo prethodno govorili. Kristali kriju u sebi mnogobrojne i različite defekte.

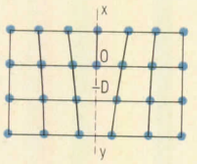
TAČKASTI DEFEKTI. Može se dogoditi da neki čvorovi kristalne rešetke ne budu zaposednuti atomom. Ova odsutnost sa mesta na kome bi on teorijski trebalo da se nalazi stvara šupljinu ili »vakanciju«, koja je samo delimično kompenzovana distorzijom rešetke u njenoj okolini. U metalu u ravnotežnom stanju uvek postoji određen broj šupljina koje nije moguće ukloniti. Ove šupljine se mogu pomerati u metalu: atom A (*sl.* 4a), gibajući se oko svog srednjeg ravnotežnog položaja pod dejstvom termičkog kretanja, može primiti dovoljnu energiju da bi se pomerio i zauzeo susednu šupljinu. Kao rezultat toga, šupljina se pomerila u suprotnom smeru od atoma A.

Više šupljina se mogu sjediniti i obrazovati jednu veću šupljinu.

LINEARNI DEFEKTI. Posmatrajmo jednu savršenu prostu kubnu kristalnu rešetku (*sl.* 4b). Pretpostavimo da su uklonjeni svi atomi u ravni XY koji se nalaze ispod O; na taj način se u blizini O obrazuje linearni defekat D, upravan na ravan slike, koji se naziva »dislokacija«, oko koje je rešetka deformisana. Takva dislokacija može se pomerati.



Sl. 4a



Sl. 4b

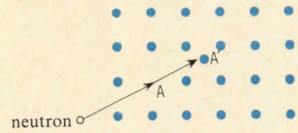
Poreklo ovakvih defekata nije sasvim poznato; samo se može reći da ih i najsavršeniji kristal u ravnotežnom stanju sadrži mnogo. Ove dislokacije bile su direktno uočene različitim postupcima; naročito se mogu videti transmisionom elektronskom mikroskopijom, radeći sa vanredno tankim metalnim folijama dobijenim elektrolitičkim rastvaranjem.

GREŠKE U OBLIKU POVRŠINE. Kada na kraju očvršćavanja ili posle transformacije u čvrstom stanju kristali treba da se sjedine, oni ostaju odvojeni jedni od drugih granicama, na čijim se površinama kristalna rešetka različitih zrna ne slaže. Zona u neposrednoj blizini spoja, i sa jedne i sa druge strane, očigledno je jako poremećena, pošto je periodičnost sila atomskih veza na tom mestu grubo narušena. Ove greške mogu i da se kreću.

Sve ove greške, koje postoje već od stadijuma izrade, mogu se umnožavati i razvijati pod dejstvom mehaničkih naprezanja.

STVARANJE DEFEKTA USLED OZRAČIVANJA. Neki od njih, posebno šupljine, mogu se stvoriti ozračivanjem metala u čvrstom stanju. Jedan neutron, nailazeći, na primer, na atom u položaju A

(*sl.* 5) može ga izbaciti sa tog mesta i postaviti u intersticijalni položaj A′. Sudar neutrona proizveo je na taj način dvostruki defekat: jednu šupljinu i jedan intersticijalni atom, čije prisustvo isto tako narušava rešetku u njegovoj okolini. Lako je shvatljivo da telo koje je bilo izloženo intenzivnom i dugotrajnom bombardovanju neutronima jako menja svoje osobine. Ovaj fenomen je dobro poznat tehničarima atomskih reaktora, u kojima izvesni strukturni materijali na taj način gube delimično svoje osobine (Vignerov [Wigner] efekat).



Sl. 5

Osobine koje zavise od stanja savršenosti strukture

PLASTIČNE DEFORMACIJE. Kada se vrši proba zatezanja jedne metalne šipke, može se uočiti da se deformacija događa na dva načina. To se vidi na krivi, koja se snima u toku zatezanja i koja prikazuje promenu sile F primenjene na epruvetu zavisno od izduženja Δl (sila se daje u odnosu na presek epruvete, A, a izduženje u odnosu na njenu dužinu, l) (*sl.* 6).

U prvo vreme, od O do E, kriva je prava linija i dok god se ne prekorači napon σ_E, nazvan *granicom elastičnosti*, deformacija je reverzibilna ili elastična; metal se vraća na prvobitne dimenzije kada se opterećenje obustavi. Kada se pređe granica elastičnosti, epruveta trpi ireverzibilnu plastičnu deformaciju, tj. kada se obustavi opterećenje na istezanje pošto je bila dostignuta tačka A, ona sačuva trajno izduženje O_x. Ovaj stadijum se proteže sve do kidanja epruvete pri naponu na kidanje σ_k. Izduženje u procentima posle kidanja, uz granicu elastičnosti i napona na kidanje, vrlo je važna karakteristika za izradu metalnih predmeta.

ODNOS PLASTIČNE DEFORMACIJE I KRISTALNE STRUKTURE. Ako se jedna epruveta podvrgne dobrom poliranju i zatim pogodnom hemijskom nagrizanju, moguće je da se otkriju metalna zrna (*sl.* 3), koja se, već prema svojoj veličini, mogu videti golim okom ili pod mikroskopom. Ako se ista epruveta zatim podvrgne plastičnoj deformaciji, na njoj će se uočiti u svakom zrnu familije paralelnih pruga koje se nazivaju »linije klizanja«. One se zaustavljaju na granicama zrna, a njihova orijentacija je u svakom zrnu različita. Ovaj jednostavni eksperimenat nagoni jasno na zaključak da postoji veza između ovih linija i kristalne strukture svakog od malih kristala koji predstavljaju zrna.

Ovaj zaključak je potvrđen eksperimentalno; uzmimo primer kristala proste kubne strukture, čija je osnova pričvršćena i on podvrgnut sve većem opterećenju F. On počinje da se deformiše elastično, prelazeći iz oblika ABCD u oblik ABC′D′ (*sl.* 7a).

Kada opterećenje pređe izvesnu vrednost, tačno određenu i karakterističnu za taj metal, gornji deo kristala naglo klizne za jedno ili više atomskih rastojanja po jednoj kristalnoj ravni $\alpha\beta$ (*sl.* 7b), ostavljajući za sobom stepenice na slobodnim površinama kristala. Upravo te stepenice pojavljuju se pod mikroskopom u obliku pruga ili kliznih linija. Familije kristalnih ravni po kojima se događa klizanje u toku plastične deformacije ne mogu biti bilo koje. To su familije ravni sa maksimalnom gustinom atoma.

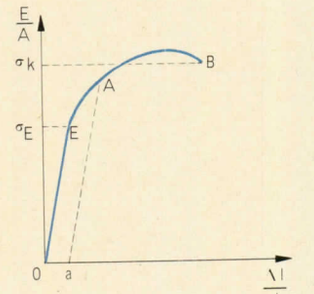
U kubnoj rešetki iz sl. 7a takve atomske ravni kao XY nisu klizne, pošto broj atoma po jedinici površine nije maksimalan. U ravni, pak, maksimalne atomske gustine klizanje se može događati samo u pravcu maksimalne atomske gustine.

Svaki kristalni sistem ima tačno određeni broj kliznih ravni i pravaca (maksimalne atomske gustine). Tako površinski centrirani kubni sistem ima dvanaest mogućih sistema klizanja, dok gusto složena heksagonalna rešetka ima samo tri. Otuda potiče razlika između vrlo duktilnih metala, kao bakar, olovo, aluminijum, koji pripadaju površinski centriranom sistemu, i manje duktilnih metala, kao cink i magnezijum, koji pripadaju gusto složenom heksagonalnom sistemu.

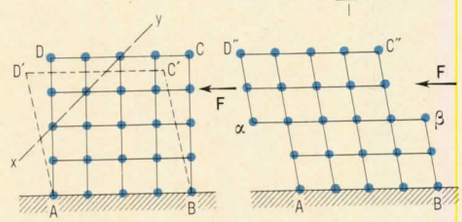
RAZLIKA IZMEĐU TEORIJSKE I STVARNE GRANICE ELASTIČNOSTI. Moguće je izračunati mehaničku otpornost i granicu elastičnosti metala s pretpostavkom da mu je kristalna rešetka pravilna i bez defekata. Pri tom se dobijaju vrednosti koje su neuporedivo veće od onih koje se mere eksperimentalno. Često se nalaze otpornosti na kidanje koje su u odnosu na teorijske kao 1 prema 10000.

Ova razlika se lako objašnjava ako se prihvati da se u toku deformacije klizanje ne vrši odjednom u čitavom delu jednog kristala, kao što je prikazano na sl. 7a, već uz posredovanje jedne dislokacije.

TUMAČENJE POMOĆU TEORIJE DISLOKACIJA. Vratimo se primeru kristala proste kubne kristalne strukture ABCD (*sl.* 8a) i primenimo na njega sve veće opterećenje F. Preko neke granice stvara se »stepenica« BβC′O′D′ kod β (*sl.* 8b) na desnom kraju kristala, dok se nikakva »stepenica«

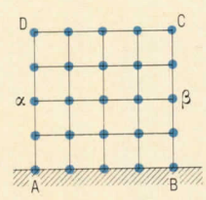


Sl. 6

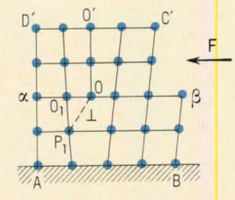


Sl. 7a

Sl. 7b



Sl. 8a



Sl. 8b

još nije pojavila na levom kraju AD′ kod α. Sve se događa kao da je nastalo sabijanje atomskih ravni paralelnih sa AD u gornjem delu kristala da bi se smestila još jedna atomska poluravan. Tu raspoznajemo linearni defekt nazvan *dislokacijom*.

Pod dejstvom opterećenja F, ova dislokacija se pomera zdesna nalevo; ona prelazi sa O na O_1 i tako redom s jednog na drugi, tako da pri tom nastaje kidanje samo jedne veze između dva atoma, kao O_1 i P_1. Kada se ona najzad pojavi na levoj strani kristala, nastaje jedna »stepenica« kod α i ostali deo rešetke ponovo biva savršen.

Kretanje ove dislokacije, koja se pomera u kliznoj ravni $\alpha\beta$, a da pri tom ne izaziva jednovremeno kidanje sila međuatomskih veza duž cele ravni $\alpha\beta$, kao što bi se događalo da odjednom klizi čitav jedan kristal, savršeno objašnjava razliku između teorijske i stvarne otpornosti metala.

Ovo objašnjenje je potvrđeno na sjajan način zapanjujućim mehaničkim osobinama »dlaka«. Ove dlake su vanredno fina vlakna (deo mikrona u prečniku) koja rastu pod vrlo posebnim uslovima na površini nekih metala. One ne sadrže dislokacije koje su sposobne da se kreću i ustanovljeno je da zaista imaju osobine bliske teorijskim.

POBOLJŠANJE MEHANIČKE OTPORNOSTI METALA I LEGURA. Mnogobrojne laboratorije u svetu nastoje da izrade metale sa poboljšanim mehaničkim karakteristikama podstaknute primerom »dlaka«, ali izgleda da su još daleko da to postignu. Međutim, kvalitet metala može se znatno poboljšati postupcima koji su više klasični, koji su poznati već dugo i čija se efikasnost može jako povećati u svetlosti modernih saznanja. Ideja, koje vrlo često nismo svesni — treba je spoznati — koja je polazna tačka takvog istraživanja poboljšanja, je sledeća: pošto su dislokacije odgovorne za malu granicu elastičnosti metala, ispitujmo kako da ih ukočimo ili kako da sprečimo njihovo kretanje obrazujući prepreke u metalu. Za to je dovoljno da poremetimo pravilnost kristalne rešetke.

Takav poremećaj se može stvoriti u metalu obrazovanjem velikog broja dislokacija; što ih je više, tim više ometaju jedna drugu. To se jednostavno ostvaruje primenom plastične deformacije metala, u toku koje nastaju nove dislokacije mehanizmom kojim se nećemo ovde baviti. Ova operacija je dobro poznata zemljoradniku, koji kuje oštricu svoje kose ne samo da bi je stanjio već i da bi očvrsla.

Kretanje dislokacija se takođe može zakočiti dodavanjem osnovnom metalu stranih atoma u vidu čvrstog rastvora koji svojim prisustvom izazivaju distorziju kristalne rešetke; to čini proizvođač čelika, dodajući železu ugljenika da bi napravio čelik; to isto tako čini livac dodajući bakru kalaja da bi izradio bronzu.

Zatim, zahvaljujući nekim termičkim obradama, može se izazvati pojava takve kristalne strukture u kojoj su klizanja otežana kao pri kaljenju čelika.

Metalurg zna, isto tako, da u izvesnim slučajevima izaziva u metalu pojavu manje ili više finih čestica nove faze, sa različitom kristalnom strukturom, zahvaljujući dodacima stranih elemenata i uz eventualnu pomoć termičke obrade. Tako se radi da bi se, dodavanjem čeliku dovoljno ugljenika, izazvala pojava finih čestica jedne vrlo tvrde faze, cementita, ili pri obradi aluminijuma, kome je dodato nešto bakra (duraluminijum).

Znajući da su granice zrna defekti koje dislokacije ne mogu da pređu, metalurg može, najzad, da učini da njegov metal ima vrlo fino zrno.

Većina ovih postupaka spada među najstarije, ali je očigledno da se njima mogu poboljšati osobine uz pomoć znanja koja su nedavno stečena u pogledu mehanizma deformacije.

Dok većina metala i legura imaju otpornost na kidanje između 10 i 100 kg/mm², sada je moguće da se, na primer, izrade žice od čelika čija maksimalna otpornost može da postigne vrednosti reda 300 kg/mm², zahvaljujući vrlo razrađenim postupcima mehaničke i termičke obrade.

VRSTE LOMA. Shodno prirodi metala lom jednog metalnog predmeta može biti po izgledu trojak.

Žilavi lom. Ako je metal duktilan, tj. ako njegova kristalna struktura omogućuje veliki broj kliznih sistema, što je slučaj sa metalima sa površinski centriranim kubom kao bakar, lomu prethodi jako sažimanje. Površina loma je po izgledu svilasta i žiličasta.

Zrnasti lom. Suprotno tome, kada metal nema dovoljno kliznih sistema (gusto pakovani heksagon), lom nastaje prskanjem bez sažimanja. Površina loma upravna je na pravac opterećenja i svako zrno prekinuto prskanjem daje sjajnu površinu.

Mešoviti lom. Ovaj lom nastaje uz umereno sažimanje i njegova površina ima karakteristike i »zrnastog« i »žilavog« loma. Metali sa prostorno centriranim kubnim sistemom pokazuju taj vid loma.

UTICAJ TEMPERATURE. Temperatura ima dvostruki uticaj.

1. *Na mehaničke karakteristike.* Po opštem pravilu, porast temperature izaziva slabljenje međuatomskih veza, što se ispoljava velikom duktilnošću i snižavanjem mehaničke otpornosti. S druge strane, može se desiti da se iznad neke temperature pojave novi klizni sistemi koji nisu bili aktivni na hladno u kristalu. Zbog toga neki metali i legure koji su na hladno malo plastični, u stvari krti, postanu vrlo duktilni iznad te temperature i lom, prvobitno »zrnast«, postane »žilav«. Sve ove osobine koriste se u operacijama toplog oblikovanja metala.

2. *Na osobine metala posle deformacije.* Jedan deformisan ili hladno kovan metal nalazi se u nestabilnom stanju pošto atomi ne obrazuju više pravilnu tvorevinu. U njemu je delimično nagomilana energija koja je potrošena pri hladnom kovanju u vidu unutrašnjih napona, distorzija i defekata kristalne rešetke. Njegova tvrdoća i otpornost povećali su se dok mu se duktilnost smanjila. Ako se atomima pruži mogućnost da se vrate u stabilnije položaje, osobine metala će se obnoviti. To se može učiniti ako se razlabave međuatomske veze i shodno tome omogući rešetki da povrati stabilniju konfiguraciju. Ovo otpuštanje se može obaviti podizanjem temperature, što omogućuje da se ukloni energija distorzije a dobrim delom i defekata (dislokacije) obrazovanih pri hladnoj obradi. Dakle, uočava se omekšavanje metala u toku koga se smanjuje mehanička otpornost, dok mu raste duktilnost.

S druge strane, ako je temperatura žarenja dovoljna, nastaju klice novih zrna, koja rastu i postepeno zamenjuju stara zrna, koja su bila deformisana. Ova reorganizacija, nazvana »rekristalizacija«, može znatno da izmeni »zrno« metala. Što je temperatura žarenja bila viša i što je hladna obrada bila manja, to rekristalisano zrno je veće, i, ako se ne pazi, postoji rizik da se dobiju ogromna zrna sa prečnikom od više milimetara, sa svim pratećim nedostacima. Ova se osobina može u nekim slučajevima svesno koristiti za laboratorijsko dobijanje monokristala dugačkog više centimetara; to je metoda kritične deformacije. Ispod te vrlo male deformacije ne događa se rekristalizacija. Uopšte, žarenjem na suviše visokoj temperaturi postoji opasnost da se dobije preterano veliko zrno: metalurg kaže da je metal bio pregrejan.

Neki čisti metali kao olovo rekristališu na sobnoj temperaturi, što objašnjava kako se oni mogu neograničeno deformisati a da ne otvrdnu, pošto im se rešetka preuređuje u toku deformacije.

U toku oblikovanja hladnom obradom, drugi metali moraju da se žare na dovoljno visokim temperaturama, i ovaj postupak se mora ponoviti svaki put kada je dostignut određeni stepen deformacije, preko koga bi dalje oblikovanje izazivalo prskotine i lom.

UTICAJ VREMENA. Metalna epruveta, koja je podvrgnuta konstantnom opterećenju, nižem od granice elastičnosti, može da se izdužuje (puzanje) i pokida posle izvesnog vremena, ponekad vrlo dugog, koje je funkcija temperature i opterećenja.

TEKSTURE HLADNE OBRADE. Neke vrste plastične deformacije, kao što je valjanje, teže da orijentišu kristalnu rešetku zrna metala u srednjem pravcu koji ima određen odnos prema pravcu deformacije. Takva tekstura je karakteristika kristalne rešetke metala. Kao posledica toga što klizne ravni metala imaju jednu istu srednju orijentaciju, dobijeni proizvod neće imati iste mehaničke osobine u svim pravcima; biće anizotropan, a neke od njegovih osobina (modul elastičnosti, koeficijenat dilatacije) isto tako će se menjati sa orijentacijom, kao što smo već rekli prethodno. Anizotropija mehaničkih osobina u jednom valjanom limu izražava se često znatno većom duktilnošću u pravcu valjanja nego u okomitom. Kaže se da se »podužne« osobine razlikuju od »poprečnih«. Ova pojava može biti vanredno štetna pri dubokom izvlačenju anizotropnog lima, pošto se metalni lim, nemajući svuda isti kapacitet deformacije, može prerano kidati.

Transformacije u metalima i legurama

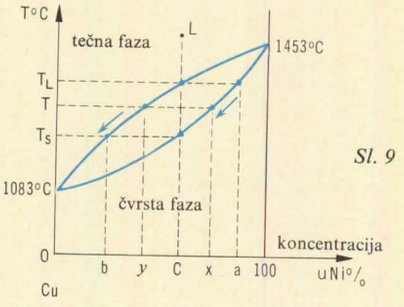
RAVNOTEŽNA STANJA

OČVRŠĆAVANJE I FAZNE PROMENE U ČVRSTOM STANJU. U čvrstom rastvoru metala B u metalu A, koji je zasićen sa B, mogu se pojaviti kristali jedne druge faze koji imaju različitu koncentraciju i kristalnu strukturu. Dakle, temperatura utiče na stepen zasićenja primarnog čvrstog rastvora, na koncentraciju druge faze, te, prema tome, na udeo prisutnih faza. Ispitajmo najpre šta se događa u trenutku očvršćavanja jedne legure, kada su prisutne istovremeno čvrsta i tečna faza.

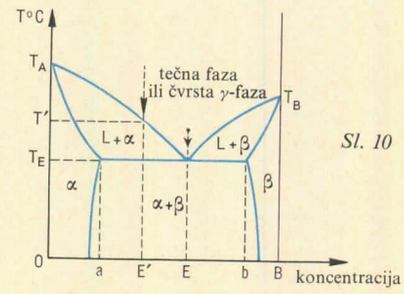
Uzmimo za početak primer legura bakar-nikl, koje imaju osobinu da se rastvaraju jedna u drugoj u čvrstom stanju u svim odnosima (nema zasićenja). Čisti bakar i čisti nikl ostaju u trenutku očvršćavanja na stalnim temperaturama od 1083°C i 1453°C dokle god ima i jedne kapi tečnosti, kao kod leda.

Stavimo jednu leguru koncentracije C na temperaturu upravo iznad temperature topljenja nikla, 1453°C (tačka L, *sl.* 9). Kada temperatura opada, legura dospe do temperature T_L, nazvane *tempereturom početnog očvršćavanja,* kada se pojavljuje prvi mali kristal sastava *a*, ali ta temperatura ne ostaje stalno. Dok ona opada, koncentracija nikla u čvrstoj fazi koja se izdvaja, opada, a istovremeno osiromašuje i sama tečna faza. Na primer, na temperaturi T čvrsta i tečna faza u ravnoteži imaju respektivno koncentraciju *x*, manju od *a* i veću od *c* i koncentraciju *y*, manju od *c*.

Kada se legura srednjeg sastava C nalazi pred potpunim očvršćavanjem, čvrsta faza teži sastavu C, a poslednja kap tečne faze sastavu *b*. Kada nestane i ta poslednja kap, temperatura legure je T_S : ona se naziva *temperaturom kraja očvršćavanja.*



Sl. 9



Sl. 10

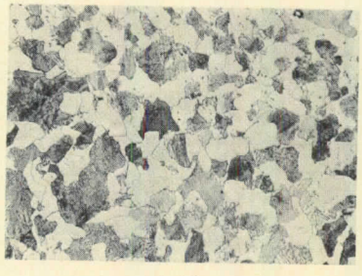
Obrnuto se događa pri stapanju. Interval $T_S T_L$ naziva se *intervalom očvršćavanja.* Obavljajući isti eksperiment sa legurama različitog sastava može se tačku po tačku ucrtati ceo opseg dijagrama (temperatura, sastav) postojanja dve faze, tečne i čvrste, pomešane u promenljivim količinama, prema srednjem sastavu posmatrane legure, koje imaju za datu temperaturu tačno određene ravnotežne koncentracije. Izvan ovog obeleženog domena postoji samo jedna faza.

Može nastati potpuno analogna pojava, ali potpuno u čvrstom stanju, kada jedan čvrsti rastvor podleže alotropskoj transformaciji.

Mnogi drugi oblici složenijih dijagrama, kako za čvrsto tako i za tečno stanje, sreću se u stvarnosti. Sem toga, ovi oblici mogu se međusobno kombinovati dajući vrlo kompleksne dijagrame. Jedan od njih ima poseban praktičan značaj: to je slučaj eutektične smeše (*sl.* 10).

Očvršćavanje legure sastava E događa se na stalnoj temperaturi T_E, kao kod čistog metala, uz istovremeno taloženje dve čvrste faze α i β, sastava *a* i *b*, koje se nalaze u obliku smeše finih čestica dveju faza, nazvane *eutektik.* Za ovu leguru interval očvršćavanja jednak je nuli. Za koncentraciju E', manju od E, ono počinje obrazovanjem kristala čvrste faze α polazeći od temperature T'; očvršćavanje se završava na T_E taloženjem eutektika (α + β), koji cementira prvobitne kristale α.

Isti tip koncentracije vrši se u čvrstom stanju, a posebno u legurama železo-ugljenik, koje se nazivaju *čelici.* Železo na visokoj temperaturi ima alotropski oblik, γ-železo, sa površinski centriranom kubnom strukturom; ugljenik može da se rastvara u toj rešetki i dobijeni čvrsti rastvor naziva se »austenit«. Pri sadržaju ugljenika manjem od *a*(0,02 %) taj austenit se transformiše pri hlađenju u čvrsti rastvor α, koji se naziva »ferit«, rastvor ugljenika u železu sa prostorno centriranim kubom, koji je alotropski oblik stabilan na niskoj temperaturi. Pri sadržaju nešto većem od *a* prvo nastaju u čvrstom stanju kristali rastvora α i, kada se dođe do temperature T (720°C), između već obrazovanih zrna taloži se fina smešna čestica ferita i jedne nove faze β, nazvane »cementit«, sastava *b*, koja ima veliku tvrdoću. Ova smeša, nazvana »eutektoid«, vidi se u obliku lamela šarenog izgleda, što joj je dalo ime »perlit« (*sl.* 11). Koncentracije E i *b* su 0,8 % i 6,66 %, a ispod 0,8 % oblik dijagrama je složeniji. Između 2 i 3,5 % nastaju nezgode pri topljenju, gde se, shodno termičkoj obradi, može naći cementit ili grafit u slobodnom stanju.



Sl. 11

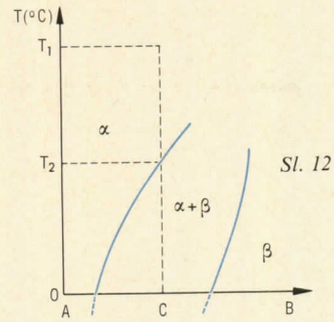
NERAVNOTEŽNA STANJA

U prethodnom izlaganju prećutno se pretpostavljalo da su transformacije bile dovoljno spore da bi se uspostavila nova ravnotežna stanja. U praksi se često događa da brzine hlađenja nisu uvek dovoljno spore kao što bi trebalo, te se dobijaju metali i legure koji na sobnoj temperaturi imaju relativno nestabilnu ravnotežu.

DIFUZIJA U METALU. Ako se dovedu u dodir dve prethodno polirane površine uzoraka metala A i B, koji se međusobno rastvaraju u svim odnosima, i ako se u čvrstom stanju na dovoljno visokoj temperaturi drže određeno vreme, primetiće se najpre da su se dva uzorka zavarila. Ako se meri koncentracija komponente B duž epruvete, zapaža se da ona varira od 0 do 100 %. To znači da su atomi A i B difundovali jedni u druge do znatnih rastojanja i da su obrazovali čvrsti rastvor promenljivog sastava. Uopšte, ukoliko su temperatura i trajanje žarenja veći, utoliko difuzija više nastoji da homogenizuje koncentraciju uzorka. Pošto je difuzija vrlo spora pojava, sledi da se pri transformaciji, gde se pojavljuju jedna ili više faza sa različitom koncentracijom (*sl.* 9), praktično ne može posle vraćanja na sobnu temperaturu dobiti legura potpuno homogenog sastava, osim ako se homogenizaciona žarenja ne obavljaju dovoljno dugo (ponekad stotine časova) na temperaturi što je moguće bliže transformaciji.

Ova sporost difuzije koristi se ponekad da bi se legurama dale neke osobine.

TALOŽENJA. STRUKTURNO KALJENJE. Posmatrajmo ravnotežni dijagram dva metala A i B (*sl.* 12). Ohladimo brzo kaljenjem na sobnu temperaturu uzorak legure koncentracije C, koji je prethodno zagrejan na T_1. Ako je difuzija B u A dovoljno spora, može se i na hladno zadržati faza α bez pojave faze β, koja bi normalno trebalo da se pojavi, prema ravnotežnom dijagramu. Očigledno da je ova zakaljena α faza u nestabilnoj ravnoteži, pošto je presićena na sobnoj temperaturi. Ako se ona potom zagreva na temperaturu manju od T_2, pojavljuje se talog faze β, koji može biti vanredno fin ako temperatura ponovnog zagrevanja i vreme držanja nisu suviše veliki. Takav talog, ometajući klizanje, može



Sl. 12

leguri dati mnogo veću tvrdoću i mehaničku otpornost nego što bi ih imala u ravnotežnom stanju. Finoća i raspodela taloga imaju optimalnu vrednost pri tačnoj obradi; ako se zagrevanje obavlja visoko i suviše dugo, talog ogrubljava, teži ka ravnotežnom stanju i legura brzo gubi svoje vrline.

Ova vrsta kaljenja, nazvana *strukturnim kaljenjem*, koristi se za duraluminijum.

MARTENZITSKE TRANSFORMACIJE. Kaljenje iz stabilne faze na visokoj temperaturi omogućava da se zaobiđe neka transformacija i da izazove takav poremećaj rešetke da se ova uprkos svemu mora promeniti. Ova promena se događa lokalno i trenutno jednostavnim preuređenjem kristalne rešetke te faze, u toku koje se neki atomi pomeraju na vrlo kratka rastojanja, manja od dimenzija osnovne ćelije, a da difuzija nema vremena da dejstvuje.

To je slučaj čelika gde, umesto da se normalno dobiju ferit i cementit, stabilna faza na visokoj temperaturi, austenit, stvara novu fazu, *martenzit*, čija struktura liči na feritnu, ali je mnogo tvrđa i krtija. Ta faza je nestabilna na sobnoj temperaturi; žarenjem, koje se naziva *otpuštanjem*, pri čemu igra ulogu difuzija, omogućuje se vraćanje na ravnotežno stanje. Pre nego što se to postigne, čelik prolazi kroz jedno stanje u kome mu je mehanička otpornost još dosta visoka, ali se krtost smanjila. Obično se kaljeni čelici koriste u tom obliku. Višestruki dodaci drugih metala omogućuju da se utiče na osobine dobijene tim postupkom.

Tehnike u metalografskoj laboratoriji

Metalurg koristi mnogobrojne metode merenja i ispitivanja i upotrebljava tehnike koje dopuštaju da se menjaju eksperimentalni uslovi (temperatura, pritisak itd.).

KLASIČNE TEHNIKE

Neke osnovne tehnike poznate su više od jednog veka. One su malo-pomalo bile usavršavane i pomoću njih je metalograf snabdeven dosta kompletnom zbirkom metoda ispitivanja, koje najčešće zadovoljavaju pri razmatranju tekućih problema.

MIKROGRAFIJA. Mikrografija je tehnika koja omogućuje otkrivanje izgleda metala na mikroskopskoj skali; njome se ne može određivati kristalna struktura, ali se može otkrivati prisustvo različitih konstituenata, ili faza, čiji oblik, raspodela, količina daju podatke o transformacijama koje je metal pretrpeo u toku svoje istorije.

Mikrografsko ispitivanje uzorka podrazumeva sledeće različite operacije:

— stvaranje ravne površine, polirane pomoću finog abrazivnog sredstva i, eventualno, polirane elektrolitički;

— površinsko hemijsko nagrizanje koje omogućuje da se razlikuju razni prisutni konstituenti;

— ispitivanje na metalografskom mikroskopu koji može da dostigne povećanje od 3000, i, eventualno, snimanje na fotografskoj ploči.

Mikrografija, koja je metalurgu glavna osnovna tehnika, često je vrlo delikatna. Svaka nova legura, u stvari, nalaže uvođenje posebne tehnike poliranja i hemijskog nagrizanja, a tumačenje eksperimentalnih rezultata zahteva veliko znanje i dugotrajno iskustvo.

MEHANIČKA ISPITIVANJA. Za ispitivanje mehaničkih osobina metalurgu stoji na raspolaganju niz mašina za ispitivanje; među njima su mašine za zatezanje, torziju, zamor, uz napomenu da su mehanička ispitivanja koja se na njima mogu vršiti jako unapređena poslednjih godina zbog razvoja modernih tehnika, npr., primenom elektronskih elemenata za merenje opterećenja i deformacija.

Treba takođe, navesti ispitivanje tvrdoće, koje se sastoji u merenju prodiranja jedne kugle ili konusnog šiljka u metal pod određenim opterećenjem, i koje daje predstavu o mehaničkim osobinama imajući ulogu prethodne kontrole, ili, pak, služi da se razlikuju u jednoj leguri mikrokonstituenti različitih tvrdoća.

FIZIČKA ISPITIVANJA. Svaka promena u metalu koju prati promena nekih fizičkih osobina (specifični otpor, magnetizam, dilatacija, oslobađanje toplote itd.) može se proučavati i »pratiti« njihovim tumačenjem. Dva najviše upotrebljavana metoda su *termička analiza*, koja otkriva oslobađanje toplote u toku transformacija, i *dilatometrija*, koja merenjem dimenzionih promena uzorka u funkciji temperature pokazuje promene kristalne rešetke. Ova fizička merenja, koja su samo odraz stanja metala, najčešće se moraju dopuniti ispitivanjima koja dopuštaju da se neposredno dospe do strukture (difrakcija X-zraka ili elektrona).

NOVE TEHNIKE

Pošto su iscrpli mogućnosti klasičnih sredstava, istraživači su nedavno izučavali nove tehnike i izradili nove uređaje da bi podigli nivo svojih znanja i da bi istraživali nove oblasti. Sledeća ostvarenja su najznačajnija.

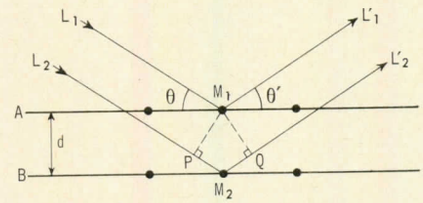
MIKROSKOP SA ZAGREVNOM PLOČOM. Ovaj uređaj je dopuna normalnom metalografskom mikroskopu koji omogućuje posmatranje uzoraka samo na sobnoj temperaturi.

Kao što ime nagoveštava, on se koristi za ispitivanje metala pod povišenim temperaturama. Zahvaljujući njemu, metalurg može da prati neposredno promene u metalima koje potiču od transformacija, dok ispitivanje posle hlađenja na sobnu temperaturu često ne daje nepobitnu sliku tih promena.

Na taj način je bilo moguće da se snime ili slikaju alotropske transformacije u uranu, kobaltu i rekristalizacija berilijuma posle hladne obrade.

DIFRAKCIJA X-ZRAKA. Difrakcija X-zraka se uspešno koristi već pola veka za određivanje kristalne strukture metala; ipak je ovaj metod svrstan u moderne tehnike zbog vanrednog razvoja i usavršenja sa primenom X-zraka poslednjih godina.

Posmatrajmo snop monohromatskih i paralelnih X-zraka L_1L_2 talasne dužine λ, koji pod uglom θ padaju na kristalnu rešetku, čije dve atomske ravni A i B prikazujemo na *sl.* 13. Svaki atom ovih ravni



Sl. 13

ima ulogu izvora difuznog zračenja. Može nastati interferencija između difuznih zračenja svakog atoma i emisije difraktovanog zračenja $L'_1L'_2$ u izvesnom pravcu. Ovaj pravac je takav da je izlazni ugao θ' jednak upadnom uglu θ (totalna refleksija) i da je razlika putanja PM_2Q zraka $L_1M_1L'_1$ i $L_2M_2L'_2$ difraktovanih od atoma M_1 i M_2, koji se nalaze na dve paralelne atomske ravni, jednaka celom umnošku talasne dužine. Ovaj uslov se izražava Bragovom formulom

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

gde je n ceo broj, a d rastojanje između dve susedne atomske ravni A i B.

Jasno je da se korišćenjem ove proste formule i menjanjem λ i θ može odrediti kristalna struktura jednog metala i otkriti deformacije i posebna uređenja kristalne rešetke (tekstura).

U metalografiji se najčešće koristi tzv. Debaj-Šererov (Debye-Scherrer) metod, koji se primenjuje na uzorke sastavljene od mnogobrojnih malih kristala. U praksi se uzorak može sastojati od jedne tanke igle ili od staklene kapilare koja je napunjena vrlo finim prahom od ispitivanog metala. Uzorak se stavlja u središte O cilindrične komore tačno poznatog prečnika, na čijem zidu se nalazi osetljiv foto-

grafski film (*sl.* 14). Izvor monohromatskih X-zraka, koji se postavlja prema otvoru izrađenom na komori omogućuje da se na uzorak šalje vrlo tanki snop zračenja. Posmatrajmo atomsku ravan *xy* poznatih indeksa, čije rastojanje rešetke *d* odgovara uglu refleksije θ, koji je dat Bragovom relacijom. Ona difraktuje zrak OA, koji čini ugao 2θ sa osom aa' upadnih X-zraka. Pošto uzorak sadrži veliki broj malih kristala različito orijentisanih, zraci koji se difraktuju na njima, obrazuju kupu koja nastaje obrtanjem poluugla 2θ oko ose aa', pošto samo taj pravac u odnosu na osu zadovoljava Bragovu relaciju. Dijagram snimljen na filmu predstavlja presek kupe i cilindra koji obrazuje komora (*sl.* 15). Znajući dimenzije komore i talasnu dužinu zraka λ lako se izračunava rastojanje rešetke *d* (*sl.* 13). Ostali sistemi ravni daju očigledno niz difrakcionih prstenova.

Jedna varijanta ovog metoda, koji se mnogo koristi u laboratorijama, jeste da se film zameni Gajger-Milerovim (Geiger-Müller) brojačem koji se pokreće oko ose O. Impulsi koje brojač primi pri prolazu neke difraktovane linije beleže se na papiru koji se kreće proporcionalno uglu rotacije brojača.

ELEKTRONSKI MIKROSKOP. Pojava elektronskog mikroskopa i njegovo usavršavanje poslednjih godina doprineli su značajnom razvoju metalografije proširivši oblast primene optičke mikrografije i X-zraka.

U suštini, uređaj se sastoji od elektronskog topa, nosača uzorka i fluorescentnog ekrana za prijem slike, koji se može zameniti fotografskom pločom. Ova tri organa se nalaze u zatvorenom prostoru pod vrlo visokim vakuumom. Elektronski top sadrži izvor elektrona koji se ubrzavaju potencijalnom razlikom koja može dostići i čak premašati 100000 volti.

Sistem magnetnih ili elektrostatičkih sočiva omogućuje da se fokusira dobijeni elektronski snop na uzorak i da se zatim projektuje na ekran. U najnovijim mikroskopima moguće je uzorak deformisati, zagrevati ili hladiti. Elektronski mikroskop se može koristiti u dve svrhe.

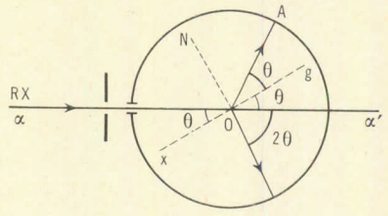
1. Pre svega, može se koristiti kao optički mikroskop. Mogu se dobiti ogromna povećanja (reda 100000), ali je njegovo korišćenje relativno složeno zbog apsorpcije elektrona u uzorku. Pošto se ne može koristiti refleksija kao kod optičkog mikroskopa, uzorak mora biti izuzetno tanak (nekoliko stotih delova mikrona) da bi se moglo raditi transmisiono. Većinom se mora ograničiti na ispitivanje tankih replika površine uzorka, što, u stvari, predstavlja uzimanje otiska sa nje.

Naročito zanimljiva primena elektronske mikroskopije je mikrofraktografija, koja se sastoji u izučavanju izgleda preloma nastalih u metalu (*sl.* 16). Ispitivanje replike površine loma često je izvor dragocenih obaveštenja o mehanizmu i uzrocima njegovog nastajanja.

2. Elektronski mikroskop takođe omogućuje merenja slična onima koja se obavljaju X-zracima. Elektronu koji se kreće brzinom *v* može se u stvari pripisati, kako to pokazuje talasna mehanika, dužina talasa $\lambda = h/mv$ (De Broljijeva formula, gde je *h* Plankova konstanta, a *m* je masa elektrona).

Kada snop elektrona padne na kristal, stvaraju se difraktovani snopovi čiji se pravac može tačno izračunati pomoću Bregove formule, ustanovljene za X-zrake, koristeći se odgovarajućom talasnom dužinom λ. Dobijene slike su slične difrakcionim slikama X-zraka i tumače se na isti način. Elektronska difrakcija je naročito pogodna za proučavanje površinskih pojava, što se ne može postići X-zracima zbog njihove prodornosti: proučavanje površinskog sloja metala podvrgnutog nekim obradama površine (poliranje, mehanička obrada itd.), izučavanje reakcija na površini (oksidacija, cementacija itd.), izučavanje tankih metalnih slojeva dobijenih nekim postupcima (elektrolitičko, hemijsko taloženje itd.).

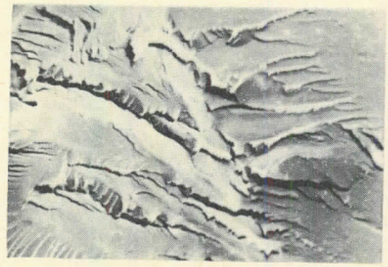
ELEKTRONSKA MIKROSONDA. Ovaj instrumenat, koji je pronašao i uveo pre nekoliko godina



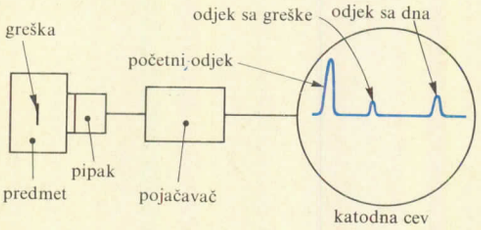
Sl. 14



Sl. 15 *Fot. X.*



Sl. 16. Krti lom jednog metala. *Fot. X.*



Sl. 17

Francuz prof. Kasten (Castaing), stiče sve veći ugled među metalurzima, jer omogućuje da se odredi količina prisutnih elemenata u vanredno maloj zapremini, reda milijarditog dela kubnog milimetra, što nijedna druga metoda ni blizu ne može postići. On je omogućio značajan napredak u metalurškom ispitivanju.

Princip uređaja je sledeći: elektronski top fokusira snop monoenergetskih elektrona na površinu uzorka koji se ispituje; tako dobijena mrlja je reda veličine jednog kvadratnog mikrona; pod dejstvom elektrona svaki od prisutnih elemenata u uzorku emituje karakteristično X-zračenje imajući upravo ulogu antikatode u cevi za dobijanje X-zraka; uz pomoć spektrometara analiziraju se talasna dužina i intenzitet tog zračenja; zatim se poređenjem sa uzorcima za baždarenje dolazi do ispitivanog sastava legure.

Primena ovog uređaja je velika. Najčešća je: izučavanje intermetalne difuzije jednog metala koji je rastvoren u drugom, indentifikacija i određivanje količine elemenata koje sadrži čestica taloga ili uključak, izučavanje segregacije u legurama. Ali metod ima i ograničenja. Nije moguće odrediti količinu elemenata koji su prisutni u suviše malim razmerama.

ISPITIVANJA BEZ RAZARANJA. Često se dva tipa eksperimenata dopunjuju: to su gamaradiografija i ultrazvučna kontrola; ali oni imaju i drugu primenu.

Gamaradiografija. Već dosta dugo primenjuje se radiografska kontrola, pri kojoj se koristi rastuća apsorpcija X-zraka ukoliko oni više prodiru u materiju, da bi se u dubini tela otkrilo prisustvo različitih defekata: šupljine, heterogenost gustine, zadebljanja itd. Izvor zračenja koji se koristi u ovoj tehnici je rendgenska cev. Ovaj uređaj, koji je skup, kabast, nepogodan za rukovanje i čija je moć prodiranja ograničena, sve češće se zamenjuje radioaktivnim izvorima. Oni se sastoje od nekog veštačkog radio-elementa, γ-emitera, koji se dobija ozračivanjem u atomskom reaktoru i zatim stavlja u zaštitni olovni sud, iz koga se može izvaditi daljinskim upravljanjem radi korišćenja; na taj način izbegnuta je svaka opasnost izlaganja osoblja zračenju. Gamaradiografija ima određene prednosti: postavljanje nije skupo, pokretljiva je (može se koristiti na radilištu), omogućuje lakšu kontrolu nekih delova (cevi), a prodiranje γ-zraka je mnogo veće nego X-zraka.

Sada se raspolaže nizom veštačkih radioaktivnih izvora, vrlo jeftinih, različitog intenziteta i energije zračenja, između kojih se može načiniti razložan izbor, zavisno od metala koji treba da se kontroliše, njegove debljine i željene osetljivosti. Najčešće se koriste sledeći radio-elementi: radio-kobalt (poluvreme 5,3 godina), radio-iridijum (70 dana) i radio-cezijum. Tehnika korišćenja je u suštini ista kao i za radiografiju X-zracima.

Ultrazvuk. Elastične vibracije se prostiru u čvrstim telima, naročito u metalima, isto onako kako se prostiru u vazduhu. Ove vibracije mogu biti zvuci čujne učestanosti (ili vrlo visoke, nekoliko hiljada puta više od srednjih čujnih učestanosti). Korišćenje prostiranja elastičnih vibracija vrlo visoke učestanosti kao metoda za ispitivanje bez razaranja omogućeno je time što svaki prekid kontinuiteta u čvrstom telu, makar kako male debljine, prekida prenos ovih vibracija. Potrebne učestanosti se postižu pijezoelektričnom pobudom kvarcnih pločica ili specijalne keramike pod dejstvom naizmeničnog napona proizvedenog u elektronskom generatoru. Obrnuto, jedan ultrazvučni talas može se otkriti pomoću pijezoelektrične pločice koja promenu pritiska izazvanu vibracijom pretvara u električni impuls. Ovi impulsi se zatim pojačavaju i šalju na cev katodnog osciloskopa.

U praksi se jedan predmet može kontrolisati na razne načine od kojih se dva najčešće upotrebljavaju.

U kontroli pomoću *transmisije* predmet se stavlja između kvarca koji emituje i kvarca prijemnika. Kada defekat naiđe između njih, signal koji se prima oslabi ili potpuno nestane.

U kontroli *metodom odjeka* (*sl.* 17) pipak emituje vrlo kratke impulse, koji se odbijaju od dna predmeta ili nekog defekta, i na izlazu ih prima isti pipak. Posmatranje na katodnom osciloskopu otkriva eventualno prisustvo odjeka sa defekta između impulsa pri polasku i odjeka sa dna i omogućuje da se izračuna dubina defekta i da se oceni njegova veličina pomeranjem pipka.

Ultrazvučna kontrola se može automatizovati: pomoću pipka se automatski prođe po celom predmetu, a primljeni impulsi se prenose na papir pomoću jednog pera, čije je kretanje povezano sa kretanjem pipka. Tako se dobija prava radiografija predmeta pomoću ultrazvuka.

Osim za ispitivanja bez razaranja ultrazvuk se koristi za merenje modula elastičnosti metala. Teorija prostiranja elastičnih talasa pokazuje, u stvari, da je brzina V u vezi sa modulom elastičnosti E i sa gustinom *d* materijala u odnosu

$$E = V^2 d.$$

Merenjem V i *d* može se, dakle, izračunati modul elastičnosti E. Poznajući debljinu materijala, brzina V se meri direktno na katodnoj cevi poređenjem rastojanja između uzastopnih odjeka koji odgovaraju refleksijama na površini komada, sa jednim signalom poznate učestanosti. Brzina V se isto tako može meriti poređenjem sa brzinom prostiranja ultrazvuka u uzorku-etalonu. Merenje prigušenja zvuka u metalu može da pruži podatke o njegovom stanju savršenosti: prisustvu defekata, nečistoća itd.

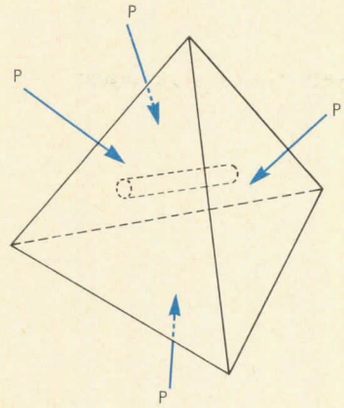
Radioaktivni obeleživači. Primena radioaktivnih izotopa umnogome olakšava izučavanje raspodele jednog metala u drugom u toku pojave difuzije. Ovo

izučavanje se može sastojati u tome da se na jednu površinu uzorka metala nanese sloj drugog metala koji je aktiviran ozračivanjem u reaktoru, i da se prodiranje ovog drugog meri uzastopnim skidanjem tankih slojeva uzorka i merenjem njihove aktivnosti pomoću brojača.

TEHNIKE KOJE OMOGUĆUJU MENJANJE NEKIH USLOVA EKSPERIMENTA. Teško se može postići da se u vrlo velikom obimu menjaju neki vrlo važni eksperimentalni parametri kao pritisak, temperatura, veličina zrna. Zbog toga su iz različitih razloga dugo bile zapostavljane oblasti od izuzetnog značaja, kao što su oblast vrlo visokih pritisaka, vrlo niskih temperatura, monokristala. Danas je u tom pogledu drugačije.

Fizička merenja pod vrlo visokim pritiscima. Metalurzi su dugo bili prisiljeni da zbog izvesnih materijalnih razloga ne vode računa o uticaju pritiska na osobine metala. Sada je, pak, moguće da se metalni uzorci podvrgnu krajnje visokim pritiscima, koji mogu dostići i 200000 kg/cm², a da pri tom, uprkos često malim dimenzijama, mogu na njima da vrše neka fizička merenja (specifični otpor, termička analiza itd.) ili mehanička ispitivanja uz promenu temperature u širokim granicama.

Da bi ovakva ispitivanja imala neku vrednost, jasno je, da pritisak treba da bude što je moguće više hidrostatički. Do nekoliko desetina hiljada atmosfera može se raditi u fluidnim sredinama (tečnost ili gas), ali preko neke granice većina njih prelazi u čvrsto stanje. Počev odatle, kao sredstvo za prenos pritiska treba koristiti neke čvrste minerale (talk, pirofilit) koji imaju osobinu da prenose pritisak na kvazihidrostatički način. U tom slučaju, jedna tehnika se



Sl. 18

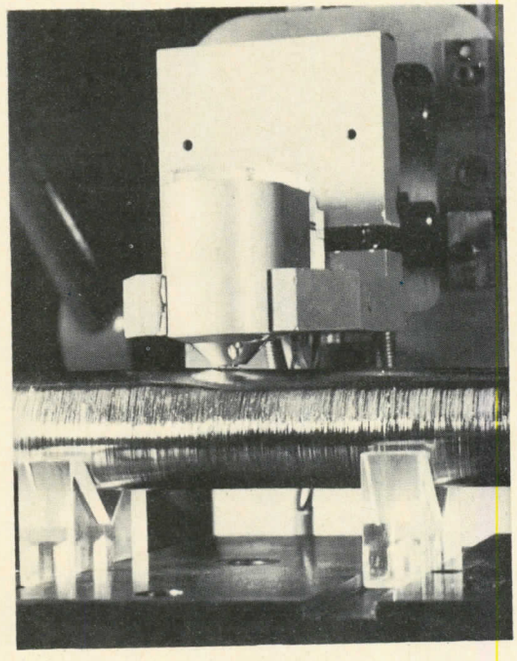
sastoji u tome da se iz izabranog minerala obradi jedan mali tetraedar u koji se zatvori uzorak za ispitivanje. Specijalna presa četvorostrukog dejstva omogućuje da se primeni jednak pritisak na četiri strane tetraedra, i to upravno na njih (*sl.* 18). Pošto je uzorak izolovan čvrstim prenosiocem pritiska, mogu se vršiti merenja specifičnog otpora; on se takođe može zagrevati stavljajući u tetraedar, čija ivica ima samo nekoliko centimetara, jedan grejni element.

Ove tehnike, koje je na prvom mestu bio uveliko razvio Amerikanac Bridžmen (Bridgman), omogućile su naročito otkriće novih alotropskih vrsta u nekim metalima; one su omogućile brze sinteze takvih proizvoda kao što je dijamant. Zahvaljujući njima, izgleda da je moguće u toku oblikovanja poboljšati duktilnost nekih relativno krtih metala (berilijum). Jednom reči, izgleda da bi osnovno ili primenjeno istraživanje u metalurgiji trebalo da dobije poleta u oblasti visokih pritisaka i da dovede do teorijskih i praktičnih otkrića od većeg interesa.

Fizička merenja na vrlo niskim temperaturama. Ova merenja, koja se ponekad obavljaju na temperaturi tečnog helijuma, daju dragocena saznanja o metalu.

DOBIJANJE MONOKRISTALA. Veliki broj metalurških istraživanja osnovnog karaktera oslanja se na monokristale. Monokristali se mogu dobiti različitim postupcima koji se obično ne mogu primeniti na sve metale. Neki od ovih postupaka koriste se transformacijom u čvrstom stanju. Jedan od njih se sastoji u tome da se ispitivani metal podvrgne kritičnoj deformaciji i zatim žari na visokoj temperaturi; ovaj metod »kritične deformacije« omogućuje da se dobiju, ako ne monokristali, ono bar uzorci ogromnih zrna, iz kojih se mogu odvojiti monokristalne epruvete. Drugi metodi za dobijanje monokristala polaze od metala u tečnom stanju. Jedan od njih, koji služi za izradu monokristala za neke tranzistore ili poluprovodnike (silicijum), sastoji se u tome da se mali kristal izabranog materijala dovede u dodir sa istim materijalom u tečnom stanju i da se postupno izvlači naviše malom brzinom. Metal koji očvršćava na toj klici ima istu kristalnu orijentaciju kao i ona. Ovim metodom »izvlačenja« dobijaju se monokristali velikih dimenzija.

Ove operacije, koje počivaju na prostim načelima, zahtevaju korišćenje vanredno finih tehnika i preduzimanje vrlo važnih mera, ukoliko treba da se dobiju pravilni monokristali visokog stepena savršenosti.



Monokristal u toku poliranja. *Fot. C. S. F. René Bouillot.*

DOBIJANJE METALA I LEGURA

Opšti principi

Metalurg nalazi u prirodi rude. On ih obrađuje da bi iz njih izdvojio metalurške proizvode. Skup ovih operacija sačinjava opštu metalurgiju, koja se sastoji od tri grupe poslova, kao što sledi: prerada ruda ili ekstraktivna metalurgija, prečišćavanje sirovih metala i pretvaranje metala (dodavanjem drugih materijala, termičkom obradom i mehaničkom obradom).

RUDE

Ruda je prirodna naslaga iz koje se može izdvojiti metal po konkurentnoj ceni koštanja. Međutim, u retkim slučajevima, pod »rudom« se podrazumevaju i takvi materijali koji nemaju sve nabrojane osobine. Tako se ponekad smatraju rudama industrijski otpaci od sumporne kiseline na bazi pirita, koji se eksploatiše uglavnom zbog sumpora. Takođe se rudama nazivaju vrlo bogata nalazišta u Africi, u tako udaljenim oblastima da bi njihova eksploatacija bila nerentabilna.

Metal je prisutan u rudi bilo u obliku jedinjenja (oksidi, karbonati, silikati, sulfidi), bilo, što je mnogo ređe, u elementarnom stanju, tj. nevezan (dragoceni metali: zlato, srebro). U stvari, ruda je obložena jalovinom, nekorisnim materijalima.

Da bi se ustanovilo da li je eksploatacija rentabilna, treba razmatrati sledeće faktore:

1. veličinu naslage i uslove eksploatacije, od kojih zavisi cena eksploatacije rudnika;

2. udaljenost rudnika i uslove transporta, koji utiču na troškove transporta;

3. prirodu rude i sadržaj metala, prirodu i količinu jalovine, prirodu i količinu nečistoća prisutnih u rudi; primese u rudi mogu ometati postupak ili menjati osobine metala (sumpor i fosfor u čelicima), a mogu biti i korisne kada same imaju veliku vrednost (plemeniti metali); ovi elementi određuju cenu koštanja prerade rude i procenat konačno dobijenog metala i sporednih proizvoda;

4. prodajnu cenu metala.

Svi ovi faktori su vrlo promenljivi i takvog su karaktera da se za svaki metal ne može odrediti granica ispod koje se eksploatacija ne bi isplatila. Stalni napredak u metalurgiji dopušta da se razmotri korišćenje i siromašnih rudišta, na koja se do juče nije obraćala pažnja.

Redosled faza eksploatacije jedne rude je sledeći: istraživački radovi, kopanje rude, priprema ili obogaćivanje, transport, prerada.

ISTRAŽIVAČKI RADOVI. Ko istražuje zemljište, koristi se geološkim, geofizičkim i geohemijskim metodima za otkrivanje rudnih nalazišta. Ona su u obliku žila vulkanskog porekla ili su, pak, sedimentne naslage.

Zna se, iz iskustva, da se određena ruda nalazi u određenoj geološkoj formaciji, da su pukotine privilegovana mesta, tako da izučavanje geološke karte i fotografija iz vazduha omogućavaju da se ograniče zone koje treba ispitati. One se još bliže određuju zahvaljujući geofizičkom ispitivanju koje se obavlja sledećim postupcima:

— osetljivim magnetnim merenjem, npr. u slučaju prisustva magnetita;

— merenjem električne provodljivosti, koja je povećana u prisustvu metalnih ruda;

— prostiranjem talasa izazvanih eksplozijama;

— lokalnim promenama zemljine teže;

— merenjem ultraljubičaste fluorescencije, npr., radi otkrivanja volframa;

— merenjem radioaktivnosti, koje omogućuje otkrivanje uranskih ruda.

Što se tiče geohemijskih metoda, oni se koriste za otkrivanje ležišta, npr., analizom tragova traženog elementa u vodenim tokovima ili ispitivanjem biljaka koje se češće nalaze na zemljištima koje ga sadrže.

Kada se ruda jednom otkrije, poslednja faza prospekcije sastoji se u tome da se obavi sondiranje radi utvrđivanja kvaliteta nalazišta i njegovog prostiranja.

KOPANJE RUDE. Ruda se kopa u dnevnim kopovima ili u podzemnim hodnicima, shodno vrsti rudišta. Ovde ne bi bilo zanimljivo detaljno razmatranje tehnika koje se pri tom koriste. Dovoljno je da se spomene stalno usavršavanje opreme, što olakšava rad rudara, kao i pažnja koja je posvećena sigurnosti osoblja. Ona se posebno sprovodi u rudnicima urana, gde je vrlo stroga kontrola doze radioaktivnosti, koju radnici smeju da prime.

OBOGAĆIVANJE. Glavni cilj je odvojiti rudu od jalovine. Pri tom se koristi metod *neposredne analize*. Obavlja se u rudniku, u kom slučaju ruda stiže u tvornicu u obliku koncentrata, ili u tvornici, koja, dakle, prima sve što stigne. Retke su rude u obliku praha ili u obliku šljunka. Najčešće su u obliku stena koje treba lomiti i drobiti pre nego što se obavi bilo koja druga operacija obogaćivanja; pri drobljenju koriste se drobilice sa čekićima ili rotacione drobilice sa kuglama. Drobljenje se obično obavlja u tri stupnja, odvojena jedan od drugog odabiranjem na situ da bi se smanjila razlika u veličini zrna. Tako se dobijaju veliki komadi, fini šljunak ili pesak.

Postupci koncentracije protežu se od prostog ručnog odvajanja do najmodernijih postupaka flotacije:

• *ručno odvajanje*;

• *ispiranje*, koje neke minerale oslobađa od glinaste jalovine;

• *prosejavanje*, koje veće ili manje komade rude odvaja od jalovine usled razlika u tvrdoći;

• *magnetno odvajanje*, koje je vrlo efikasno sredstvo za obogaćivanje ruda koje sadrže gvožđe; magnetne čestice bivaju ili privučene u doboš koji se okreće ili prenesene pomoću magneta sa jednog transportera na drugi i tako se odvajaju od onih koje nisu magnetne;

• *elektrostatičko odvajanje* koristi različite električne osobine materijala; zasniva se na pojavi privlačenja naboja različitog znaka i odbijanja naboja istog znaka; to je jedini postupak za odvajanje cirkona od rutila, koji se nalaze u nekim peščanim sprudovima;

• *gravimetrijski postupci*, od kojih je najpoznatiji ispiranje zlata. Oni se zasnivaju na razlici u gustini rude i jalovine, odakle potiču različite brzine sedimentacije u fluidu (tečnom ili gasovitom). Uređaji koji služe za ovu vrstu pripreme sadrže, pored ostalog, samoispirače, pokretne stolove, taložnike. Ovaj poslednji metod zasniva se na korišćenju sredine čija se gustina nalazi između gustine jalovine i rude. Jedna lebdi dok se druga skuplja na dnu separatora. Upravo na gravimetrijskim postupcima zasniva se flotacija, postupak koji se danas najviše koristi. Kaže se da su ga znali i Grci, koji su vadili zlato iz blata jednog jezera, koristeći se perjem natopljenim katranom. Fino samlevena ruda se potapa u tako izabranu tečnost da ova kvasi samo jalovinu. Ubrizgavanje vazduha izaziva potom stvaranje mehura oko čestica rude, koje plivaju po površini. Ruda se vadi sa penom; nasuprot tome, jalovina teče po dnu. Ako se neki minerali, kao talk i grafit, teško kvase, neizbežno je, u većini slučajeva, dodati neke reaktive, koji se nazivaju *kolektori*, da bi se promenio površinski napon. Tako je omogućeno da se uz pomoć selektivnih kolektora ne samo odvoji jalovina od različitih ruda, koje su istovremeno prisutne (rude cinka, olova i bakra), već da se takođe i rude odvoje jedna od druge. Prethodne operacije obično daju proizvode u obliku peska ili mulja koji je suspendovan u vodi. Zatim je potrebno smanjiti razblaženje. Za to se koriste klasifikatori, koji razdvajaju vrste peska, ili taložnici u obliki više ili manje gustih pumpi za odvajanje mulja. Neke hemikalije mogu ubrzati taloženje. Uklanjanje vode obavlja se filtriranjem pulpi sa centrifugama uz pomoć vakuuma. Voda se isisava kroz porozan materijal koji se nalazi na unutrašnjim zidovima rotirajućeg doboša. Dobija se kolač koji se suši pomoću pare i odvaja od filtra pomoću strugalice.

Obično se priprema rude završava sušenjem u rotacionim pećima, koje su u obliku velikih blago nagnutih cilindara, na čijem jednom kraju ima gorionik na mazut. Ako, osim za sušenje, temperatura služi i za pretvaranje proizvoda da bi se olakšala potonja prerada, onda se govori o *prženju*, npr., prženje pirita.

AGLOMERACIJA. U nekim operacijama prerade rude neizbežno je da se praškasti proizvodi aglomeriraju. To naročito važi za rude gvožđa koje se prerađuju u visokoj peći: gasovi bi teško prolazili kroz sitan prah, koji bi začepio prolaze. Ova operacija aglomeracije naziva se još i *sinterovanjem* ili *briketiranjem*, prema tome da li se obavlja na visokoj temperaturi ili uz dodatak veziva uz potonje pečenje ili zbijanje na presi.

PRERADA RUDA (ILI REDUKCIJA). Sastoji se u odvajanju metala iz rude. Sa nekim izuzecima koji se odnose na metale nađene u elementarnom stanju, u pitanju su hemijski postupci, a način prerade se mora podesiti prema različitim grupama ruda.

Metali u elementarnom stanju. Osim već spomenutih gravimetrijskih metoda u preradi ruda (ispiranje), treba navesti:

— *topljenje sa šljakom*, u toku koga se jalovina i metal rastopljeni odvajaju zbog različite gustine (rude bakra);

— *rastvaranje*, koje se vrši selektivno pomoću rastvarača koji rastvaraju metal, ali ne i jalovinu (cijanidizacija zlata);

— *amalgamiranje* (v. *Metalurgija zlata*).

Oksidne i karbonatne rude. Prerada ovih ruda ima izuzetan značaj, ne samo zato što u ovu kategoriju spadaju metalurgije gvožđa, aluminijuma, magnezijuma, urana, već zato što se većina ostalih tipova ruda prevode pre redukcije u okside.

• *Oksidne rude* se redukuju pomoću redukcionih sredstava velikog afiniteta prema kiseoniku, kao što su ugljenik, ugljen-monoksid, pa i neki drugi metali (aluminotermija); ako je industrijska temperatura redukcije niža od temperature topljenja metala, u pitanju je redukciona kalcinacija (volfram); ako je viša, onda je reč o redukcionom topljenju (metalurgija gvožđa, olova, kalaja itd.), najzad, ako je temperatura viša i od tačke ključanja metala, onda je posredi redukciono ključanje (cink, živa); neki vrlo stabilni oksidi (oksid aluminijuma, urana itd.) ne mogu se ili se teško redukuju uobičajenim redukcionim sredstvima; tada se koristi neka od sledećih metoda:

— *mešanje sa rudom koja se može redukovati*; tada je proizvod redukcije legura (mesing, legure gvožđa):

— *elektroliza* ili rastop, koja se obavlja sa rastopljenim smešama (oksid aluminijuma i kriolit), ili elektroliza u vodenoj fazi;

— *rastvaranje i potom taloženje*; u svim slučajevima gde se ima posla sa stabilnim oksidima i gde se nečistoća redukuje lakše od željenog metala, pogodno je da se oksid prethodno prečisti kako se ne bi dobio vrlo nečist metal.

• *Karbonatne rude* se prevode u okside pečenjem, u toku čega se karbonati raspadaju oslobađajući ugljendioksid.

Silikatne rude. Obično se vrlo teško redukuju. To se, međutim, može učiniti na visokoj temperaturi sa garnieritom, kompleksnim silikatom gvožđa i nikla. Dobija se fero-nikl. Ali više je uobičajeno da se silikati pretvore u sulfide pomoću sulfidnog topljenja u prisustvu kalcijum-sulfata i ugljenika. Dobijeni proizvod se naziva *kamenac*.

Sulfidne rude. Sulfidi se mogu pretvoriti u okside pečenjem. Oslobađaju se sumporni gasovi. Zatim se oksidi redukuju. Ponekad se i sumpor pre pečenja može koristiti kao reduktor. Ako ruda sadrži sulfide nečistoća koje treba odstraniti, može se obaviti postupak topljenja kamenca. To je pečenje i topljenje sa šljakom, u toku koga se neželjene primese uklanjaju u obliku oksida u šljaki. Najzad, sulfidne rude se često prerađuju rastvaranjem i taloženjem.

PREČIŠĆAVANJE METALA

Preradom ruda dobija se sirovi metal, koji sadrži obično mnoge primese, kojih se treba osloboditi da bi metal dobio pogodne osobine, pošto vrlo mali sadržaj nečistoća može znatno uticati na električnu provodljivost, mehaničku otpornost, otpornost prema koroziji. U nekim slučajevima u pitanju su primese skupocenih metala koji se žele odvojiti (odvajanje srebra od olova). Glavni metodi prečišćavanja su sledeći.

POSTUPCI APSORPCIJE NEČISTOĆA. Sastoje se u dejstvu neke materije koja se selektivno jedini sa nečistoćama obrazujući šljake lakše od metala ili isparljive proizvode. Npr., da bi se uklonio bakar iz olova, dodaje se sumporni prah u kupatilo za topljenje; da bi se uklonilo srebro, dodaje se cink, koji sa srebrom stvara određena jedinjenja. Kalaj se oslobađa od antimona pomoću hlora, koji obrazuje isparljive hloride itd. Metod pomoću oksidacije je poseban postupak. Sredstva za prečišćavanje su oksidujuća (kiseonik, vazduh, nitrati, sulfati, oksidi), koja reaguju sa nečistoćama koje su sklone oksidaciji više od metala i daju šljake koje plivaju na površini ili gasove. Najpoznatiji primer je prečišćavanje rastopa u konvertoru, gde kiseonik iz vazduha radije reaguje sa ugljenikom. Operacija se mora voditi do oksidacije samog metala, tako da se u završnoj fazi izvrši redukcija sredstvima koja nisu štetna.

METODI TERMIČKOG RAZLAGANJA. To je obrnuti postupak od prethodnih. Dejstvuje se nekim hemijskim sredstvom koje obrazuje gasovito jedinjenje sa metalom koji treba prečistiti. Ovo jedinjenje se odvaja od nečistoća a zatim razlaže na visokoj temperaturi dajući čisti metal. Takvo je, npr., prečišćavanje nikla po Mondovom postupku, gde ugljenmonoksid na 100°C obrazuje gasoviti karbonil nikla, koji se zatim razlaže na 180°C.

ODVAJANJE STAPANJEM. Sastoji se u odvajanju, zbog različitih gustina, nečistoće od rastopljenog metala sa kojim se ona ne meša. Tako se odvaja olovo od cinka.

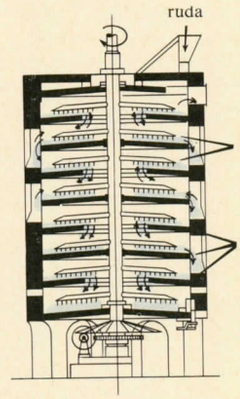
ZONSKO TOPLJENJE. Ovaj postupak se uglavnom koristi u laboratorijama, ali i u industriji za proizvodnju poluprovodnika (germanijum, silicijum). Njime se može postići vrlo visoka čistoća. Na određenoj temperaturi čvrsti i tečni metal u ravnoteži nemaju isti sadržaj nečistoća. Ako se otapa usko područje šipke ono se obogaćuje nečistoćama. Pomerajući ga duž šipke uvek u istom smeru, nečistoće se skupljaju ka istom kraju šipke. U praksi se usko otopljeno područje ostvaruje indukcionim zagrevanjem sa induktorom od jednog ili dva zavoja. Sve više se radi sa lebdećim područjem, tj. bez suda za topljenje. Šipka je u vertikalnom položaju i površinski napon ne dozvoljava da rastop isteče.

DESTILACIJA. Ovaj metod koristi se različitom isparljivosti metala i nečistoća. Tako se prečišćava cink oslobađanjem od kadmijuma i olova frakcionom destilacijom. Ovaj metod se znatno širi zbog razvoja metalurgije u vakuumu. U vakuumu temperature kljućanja se znatno snižavaju. Stapanje u vakuumu je dobar način prečišćavanja: isparljive nečistoće se uklanjaju. Grejanje se ostvaruje električno: otporno, indukciono, lučno. Bombardovanje elektronima, koje se vrši u visokom vakuumu, koristi se sve češće, čak i izvan laboratorija. Zagrevanje se postiže usporavanjem elektrona koji se izbacuju velikom brzinom iz elektronskog topa na metal koji se stapa. U vakuumskom stapanju često je nedostatak nedovoljna čistoća suda za topljenje koja ograničava prečišćavanje metala. Ova prepreka se uklanja tako što se topljenje vrši na ognjištu ili u sudu za topljenje sa pokretnim dnom od bakra koje se hladi tekućom vodom, ili stapanjem u sopstvenom sudu za topljenje, tj. na taj način što spoljni deo metala ostaje u čvrstom stanju. Najusavršeniji metod sastoji se u stapanju bez ikakvog suda za topljenje, pomoću lebdenja. Grejanje se vrši indukciono i metal se nalazi u takvom magnetnom polju da je podvrgnut silama koje ga održavaju da lebdi. Ovaj postupak se koristi samo laboratorijski.

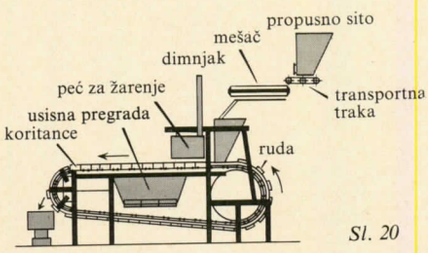
ELEKTROLIZA je vrlo uobičajen metod prečišćavanja. Metal koji treba prečistiti predstavlja anode u elektrolitičkoj ćeliji. One se malo-pomalo rastvaraju u elektrolitičkom kupatilu, a prečišćeni metal se taloži na katodama. Metal koji treba prečistiti može se pretvoriti u so i vršiti elektroliza bilo rastopljene soli bilo njenog rastvora.

METALURŠKI POSTUPCI

KALCINACIJA. Ovaj izraz se upotrebljava za operacije suvim putem, u toku kojih se proizvodi ne stapaju. On se naročito upotrebljava da bi se označile one operacije čiji je cilj razlaganje karbonata u okside. Ali i sušenje, kome je cilj uklanjanje vlage, kao i pečenje, koji se naročito koriste za pretvaranje sulfida u okside su kalcinacije. Glavni postupci su:



Sl. 19
Peć Hereshof (Herreshoff)



Sl. 20

• *pečenje na gomili* zanimljivo je jedino u istorijskom smislu;

• *jamasta peć*, čiji je prototip peć za kreč; ovaj tip peći koristi se za kalcinaciju železne rude (karbonat železa) i kalamine (karbonata cinka); glavni joj je nedostatak što se ne može puniti prahom koji bi zapušio prolaze za gasove i ugušio reakciju;

• *rotaciona peć*, potiče od peći za cement; to je jedan gotovo horizontalni cilindar čiji je unutrašnji zid obložen vatrostalnim materijalom i koji se lagano okreće oko svoje ose; na nesreću, stvara se mnogo prašine koju gasovi povlače za sobom, a postoji i opasnost od lepljenja sulfida po zidovima, naročito u toplim delovima;

• *plamena peć* je stari uređaj čije je održavanje bilo mučno, postepeno se usavršio i njegov današnji oblik je peć sa ognjištima jednim iznad drugog, tipa Hereshof (Herreshoff, *sl.* 19); lopatice nazvane »žarači«, koje nosi centralna osovina, obezbeđuju kretanje rude od ognjišta do ognjišta odozgo nadole u suprotnom smeru od gasova;

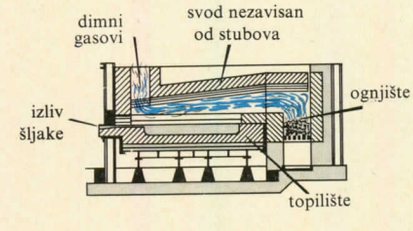
• *pečenje uz aglomeraciju* je vrlo uspešan postupak koji daje porozne aglomerate i olakšava potonju redukciju jer omogućuje lak prolaz redukcionih gasova; moderni uređaji za pečenje uz aglomeraciju su Dvajtove i Lojdove (Dwight, Lloyd, *sl.* 20) rešetke; sirova ruda se sipa u tankom sloju na pokretnu rešetku, koja je odnosi pod jedan gorionik; vazduh se usisava kroz rudu preko jedne pregrade koja se nalazi pod rešetkom; treba napomenuti da se ovaj postupak koristi isto tako za aglomeraciju nesulfidnih proizvoda kao što je prah železne rude kojem je dodat koks;

• *pečenje u suspenziji*, u kome se primenjuje princip kotlova sa sprašenim ugljenom. Smeša fino mlevene rude i vazduha uduvava se u komoru za sagorevanje. Iskorišćavaju se oslobođene kalorije usled reakcije u kotlu. Pre uklanjanja treba ispirati gasove pošto sadrže mnogo prašine. Pečenje u pokretnom sloju srodno je pečenju u suspenziji.

TOPLJENJE je operacija koja ima veliku važnost u metalurgiji. Samo da bismo se podsetili, ovde treba pomenuti topljenja metala i legura koja se koriste kao postupci za oblikovanje, da bi se obratila pažnja na topljenja uz hemijske promene, koja se sreću kod prerade gotovo svih ruda: oksidaciono topljenje; topljenje pod šljakom radi oslobađanja od jalovine; redukciono topljenje; topljenje sa taloženjem u toku koga se metal nekog sulfida zamenjuje drugim; sulfidno topljenje za prevođenje silikata u sulfide; itd. Najviše korišćene topioničke peći za preradu ruda su peći sa trupom, peći sa topilištem i peći sa loncem.

• *Peći sa trupom.* Najpoznatiji primer je visoka peć železare. Ali i peć sa vodenom oblogom, koja se koristi u metalurgiji bakra, olova itd. pripada ovom tipu peći. Njena osobenost i ime potiču od suda načinjenog od čeličnih ploča, koji se nalazi u donjem delu peći. Šljaka obrazuje jedan izolacioni sloj na zidovima suda, što povećava toplotno iskorišćenje. Gorivo, koks, i ruda ubacuju se u peć odozgo u slojevima jedan za drugim. Na donjem delu se pomoću duvnica uduvava vazduh pod pritiskom. Rastopljeni materijal se sliva u donji deo u lonac, koji je snabdeven otvorima za izlivanje.

• *Peći sa topilištem ili plamene peći* (*sl.* 21) imaju ognjište povezano sa radionicom u kojoj se obavlja



Sl. 21

topljenje. Materijal za stapanje nije u dodiru sa gorivom. On se zagreva plamenom iz ognjišta koji prolazi između topilišta i svoda prema dimnjaku. Jedan odušak omogućuje da se radionica održava pod natpritiskom u odnosu na okolinu, tako da je ognjište potpuno ispunjeno plamenom, a spoljni vazduh ne ulazi.

Jedna varijanta u razvoju je rotaciona peć za topljenje. Sastoji se od vodoravnog cilindra od lima, obloženog sa unutrašnje strane vatrostalnom opekom. Na jednom kraju je spojen sa gorionikom (na gas, mazut ili strošeni ugalj), a na drugom sa odvodom gasova. Cilindar ima otvor za izlivanje. Izlivanje se vrši tako što se peć okrene na točkićima oko svoje ose.

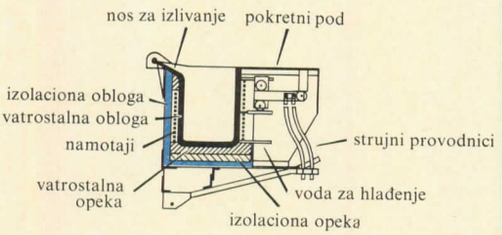
• *Peći sa loncima.* U ovim pećima materijal koji se topi nije u dodiru ni sa gorivom ni sa gasovima sagorevanja. One su, prema tome, pogodne za topljenja sa zaštitom od zagađenja, a naročito za metale koji se lako oksidišu. Moderne peći sa loncima mogu se naginjati.

Ipak je pojava električnog topljenja znatno smanjila upotrebu ovih peći.

ELEKTROMETALURGIJA. Svi metalurški postupci u kojima se kao izvor toplote koristi električna struja, tj. zagrevanje otporom, indukcijom i lukom, pripadaju elektrometalurgiji. Osim toga, ovde treba dodati elektrohemijske postupke mokrim i suvim putem.

• *Otporne peći.* U svim tim pećima grejanje se proizvodi Džulovim (Joule) efektom, tj. prolazom električne struje. Razlikuju se po vrsti otpora koji se koriste. Oni su bilo metalni (nikl-hrom ili gvožđe-hrom-aluminijum ili teško topivi metali [molibden, platina]), bilo od ugljenika ili od karborunduma (karbid silicijuma), bilo još tečni (kupatilo stopljene soli).

• *Indukcione peći.* U ovim pećima metal koji se topi predstavlja neku vrstu sekundara transformatora u kratkom spoju. Jedan induktor čiji navoji okružuju metal, indukuje u njemu električne struje, koje zagrevaju Džulovim efektom. Razlikuju se peći sa magnetnim jezgrom (niska učestanost), koje se koriste za neželezne metale i visokofrekventne peći (*sl.* 22). Ove peći, vrlo upotrebljavane u čeličanama, imaju preimućstvo da izazivaju mešanje tečnog kupatila usled dejstva sila magnetnog porekla.



Sl. 22

• *Elektrolučne peći.* Izvor toplote potiče od električnog luka koji nastaje između jedne ili više elektroda i kupatila metala u rastopu. Elektrode se sastoje od grafita. One su proizvedene od koksa kome su dodati smola i katran. Peku se bilo u specijalnoj peći pre upotrebe, bilo u elektrolučnoj peći postepeno prilikom njihovog spuštanja zbog abanja, te se nazivaju neprekidne elektrode ili Zederberg (Söderberg) elektrode.

U nekim slučajevima sam metal koji se topi sačinjava elektrodu koja se naziva »potrošnom elektrodom«.

• *Elektroliza.* Elektrolit je materija u kojoj se molekuli razlažu u jone, koji nose električne naboje, pozitivne ili negativne. Ako se u elektrolit potope dve elektrode između kojih postoji potencijalna razlika, one privlače jone. Oni koji su pozitivni ili katjoni, a to je slučaj sa metalnim jonima, upravljaju se prema elektrodi koja je na negativnom potencijalu, katodi; oni tamo gube svoj naboj i metal se taloži. Obratno, negativni joni, anjoni, se upravljaju prema elektrodi koja je na pozitivnom potencijalu, anodi. Tako teče struja i Faradejev zakon omogućuje da se izračuna količina metala koji se taloži na katodi. Joni mogu takođe pri pražnjenju na elektrodama da izazivaju sekundarne reakcije i da oslobađaju gasove.

Razlikuju se postupci sa nerastvornim anodama, u kojima se metal u obliku soli nalazi u elektrolitičkom, kupatilu (metalurgija aluminijuma, cink itd.), i postupci sa rastvornim anodama, u kojima se ove sastoje od metala koji treba da se prečisti. U prvom slučaju prema prirodi upotrebljene soli radi se u vodenoj sredini ili na visokoj temperaturi u rastopu soli: to je elektroliza rastopa (v. **Metalurgija aluminijuma**).

Tehnike prerade

Metalurgija gvožđa i čelika

OPŠTI PRINCIPI

SHEMA PROIZVODNJE ŽELEZNIH PROIZVODA. Proizvodi metalurgije gvožđa i čelika dobijaju se redukcijom železne rude (oksid železa) dejstvom ugljen-monoksida koji nastaje sagorevanjem koksa. Operacija se obavlja u visokoj peći i smisao tog uređaja je takav da se rastopljeno železo u belom usijanju sliva preko koksa rastvarajući ugljenik. Proizvod koji se dobija na dnu visoke peći je legura železa i ugljenika: gvožđe. Ne postoji ekonomičan metod da se neposredno dobiju proizvodi sa manje ugljenika, tj. čelici. Njihova proizvodnja, prema tome, zahteva da se sagori deo ugljenika koji ono sadrži.

Ova operacija se ostvaruje u konvertorima, u Martenovoj peći, u električnoj peći ili u visokofrekventnoj peći.

OPŠTA SHEMA ŽELEZARE. Glavno postrojenje tvornice je visoka peć, gde se vrši redukcija rude železa. Koks i ruda se unose u peć odozgo. Topli vazduh se uduvava odozdo. Železo u rastopu i rastopljena jalovina, troska, teku naniže, gde se na dnu peći skuplja gvožđe, legura železa i ugljenika. Proizvodi sagorevanja, koji sačinjavaju gas visoke peći, odlaze nagore.

Ostali delovi tvornice su peći za koks, za proizvodnju koksa pečenjem kamenog uglja, postrojenja za aglomeraciju rude, predgrejači za zagrevanje vazduha i duvnice za njegovo uvođenje u visoku peć, postrojenja za prečišćavanje gasova, postrojenja za njihovo pumpanje i hlađenje, materijal i, najzad, uređaji za rukovanje punjenjem i odlivcima.

Tečno gvožđe se u loncima prenosi u čeličanu gde se nalaze konvertori. Najzad, tvornica je snabdevena valjaoničkim linijama za izradu poluproizvoda.

EKONOMSKA RAZMATRANJA. Uprkos razvoju metalurgije neželeznih metala, metalurgija železa zadržava prevashodni značaj u modernoj ekonomiji, i moć jedne zemlje često se meri tonama proizvedenog čelika.

Uvođenje metalurgije železa zavisi, pre svega, od neophodnih osnovnih sirovina: koksa kamenog uglja i ruda železa. Međutim, u nekim zemljama, kao što je Švedska, koja ne raspolaže koksom, jedna vrlo stara metalurgija železa koja je upotrebljavala drveni ugalj i koja je držala prvo mesto u svetskoj industriji, danas se modernizovala i zauzima značajno mesto po kvalitetu svojih proizvoda. Da bi se uravnotežili izvori rude železa i koksa, stvorena je 1952. Evropska zajednica za ugalj i čelik (C.E.C.A.) od šest zemalja članica: Nemačke, Francuske, Belgije, Luksemburga, Italije, Holandije.

Takođe prisustvo koksa ili rude železa, ili, u nekim posebnim slučajevima, tradicija u metalurgiji železa zasnovanoj na drvenom ćumuru, ili blizina izvora hidroelektrične energije, objašnjavaju geografski raspored metalurgije železa u Francuskoj. Tako se velika koncentracija železara nalazi na istoku, na rudi Lorena, i na zapadu, na kamenom uglju.

PROIZVODNJA GVOŽĐA

OSNOVNE SIROVINE. Glavna osnovna sirovina je ruda železa. Ova se ruda redukuje koksom, čije se sagorevanje obezbeđuje dovođenjem vazduha. Konačni sastav gvožđa podešava se raznim dodacima.

Ruda železa. Železo, koje je vrlo rasprostranjeno u Zemljinoj kori, nalazi se u njoj naročito u obliku oksida i karbonata.

Rude se mogu svrstati prema njihovom mineralnom sastavu. Magnetit, železni oksid Fe_3O_4, aglomerat crnih kristala, zbijenih i magnetnih, sačinjava vrlo bogatu rudu u švedskoj Laponiji (sadržaj železa 72 %). Crveni hematit, oksid Fe_2O_3, sačinjava »red ore« (crvena ruda) Sjedinjenih Država (sadržaj železa 70 %). Mrki hematit ili limonit, hidratisani oksid $Fe_2O_3.3H_2O$ sačinjava »brown ore« (mrka ruda) Sjedinjenih Država i »minette« (sitna ruda) u Lorenu. Siderit, karbonat $FeCO_3$, sačinjava železnu rudu basena Bilbao. Hlorita, kompleksnog silikata zelenkaste boje, ima mnogo u donjim slojevima Lorena. Glaukonit, kompleksni silikat, sačinjava velika rudišta niskog sadržaja u SSSR.

Jedna od najvažnijih karakteristika rude je njen *pokazatelj bazičnosti,* koji određuje kvalitet troske. On se određuje prema odnosu kreča, CaO, i kremena, SiO_2, koje ruda sadrži. Ako se vrednost nalazi između 1,4 i 1,5, kaže se da je bazičnost »normalna«, a troska samotopljiva. Silikatne rude imaju niži pokazatelj bazičnosti od normalnog; njima treba dodavati krečnjaka, dolomita ili fluorita. Krečnjačke rude imaju veći bazični pokazatelj od normalnog.

Druga važna karakteristika je *sadržaj fosfora.* Prisutan u obliku fosfata, on se ne može ukloniti u visokoj peći i sav pređe u gvožđe. Njegov uticaj je štetan na mehaničke osobine železnih proizvoda. Nefosforne rude ($P < 0{,}045\,\%$) nose naziv *hematitne rude* ili *Besemer* (Bessemer). One daju hematitno gvožđe visokog kvaliteta, za preradu u Besemerovom konvertoru ili u kiseloj Martinovoj peći. Nasuprot tome, rude u Lorenu imaju dosta fosfora ($P/Fe > 1{,}7\,\%$). One daju Tomasovo (Thomas) gvožđe koje treba preraditi u baznom konvertoru.

Sledeća karakteristika je sadržaj sumpora, koji je takođe štetan po kvalitet železnih proizvoda, ali glavno unošenje sumpora u visoku peć potiče od koksa. Treba ukazati da manganske rude služe u proizvodnji gvožđa za prečišćavanje, pošto mangan ima sposobnost da uklanja sumpor.

Fizičke karakteristike rude su takođe važne. Ako je ona suviše trošna ili ako ima sklonost ka prskanju pri zagrevanju, tako stvorena prašina zagušiće visoku peć.

Priprema ruda, čiji je cilj da se dobiju homogeni proizvodi postojane granulometrije, neophodna je da bi rad visoke peći bio ravnomeran. Posle sitnjenja i obogaćivanja, rude se aglomeriraju. U Grinovaltovom (Greenawalt) postupku koriste se nepomične zatvorene pregrade, povezane sa ventilatorima, koji duvaju plamen. U Dvajtovom i Lojdovom (Dwight,

Lloyd) postupku ruda se aglomeriše neprekidno na pokretnoj rešetki (v. *rešetke za aglomeraciju, sl.* 20). U postupku A.I.B. koriste se pokretne pregrade, koje kotrljajući elementi transportuju do nepomičnih pregrada za usisavanje.

Otpaci železa sačinjavaju vrlo važan izvor polaznih sirovina za metalurgiju železa. Naročito se koriste u Martinovim čelicima ili u elektročelicima, ali se unose i u visoku peć. Oni moraju biti bez štetnih metala Pb, Zn, Sb).

Dodaci. Pri punjenju visoke peći potrebno je dodavati određene materijale. Uglavnom manganove rude i krečni kamen.

• *Manganova ruda* ima suštinsku ulogu da vezuje kiseonik i sumpor. Jedan deo ostaje u čeliku (0,3 do 0,7 % je tekući sadržaj). Sama ruda železa ima izvesnu količinu mangana, ali se obično mora dopuniti manganovim rudama koje su retke. Modernim metodima pokušava se smanjiti dodatak ponovnim uključivanjem u proces šljake koja sadrži mangana.

• *Krečni kamen* je krečnjak koji je poželjno dodavati kada je ruda železa suviše silikatna, da bi se uspostavio bazni pokazatelj i troska bila samotopiva.

Metalurški koks. Gorivo koje se koristi u visokim pećima ne može biti ni drvo, čija je temperatura gorenja suviše niska, ni kameni ugalj, čije stapanje između 350 i 500°C smanjuje potrebnu propustljivost peći. Prve visoke peći bile su punjene drvenim ugljenom. Ali za visoke peći najviše pogoduje upravo koks, dobijen suvom destilacijom kamenog uglja, gorivo koje se ne stapa, bogato ugljenikom, otporno i propustljivo.

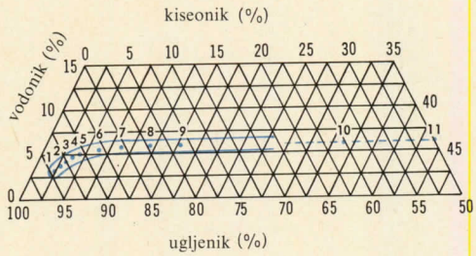
Zatrpani u zemlji biljni materijali se razlažu do obrazovanja lignita. Pretvaranje u kameni ugalj se događa uz obogaćivanje materijala ugljenikom, oslobađanje od kiseonika do mrkih ugljeva, zatim uz oslobađanje od vodonika do antracita (*sl.* 23). Ugalj zagrevan u odsustvu vazduha raspada se oslobađajući isparljive materije uz jedan promenljivi ostatak. Ugljevi koji nisu ni suviše posni ni suviše masni, dakle oni za koksovanje, proizvode koks stapanjem u jednu masu koja se nadme usled oslobađanja gasova. Peći za koksovanje (*sl.* 24) sastoje se od serija ćelija dužine oko 12 m, visine 4 m, širine 400 mm, koje se pune ugljem. Ćelije odvojene komorama za zagrevanje, grupisane su u bateriju od 50 do 75. Zidovi u kojima se nalaze komore obrazuju stubove svoda, oni su od silikatne opeke i dostižu temperature blizu 1360°C. Ćelije su zatvorene na svojim krajevima nepropustljivim čeličnim vratima. Ispod ćelija nalaze se regeneratori. Komore su podeljene u dve grupe, u one u kojima se vrši sagorevanje i one kroz koje se odvode gasovi ka regeneratorima. Komore naizmenično menjaju ove uloge. Na gornjem delu peći nalazi se cev za sakupljanje gasova. Operacija koksovanja traje trinaest do dvadeset časova. Koks se najpre vadi iz peći pa se zatim gasi zalivanjem i rešeta. Moderni postupak se sastoji u tome da se koks gasi suvim putem hlađenjem u struji inertnog gasa (azot, ugljen-dioksid) koji zagreva parnu kotlanu.

DOBIJANJE SIROVOG GVOŽĐA. Gvožđe se može proizvesti na dva načina, ili u visokoj peći ili u električnoj peći.

VISOKA PEĆ služi za dobijanje gvožđa redukcijom železne rude kojoj se dodaje koks i topitelj. U podnožju uređaja skuplja se rastopljena legura železa i ugljenika ili gvožđe, po kome pliva troska koja nastaje od jalovine, topitelja i pepela od goriva.

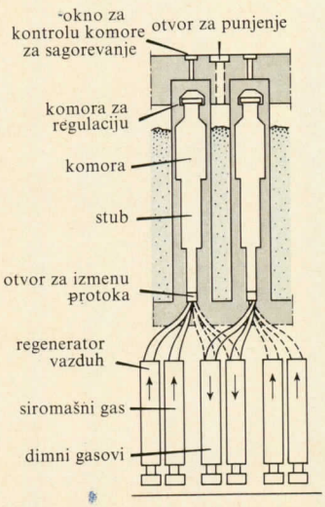
Opis. To je peć sa trupom velikih dimenzija (*sl.* 25). Gornji deo se naziva *ždrelo peći*: kroz njega se unose naizmenično u slojevima ruda i koks kolicima sa dnom koje se otvara ili pomoću pokretnih gvozdenih korpi (skip). Punjenje se obavlja kroz jednostruko ili dvostruko zvono, koje obrazuje pregradu i sprečava gubitak visokopećnog gasa. Trup je konusan i njegov nagib je tako proračunat da podešava spuštanje sirovina uz što manje trenje o zidove. *Trbuh peći* je deo peći sa najvećim prečnikom. *Sedlo* je konusno; njegov nagib omogućuje da se struja gasova ravnomerno raspodeli, da se ograniči opseg visokih temperatura i reguliše spuštanje zasipa koji postaje testast, a zatim tečan. Na gornjem delu pećice, u *zoni duvnica*, nalaze se duvnice za vazduh, obično njih dvanaest. Na jednom nižem nivou nalaze se otvori za *ispuštanje troske*, obično dva otvora, koji se još nazivaju »duvnice za trosku«. Najzad, na dnu pećice nalazi se *otvor za ispuštanje sirovog* gvožđa. Zidovi visoke peći se sastoje od slojeva vatrostalne opeke, koje su sa spoljne strane okružene oklopom, koji je u modernim rešenjima od zavarenih čeličnih limova. Da bi se obezbedilo njihovo hlađenje, postoje komore ugrađene u zidove iz kojih teče voda niz oklop. Isto je tako važno da se tekućom vodom hlade duvnice za vazduh i za trosku.

Način rada. U visokoj peći nastaju mnogobrojne reakcije između ugljenika i njegovih gasovitih oksida, rude železa i jalovine. Poznavanje rada visoke peći, koje je spadalo u oblast zanatstva, postaje sve više jedna nauka shodno razvoju saznanja u pogledu hemijskih ravnoteža i kinetika koje se događaju u njoj. Na datoj temperaturi i pritisku dobro je poznat sastav smeše ugljen-monoksida i ugljen-dioksida u ravnoteži sa ugljenikom. Ukoliko je temperatura viša, utoliko je procenat ugljen-monoksida veći. Pod tim uslovima oksidi železa biće redukovani, tj. kiseonik tih oksida vezaće se sa ugljen-monoksidom stvarajući ugljen-dioksid. U visokoj peći temperatura raste zahvaljujući sagorevanju koksa na nivou duvnica u vrućem vazduhu, koji se ponekad obogaćuje kiseonikom; dakle, najviša temperatura je na donjem delu sedla, gde dostiže 2000°C i postepeno opada prema gore do 100°C kod ždrela peći. Isto tako i sadržaj ugljen-monoksida opada od sedla, gde iznosi blizu 100 %, do ždrela gde nije veći od 30 %. Pri spuštanju zasipa događaju se sledeće glavne pojave: u gornjem delu trupa isparavanje vlage; u donjem delu trupa disocijacija karbonata železa i redukcija oksida železa ugljen-monoksidom; u trbuhu se obavlja disocijacija kalcijum-karbonata iz jalovine i krečnjaka, redukcija zaostalih oksida železa, obrazovanje topljivih silikata reakcijom sa silicijum-oksidom i topljene troske i sirovog gvožđa; najzad, u pećici sagoreva koks, gvožđe se sliva niz užareni koks i obogaćuje se ugljenikom; u neposrednom dodiru sa tečnom troskom gvožđe se oslobađa sumpora.



0. grafit 1. antracit 2. mršavi ili antracitni 3. četvrtmasni 4. polumasni 5. masni za koksovanje 6. pravi masni 7. masni lako sagorljivi 8. suvi lako sagorljivi 9. ligniti 10. treseti 11. drvo

Sl. 23. Promena elementarnog sastava drveno-kamenih ugljeva.



Sl. 24

Sl. 25

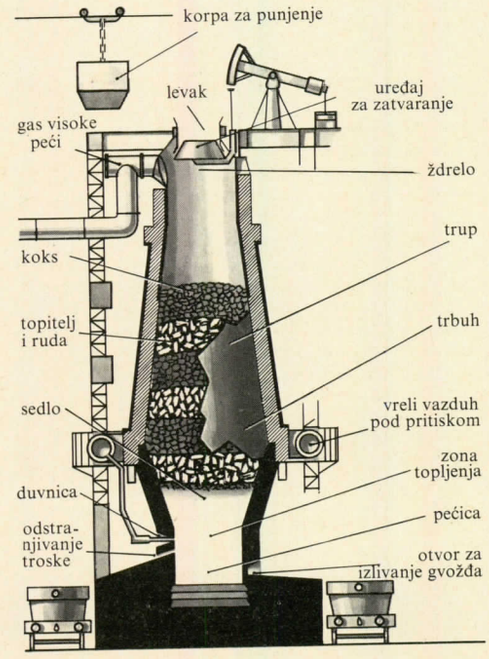
Izlivanje troske. Troska, proizvod stapanja jalovine i krečnjaka, je smeša silicijum-oksida, kalcijum-oksida i aluminijum-oksida. Ona se izliva u lonac, zatim se izručuje na ravnu površinu ili se izliva u kanale. Posle drobljenja dobijeni materijal se koristi kao nasipni materijal za železničke pruge ili za pokrivanje puteva. Troska se takođe može izliti u veliku količinu vode, što izaziva njeno usitnjavanje. Takođe se koristi za izradu cementa. Služi i za izradu jedne vrste staklene vune, u staklarstvu ili kao đubrivo.

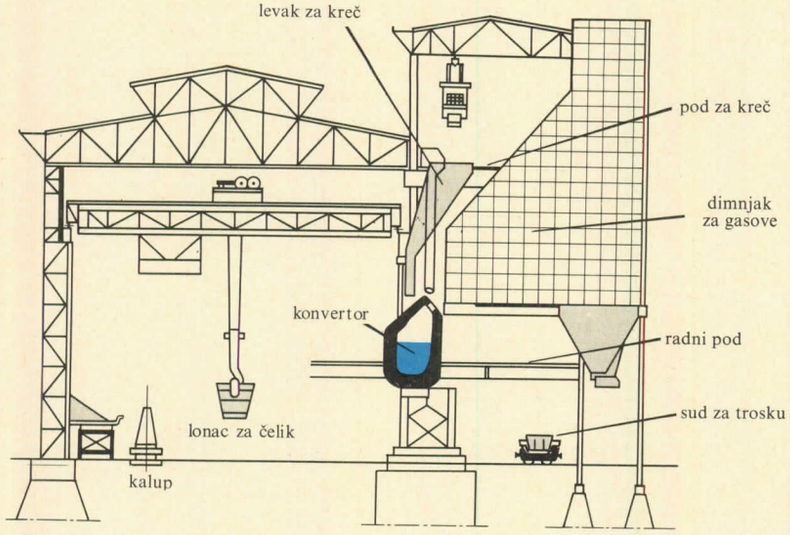
Izlivanje gvožđa. Ostvaruje se četiri do šest izlivanja za dvadeset četiri časa, svako od 50 do 100 tona. Sirovo gvožđe se izliva u »hali«; metal se prihvata u centralni kanal i upravlja prema naročitim udubljenjima. Posle hlađenja ono se odvaja na »poluge«. Ove se najpre pretapaju u kupolnoj peći topionice ili u plamenoj peći pre livenja u kalupe od peska. Gvožđe za prečišćavanje prihvata se u tečnom stanju na izlazu iz visoke peći u velike lonce i u tim sudovima se prenosi do čeličane. Završetak desulfuracije sve više se obavlja u tim sudovima dodavanjem rastopu natrijum-karbonata.

ELEKTRIČNA PEĆ. Po Tislad-Holovom (Tysland-Hole) postupku ili u niskoj električnoj peći železna ruda se redukuje prolaskom električne struje između dve grafitne elektrode. Ovaj metod treba da se razvije u pravcu prethodnog zagrevanja i prethodne redukcije šarže.

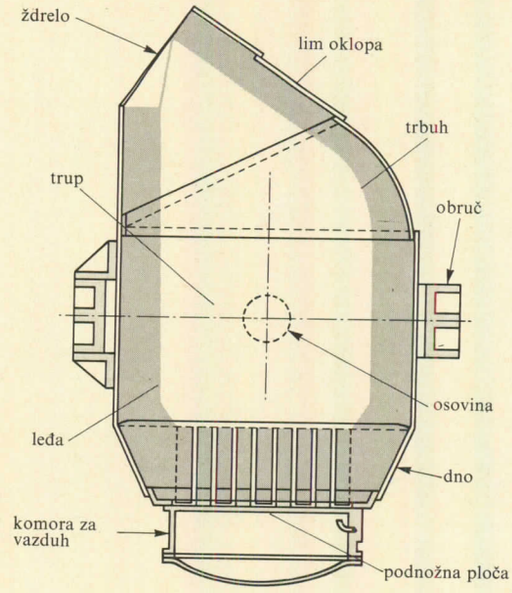
PROIZVODNJA ČELIKA

IZRADA TOMASOVOG (THOMAS) ČELIKA. Gvožđe dobijeno u visokoj peći je legura železa sa više od 2 % ugljenika. Da bi se dobio čelik, ovaj postotak treba smanjiti. Ovo se postiže uduvavanjem vazduha u tečno gvožđe, pri čemu sagoreva ugljenik. Ovaj postupak je otkrio Englez Besemer (Bessemer) 1855. Ali kisela alumosilikatna obloga Besemerovog konvertora ne dopušta preradu gvožđa koje sadrži fosfor i za koje je potreban kreč da bi se fosfor preveo u šljaku. Godine 1876. Englezi S.





Sl. 26
Shematski presek klasične Tomasove čeličane.



Sl. 27
Shema Tomasovog konvertora.

Tomas i P. Džilkrist (Gilchrist) omogućili su bazno oblaganje na osnovi dolomita. Tako je bilo omogućeno da se preradi Tomasovo gvožđe, proizvod ruda iz Lorena, koje sadrže fosfora; dobija se Tomasov čelik koji, upravo zbog načina prerade, sadrži malo ugljenika i malo stranih elemenata. To daje odlične osobine u pogledu kovnosti.

Tomasova čeličana. U hali sa mešalicama (*sl.* 26) lonci sa rastopljenim gvožđem iz visoke peći izlivaju se u mešalice od oko 1000 tona. Njihov zadatak je da obrazuju skladište rastopljenog gvožđa potrebnog za rad čeličane, da održavaju temperaturu gvožđa i ublažavaju razlike u sastavu. Konvertori ili retorte (*sl.* 27) poređani su u konvertorskoj hali. Oni se sastoje od: jednog oklopa koji je sastavljen od limova iz tri dela, dna, trupa i kljuna; jednog obruča od livenog čelika; komore za vazduh, koja je spojena sa dnom; jednog uređaja za raspodelu vazduha koji pomoću dva otvora spaja komoru za vazduh sa osovinama; jednog uređaja za hidraulično upravljanje naginjanja konvertora da bi se ovaj napunio gvožđem, krečom, železnim otpacima i za izlivanje. Postoje dva radna poda; jedan je postavljen na nivou kljuna u položaju izlivanja i to je pravi *radni pod,* a drugi, *pod za kreč,* postavljen je na višem nivou. Izlivanje u lonac ili u kalupe obavlja se u hali za izlivanje. Najzad, postoji radionica za izradu dolomitne obloge konvertora.

Opis jednog livenja. Najpre se izvrši jedno za drugim punjenje krečom, rastopom sirovog gvožđa i otpacima železa. Zatim se konvertor ispravi i istovremeno počne uduvavanje gasa koji se sastoji ili od vazduha pod pritiskom, ili od vazduha obogaćenog kiseonikom, ili, čak, od čistog kiseonika. Za vreme ove operacije razlikuju se tri perioda: u toku prvog, koji traje dva do tri minuta, sagoreva silicijum uz pojavu plavičastog plamena; u toku drugog, koji traje oko deset minuta, sagoreva ugljenik uz bogato oslobađanje dima, prvo žućkastog, zatim belog, uz izbijanje varnica; za vreme trećeg perioda, koji traje tri minuta, odstranjuje se fosfor. Zaustavlja se duvanje. Zatim treba ukloniti fosforovitu šljaku, koja pliva po površini i od koje se dobija đubrivo. Najzad, pošto se ne može ukloniti ugljenik a da se čelik malo ne oksidiše, treba ga dezoksidisati. Zbog toga se u konvertor dodaje feromangan, koji je poželjno da bude u rastopljenom stanju. Tada se dodaju i drugi potrebni sastojci (ferohrom, feromolibden itd.) da bi se čeliku dale posebne osobine. Ako nema drugih dodataka osim dezoksidanta, dobija se uskipeli (neumireni) čelik, koji se tako zove zato što se u momentu izlivanja izdvajaju gasovi nastali prilikom reakcije kiseonika sa ugljenikom. Da bi se dobio umireni čelik, treba dodati elemente, npr., aluminijum, koji će vezati kiseonik u obliku aluminijum-oksida.

IZRADA MARTINOVOG ČELIKA. Toplota, neophodna za rad konvertora, dobrim delom se dobija sagorevanjem ugljenika, te su zbog toga moguće samo kratkotrajne operacije. Nasuprot tome, ako bi se koristio neki spoljni izvor toplote, imalo bi se mnogo više vremena za podešavanje sastava kupatila. To je ostvareno u Martinovoj peći, koja je, u stvari, plamena peć sa topilištem (*sl.* 21). Treba razlikovati dve operacije:

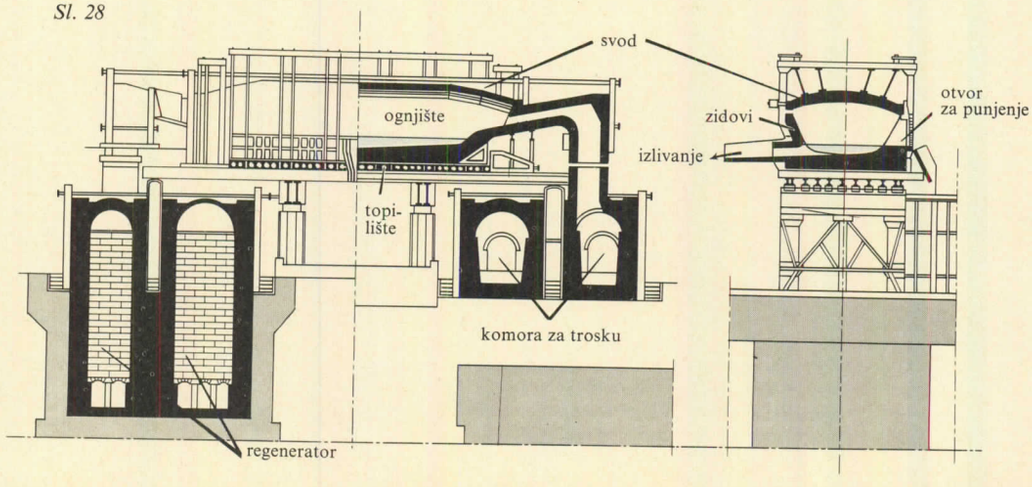
— *U procesu pretapanja otpadaka železa* punjenje se uglavnom sastoji od otpadaka, a udeo sirovog gvožđa se izračunava što tačnije, da bi sadržaj ugljenika bio zadovoljavajući.

— *U procesu prečišćavanja gvožđa* udeo gvožđa je vrlo velik, a plamen je vrlo oksidirajući da bi se uklonio ugljenik. Čak se vrši i uduvavanje kiseonika. Ali ovaj proces je mukotrpan ako gvožđe sadrži fosfora zbog nastajanja velike količine šljake. Zato se on slabo koristi u Francuskoj.

Martinova peć. Iz ekonomskih razloga vazduh i gorivo koji se šalju u gorionike Martinove peći (*sl.* 28) prethodno se greju prolaskom kroz rekuperatore, komore koje sadrže naslage opeka u kojima se sakuplja toplota, koja potiče od sagorelih gasova. Zato se periodično menja pravac proticanja gasova, pri čemu svaki rekuperator naizmenično prima sagorele gasove (period gasova), a zatim vazduh (period vazduha). Prethodno se iz dimova mora ukloniti prašina u naročitim taložnicima. Između otvora gorionika, koji se nalaze jedan prema drugom, nalazi se radni deo peći. On sadrži topilište, zadnji zid sa otvorom za izlivanje, prednji zid sa vratima za punjenje i rad i svod koji odbija toplotu plamena prema topilištu. Kao i u konvertorima, koristi se bazna Martinova peć ili kisela Martinova peć, već prema tome da li proizvod za preradu sadrži ili ne sadrži fosfora. U prvom slučaju topilište i zidovi su od dolomita ili magnezita. U drugom slučaju topilište i zidovi su od silikatnih materijala i ne može se prerađivati ruda koja bi reagovala sa oblogom. Zagrevanje se obavlja bilo mazutom, koji je prethodno zagrejan i raspršen, bilo katranom iz koksara, bilo generatorskim gasom, prirodnim gasom, gasom koksne peći ili mešanim gasom.

Rad Martinove peći. Peć se puni gvožđem, otpacima železa, feromanganom, krečom i krečnjakom u takvim proporcijama da sadržaj ugljenika na početku bude veći od 1 %, što je uslov za dobro prečišćavanje. Za vreme punjenja vrši se maksimalno zagrevanje. Sledeća faza je topljenje. Zatim sledi prečišćavanje na početku koga se dodaje železna ruda; stvara se šljaka koja uklanja nečistoće, a istovremeno se uklanja ugljenik usled oksidacione atmosfere peći. U toku rada topioničari čiste površinu kupatila odstranjujući šljaku uz pomoć lopata. Na kraju prečišćavanja plamen je manje oksidacioni da ne bi došlo do preteranog uklanjanja ugljenika; zatim se dodaju dezoksidanti (feromangan, ferosilicijum, aluminijum itd.) pre izlivanja u lonac.

Sl. 28

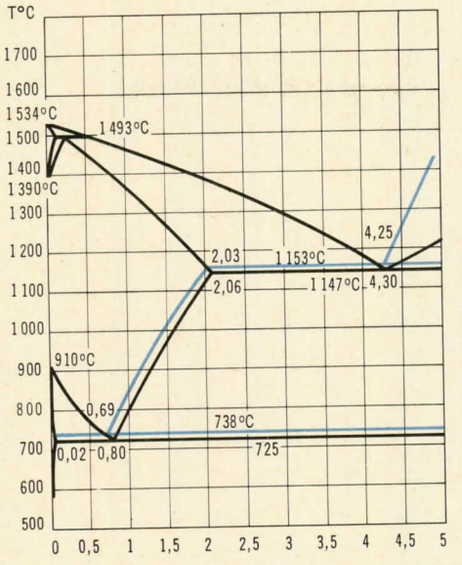


IZRADA ČELIKA U ELEKTRIČNOJ PEĆI. Elektrolučna peć (*sl.* 30) je uređaj jednostavne izvedbe, koji može da bude nezavisan od ostalih pogona crne metalurgije. Ona proizvodi kvalitetne čelike i može da bude konkurentna Martenovoj peći u oblastima jeftine električne energije. Za metalurgiju železa koriste se bazna ili kisela topilišta, kao i u konvertorima i Martenovim pećima. Kisele peći se koriste kada se raspolaže čistim otpacima železa bez fosfora, pošto su pogodnije od baznih, zbog ravnomernijeg rada i mogućnosti prekida bez teškoća. Bazna peć se koristi kada zahtevi u pogledu kvaliteta čelika nisu strogi. Tok stapanja i prečišćavanje sličan je kao u Martenovoj peći.

IZRADA ČELIKA U VISOKOFREKVENTNOJ PEĆI. Visokofrekventna peć (*sl.* 22) je jednostavan uređaj za stapanje čelika, koji ne omogućuje prečišćavanje. Za vreme stapanja čelik je zaštićen šljakom, koja ostaje čvrsta najvećim delom svoje debljine, ili vakuumom. Stapanje se obavlja bez naugljenisavanja, pod vrlo čistim uslovima. Moguće je da se kupatilo meša i da se dodaju legirajući elementi. Zato visokofrekventne peći služe za stapanje i izradu vrlo specijalnih i visokolegiranih čelika.

RAZNI PROIZVODI CRNE METALURGIJE

RAVNOTEŽNI DIJAGRAM ŽELEZO-UGLJENIK. Železni proizvodi su pre svega legure železa i ugljenika. Železo postoji u tri alotropske modifikacije: *α-železo*, koje je postojano do 905°C; *γ-železo*, od 905°C do 1405°C; *δ-železo*, od 1405°C do tačke topljenja. Ako je sadržaj ugljenika visok (>2%), reč je o *gvožđu*, ako je nizak, o *čelicima*. U ovom poslednjem slučaju ugljenik se nalazi uvek vezan u stanju karbida železa, ili cementita, vrlo tvrdog sastojka: ravnoteže se čitaju na nestabilnom dijagramu železo-ugljenik (*sl.* 29). Na visokoj temperaturi (iznad 900°C) sav ugljenik je rastvoren u fazi γ-železa. Ovaj čvrsti rastvor se naziva austenit. Pri hlađenju, ako je sadržaj ugljenika ispod 0,8% (meki, srednje meki i tvrdi čelici), najpre se javlja ferit, tj. α-železo, koje sadrži vrlo malo rastvorenog ugljenika Na 720°C zaostali austenit, koji se obogatio ugljenikom do 0,8%, raspada se u perlit, koji je smeša vrlo finih pločica ferita i cementita (v. II. deo, *sl.* 11). Ako je sadržaj ugljenika u čeliku veći od 0,8% (ekstra tvrdi čelici), pri hlađenju se najpre javlja cementit, zatim perlit, kao u prethodnom slučaju. Ako se čelici hlade kaljenjem u vodi, nema vremena za prethodna razlaganja austenita; dobija se presićeni čvrst rastvor ugljenika u železu, tzv. martenzit, vrlo tvrd i krt sastojak.



Sl. 29

Ravnotežni dijagram železo-ugljenik.
Neravnotežni dijagram železo-ugljenik.

GVOŽĐE. Struktura gvožđa je složenija.

Belo gvožđe ima sličnu strukturu kao specijalno tvrdi čelik, ali sa većim sadržajem cementita. Ono je tvrdo i krto. Ono je pre svega namenjeno za prečišćavanje, tj. za izradu drugih proizvoda.

Sivo gvožđe ima strukturu u kojoj se ugljenik nalazi delimično u stanju grafita, u obliku lamela ili u izvesnim slučajevima u obliku nodula. Ove ravnoteže se čitaju na stabilnom dijagramu železo-ugljenik (*sl.* 29). Pojava grafita je s jedne strane u vezi sa sporim hlađenjem, a s druge strane sa prisustvom elemenata koji se nazivaju grafitizirajući, kao silicijum. Matrica koja obuhvata lamele grafita je čelik, koji, shodno termičkoj obradi, sadrži više ili manje ugljenika; na taj način se razlikuju perlitna, austenitna ili martenzitna gvožđa. Siva gvožđa su isto tako dosta krta, ali poseduju osobinu izvrsne livkosti, što ih čini pogodnim materijalom za livenje, sa vrlo dobrom sposobnošću kvašenja, pri čemu prisutni grafit ima ulogu podmazivanja.

Kovno gvožđe se dobija kada se belo gvožđe podvrgne termičkoj obradi na 770°C, koja umnogome poboljšava njegovu duktilnost. Ugljenik vezan u obliku cementita tada se taloži obrazujući nodule koje ne predstavljaju centre za nukleaciju prskotina tako opasne kao što su lamele grafita u sivom gvožđu. *Kovno gvožđe sa belim jezgrom*, ili *evropski temper liv* ili *beli liv*, dobija se dekarburizacijom belog gvožđa. Njegova struktura je ili ferit po celom preseku, ili ferit po površini, a u jezgru — grafitne nodule u feritnoj ili perlitnoj osnovi. On se koristi za izradu cevovoda, gvozdarske robe, delova poljoprivrednih mašina itd. *Kovno gvožđe sa crnim jezgrom*, ili *američki temper liv* ili *crni liv*, sadrži grafitne nodule u perlitnoj osnovi. Dobija se grafitizacijom. Nalazi veliku primenu u izradi delova za automobile, železnice, vodova za visoki pritisak itd.

Gvožđe sa sferoidalnim grafitom dobija se ako se suzbije pojava lamelarnog grafita dodavanjem magnezijuma rastopu. Pri očvršćavanju grafit se javlja u obliku nodula. Ovaj kvalitet gvožđa upotrebljava se za izradu centrifugalnih cevi, valjaka za valjaonice, mehaničkih delova itd.

Specijalna gvožđa dobijaju se dodavanjem legirajućih elemenata, kao nikl i molibden, koji poboljšavaju čvrstoću i otpornost na habanje, ili hrom, koji povećava otpornost prema oksidaciji. Tako se dobijaju vatrostalna gvožđa. Dodavanje 12 do 18% silicijuma daje gvožđu vanredno dobru otpornost prema oksidaciji.

ČELICI se mogu razvrstati prema različitim kriterijumima, ali je najviše uobičajena njihova podela prema hemijskom sastavu.

Nelegirani čelici ili ugljenični čelici razvrstani su prema njihovom sadržaju ugljenika.

U ovoj kategoriji među niskougljeničnim čelicima razlikuju se *umireni čelici*, čija je odlika da nema oslobađanja gasova za vreme očvršćavanja, i *neumireni čelici*. Prvi daju jedre, kompaktne odlivke, drugi proizvode u kojima postoje šupljine ili mehuri, čija zapremina nadoknađuje više ili manje skupljanje odlivka pri hlađenju.

Specijalni čelici. Legirajući dodaci mogu mnogo da poboljšaju osobine čelika. Ako se dodaju *niskougljeničnim čelicima* u malim količinama, oni povećavaju njihovu mehaničku otpornost tako što se rastvaraju u feritu i otvrdnjavaju ga, kao i zbog obrazovanja karbida. Najviše korišćeni elementi su fosfor, mangan, silicijum, molibden. Hrom i bakar osim toga stvaraju povećanu otpornost prema koroziji. Postoji interesovanje za ovakve čelike koji se ne kale pri izradi delova takvih dimenzija za koje bi bilo teško primeniti termičku obradu. Oni se, takođe, zavaruju bez teškoća. Ali najviše korišćeni *legirani čelici* su upravo oni koji se kale i koriste u kaljenom ili otpuštenom stanju. Najčešće se dodaju sledeći legirajući elementi: mangan, silicijum, nikl, hrom, molibden, vanadijum, bakar, titan, volfram. Rastvoreni u austenitu, oni smanjuju brzinu transformacije i na taj način olakšavaju termičku obradu delova velikih preseka. Ovo omogućuje da se koriste čelici sa niskim sadržajem ugljenika, koji se kale, ali čiji je martenzit dosta duktilan, a i da se smanji brzina hlađenja. Zbog toga se smanjuje i sklonost ka obrazovanju prskotina, naročito pri prekidnom kaljenju. Među legirajućim elementima razlikuju se *gamageni elementi* (nikl, mangan, ugljenik, azot itd.), koji proširuju oblast stabilnosti austenita, i *alfageni elementi* (hrom, molibden, aluminijum, silicijum, fosfor itd.), koji tu oblast sužavaju u korist ferita. Prvi, snižavanjem tačke transformacije austenita, usporavaju razlaganje i na taj način povećavaju prokaljivost. Drugi imaju veliki afinitet prema ugljeniku i s njim mogu graditi kompleksne karbide. Ovi karbidi se teško rastvaraju u austenitu, koji se na taj način stabilizuje, što takođe pospešuje prokaljivost.

Legirajući dodaci kao nikl, koji se nalaze rastvoreni u feritu, malo utiču na tvrdoću okaljenog i otpuštenog čelika. Nasuprot tome, hrom, molibden i vanadijum, koji obrazuju karbide, mogu ga otvrdnuti. Tako se dobijaju čelici koji imaju naprezanje na kidanje i do 130 kg/mm², sa izduženjem pri prekidu od 15%. Specijalni čelici su hrom-nikl čelici, među kojima se razlikuju *čelici za cementaciju*, koji sadrže vrlo malo ugljenika, i *čelici za obradu*. U ova dva slučaja, podešavanjem sadržaja hroma i nikla koji respektivno ostaju ispod 2%, odn. 4,7%, dobija se niz interesantnih osobina. Npr., mogu se načiniti samokaljivi čelici, u kojima je transformacija austenita usporena do tog stepena da je obično hlađenje na vazduhu dovoljno da se u jezgru dobije martenzit, čak i u komadima velikog preseka. Dodavanjem molibdena ovim čelicima smanjuje se krtost pri otpuštanju koja potiče od taloženja karbida po granicama zrna.

Hrom-molibden i hrom-vanadijum čelici. Pored dobre prokaljivosti, jedni poseduju dobru otpornost na puzanje, a drugi na zamor. Oni imaju veliku primenu pri izradi opruga, naročito onih koje treba da rade na povišenoj temperaturi. Kada se malo podigne sadržaj ugljenika i vanadijuma u ovim čelicima, dobijaju se čelici visoke otpornosti, koji zadržavaju te osobine do oko 500°C. Oni se mnogo koriste u aeronautici. Najzad, sporost transformacije austenita u ovim čelicima dopušta da se primeni specijalna tehnika, koja se sastoji u tome da se oni oblikuju pre nego što je transformacija počela, a pri dovoljno niskoj temperaturi da austenit ne bi mogao da rekristališe. Martenzit koji potiče od ovog deformisanog austenita je posebno otporan.

Austenitni čelici sa manganom (12%) ili Hetfildov (Hatfield) čelik. To je poseban slučaj specijalnog čelika. Dobija se kaljenjem u obliku austenita na sobnoj temperaturi, što znači da mu je tačka M ispod te temperature. Ali naknadna plastična deformacija izaziva njegovu transformaciju u martenzit. Dakle, kovanjem površine čelika može se dobiti vrlo tvrdi površinski sloj. Zbog toga se Hetfildov čelik mnogo upotrebljava tamo gde je potrebna visoka otpornost na abanje (delovi drobilica, metalne korpe za opšte potrebe, skretnice itd.). Napominjemo da ga ne treba obrađivati, pošto otvrdnjava pri naprezanju alata koji se od njega izrađuje. Proizvodi od tog čelika moraju se izraditi livenjem.

Brzorezni čelici služe za izradu alata, te moraju biti vrlo tvrdi da bi bili otporni na abanje. Oni sadrže veliku količinu ugljenika i znatne dodatke hroma, molibdena i naročito volframa. Nedavno je uspelo da se izrade čelici sa malim sadržajem ugljenika — »maraging«, čija otpornost na kidanje dostiže 250 kg/mm². Oni sadrže velike količine nikla (18 do 25%) i male količine titana ili kobalta i molibdena. Osim otvrdnjavanja koje se dobija martenzitnim

kaljenjem, u ovim čelicima dolazi i do pojave taloženja pri žarenju, što znatno poboljšava mehaničke osobine.

Nerđajući čelici dobijaju se dodavanjem hroma, koji se rastvara u feritu i proširuje mu područje stabilnosti u velikoj meri. Dokle god je sadržaj hroma ispod 15 %, nerđajući čelici se mogu kaliti i nazivaju se *martenzitni*, ali ako sadrže više hroma, bez ńekog drugog dodatka, nazivaju se *feritni*. Oni se ne kale i feromagnetični su. Otpornost prema koroziji im je vrlo dobra pod uslovom da se ne žare. Vrlo često se nerđajućim čelicima dodaje nikl, pošto on ima suprotno dejstvo od hroma na područje stabilnosti ferita: on stabiliše austenit. Tako se dobijaju *austenitni* nerđajući čelici, od kojih je najpoznatiji 18-8 (18 % hroma i 8 % nikla). Ovi čelici, koji se lako kuju, imaju izvrsnu otpornost prema koroziji na toplo, ali je njihova zatezna čvrstoća dosta slaba (60 kg/mm²) i teško se obrađuju.

Vatrostalni čelici su otporni prema oksidaciji na povišenim temperaturama; tu spadaju feritni čelici sa 20 do 40 % hroma, austenitni čelici sa srednjim sadržajem nikla i austenitni čelici sa vrlo visokim sadržajem nikla.

Čisto železo. Glavni tehnološki interes čistog železa jeste lakoća njegovog zavarivanja, naročito pri kovanju (kovano gvožđe). Treba, takođe, naglasiti da čisto železo ima izvrsnu otpornost prema koroziji, što dokazuje i poznati stub u Delhiju. Čisto železo se koristi za valjanje limova za dinamo-mašine i električne releje, za izradu cevi, rezervoara koji su znatno otporni prema koroziji. Najzad, to je sirovina za izradu kvalitetnog čelika.

Metalurgija uobičajenih metala

METALURGIJA BAKRA

PROIZVODNJA. Glavne rude bakra su sulfidi, npr., halkopirit. Isto tako postoje oksidne rude, koje su od drugorazrednog značaja. Posle obogaćivanja rude flotacijom, da bi se izdvojio bakar, koristi se bilo metalurški metod suvim postupkom, bilo hidrometalurški postupak.

Suvi postupak. Počinje se sulfidnim topljenjem koje se zasniva na velikom afinitetu bakra prema sumporu. Ruda se stapa da bi se dobila dva proizvoda: *bakarni kamen*, ili *bakrenac*, koji se sastoji od sulfida bakra i železa, ali je bogatiji bakrom, i *šljaka*, koja pliva po površini i sadrži oksid železa i jalovinu. Ovo se vrši u peći sa oblogom koja se hladi vodom, u plamenoj peći ili električnoj peći. Najpre treba izdvojiti bakarni kamen da bi se pretvorio u »blister« bakar (nazvan po tome što je površina ingota prekrivena mehurima). U tu svrhu u stopljeni bakarni kamen uduvava se vazduh; na taj način se vrši oksidacija železa koje se izdvaja u obliku šljake, pri čemu se dobija beli bakarni kamen, koji sadrži samo sulfid bakra. U toku daljeg uduvavanja vazduha izdvaja se bakar od sumpora. Pri tome se koristi jedan konvertor, pošto je toplota koja se oslobađa pri hemijskoj reakciji dovoljna da održava bakarni kamen u rastopu. Zatim je poželjno da se bakar prečisti, što se obavlja oksidacijom nečistoća pomoću vazduha u plamenoj peći; jedne od njih isparavaju, dok druge obrazuju šljaku. Na kraju postupka potrebno je da se bakar redukuje, pošto je malo oksidisan. To se obavlja motkama od sirovog drveta koje se uranjaju u kupatilo. Drugi metod prečišćavanja je elektroliza rastvora bakra koji se dobija rastvaranjem u sumpornoj kiselini.

Mokri postupak se vrši sa rudom koja se rastvara u kiselom rastvoru, to je *luženje*, posle čega se bakar taloži na železu ili izdvaja elektrolitički.

PRIMENA BAKRA I NJEGOVIH LEGURA. Najvažnije osobine bakra su dobra električna i termička provodljivost, otpornost prema koroziji i kovnost. Osim toga, on je prijatnog izgleda. Lako se može zavarivati i tvrdo lemiti. Zbog toga se koristi za izradu električnih vodova i uređaja, kao materijal za pokrivanje zgrada, u hemijskoj industriji, za izradu izmenjivača toplote. Dodavanjem malih količina legirajućih elemenata bakar stiče zanimljive osobine. Arsen poboljšava kovnost i mehaničku otpornost bakra koji sadrži malo oksida. Bakar koji sadrži arsena koristi se za izradu štamparskih valjaka. Dodatak kadmijuma znatno poboljšava mehaničku otpornost uz dobru električnu provodljivost, odakle potiče primena za snopove električnih provodnika. Dodavanje kalaja bakru koji sadrži kadmijuma još više povećava mehaničku čvrstoću, ali na štetu električne provodljivosti. Taj se metal koristi za vazdušne telefonske linije. Dodatak telura ne smanjuje električnu provodljivost, a ogromno olakšava obradu. Stoga bakar sa telurom služi za izradu duvnica, blokova za magnetrone, preciznih instrumenata itd. Unošenje srebra malo utiče na provodljivost, ali, povisujući temperaturu rekristalizacije bakra, omogućuje da se on upotrebi, npr., za automobilske hladnjake koje treba zavariti.

Ako mu se dodaju neki elementi u malim količinama, bakar može strukturno da otvrdnjava. Tako se bakar sa hromom, niklom ili fosforom koristi za izradu elektroda za tačkasto zavarivanje. Berilijum je legirajući dodatak, koji strukturnim otvrdnjavanjem daje bakru važne mehaničke osobine, posebno otpornost na zamor. Berilijum bronza se, pre svega, koristi za izradu nemagnetnih opruga, otpornih prema koroziji, provodnika sa vrlo visokom granicom elastičnosti. Oni se koriste pri izradi satova, u mehanici, u elektrici. Ova legura se takođe koristi za membrane manometara ili pumpi za benzin ili za rudarska oruđa, kada su varnice koje nastaju sa oruđima od čelika nedopustive.

Bakar se često dodaje dragocenim metalima da bi postali tvrđi i otporniji na habanje, što se koristi u kujundžijskom i zlatarskom radu, pri izradi nakita, kovanju novca. Ali je najvažnija industrijska primena legura bakra na bazi cinka *(mesinzi)* i kalaja *(bronze)*.

Alfa-mesing je čvrsti rastvor cinka u bakru sa sadržajem ispod 33 %. Od crvene ka sve više žutoj boji kada se, dodaje cink, tvrđi, livkijii jeftiniji od čistog bakra, mesing se, npr., koristi za izradu puščanih zrna, čaura, posuđa, zakivaka cevi. *Beta-mesing* je intermetalno jedinjenje sa sadržajem cinka blizu 50 %. Takođe se naziva *mesing drugog kvaliteta*. Sa 40 % cinka, tzv. Muncov (Muntz) metal, koristi se za izradu kondenzatorskih ploča. Ako se doda treći elemenat, dobijaju se *specijalni mesinzi*, kao mesinzi sa olovom, koji se lakše obrađuju, ili alpaka srebro, koje sadrži nikla, što mu daje belu boju. Ono se koristi za izradu nakita, u optici, u dekorativne svrhe. Mesinzi sa kalajem ili aluminijumom veoma su otporni prema koroziji u morskoj atmosferi.

Kovne bronze sadrže manje od 15 % kalaja u čvrstom rastvoru sa bakrom. Imaju veću granicu elastičnosti i vrlo dobru otpornost na habanje i koroziju, dobru livkost. Bronze za zvona sadrže oko 20 % kalaja, pri čemu se javlja vrlo krto intermetalno jedinjenje, koje ima malo unutrašnje trenje, što izaziva zvučnost.

Aluminijumske bronze, koje sadrže manje od 10 % aluminijuma u čvrstom rastvoru sa bakrom, vrlo su otporne prema korozigi u morskoj vodi, pogodne su za izradu brodskih vijaka, zupčanika, ležišta. Specijalne aluminijumske bronze dobijaju se dodavanjem železa, nikla ili mangana, koji obično usitnjavaju zrno, poboljšavaju mehaničke osobine i otpornost prema koroziji ili livkost.

Legure bakra sa olovom dobro se kuju, imaju nizak modul elastičnosti i otporne su prema naizmeničnom naprezanju, što ih čini pogodnim za ležišta. Ove antifrikcione legure izrađuju se metalurgijom praha. Nazivaju se i *pseudolegure*. U ovu kategoriju spadaju i sinterovane olovne bronze, koje su porozne i koriste se za samopodmazujuća ležišta.

Legure bakra sa niklom poznate su po dobrom ponašanju prema koroziji, zbog čega se primenjuju za kondenzatorske cevi u mornarici. *Konstantan*, legura bakra i nikla (45 %) čiji se specifični otpor ne menja sa temperaturom, koristi se za izradu otpornih električnih žica.

METALURGIJA CINKA

PROIZVODNJA. Najvažnije rude cinka sastoje se od sulfida, koji se nazivaju *blende*. Oksidne rude, nazvane *kolamina*, imale su izvestan značaj, ali su gotovo potpuno iscrpene. Posle obogaćivanja ruda flotacijom obavlja se prženje da bi se sulfidi preveli u okside. Razlikuje se prosto prženje, koje se obavlja na dosta niskim temperaturama (500—600°C) u peći sa topilištima jedno iznad drugog, i aglomerirajuće prženje, koje se obavlja na višoj temperaturi (1 100—1 200°C) u Dvajtovoj i Lojdovoj (Dwight, Lloyd) peći za prženje.

Suvi postupak. Oksid cinka redukuje se pomoću ugljenika na oko 1 400°C u zatvorenim retortama. Na toj temperaturi cink je gasovit. Pare se kondenzuju u tečnost u kondenzatoru koji je produžen pomoću jednog limenog nastavka, gde se skuplja cinkov prah (cinkovo sivo). Koriste se ili peći sa horizontalnim pećicama, koje se nalaze jedna preko druge u tri do pet nizova, ili tzv. Nju Džersi (New Jersey), koje imaju samo jednu vertikalnu pećicu mnogo većih dimenzija. Tako dobijeni cink prečišćava se likvacijom radi odvajanja olova i železa ili frakcionom destilacijom. U dve redne kolone odvajaju se olovo, koje teže isparava, i kadmijum, koji isparava lakše.

Mokri postupak. Pržena ruda se rastvara luženjem u sumpornoj kiselini; taloženje se ostvaruje elektrolizom, pošto je rastvor prethodno prečišćen hemijskim taloženjem. Tako se dobija plavi mulj iz koga se izdvaja kadmijum ponovnim rastvaranjem i elektrolizom.

UPOTREBA CINKA. Glavna primena cinka je u zaštiti železa od oksidacije; to je *galvanizacija*, koja se izvodi tako što se očišćeni predmeti potapaju u tečan cink. Ona se takođe obavlja elektrolitičkim taloženjem ili raspršivanjem pomoću pištolja. Čisti cink se koristi i kao konstrukcioni materijal za pokrivanje i u električnim pećima.

Za izradu mesinga (legure sa bakrom) i alpake (legure sa bakrom i niklom) troši se veliki deo proizvedenog cinka. Sa aluminijumom daje legure visoke mehaničke čvrstoće. Najvažnije legure na bazi cinka su one koje se koriste za livenje pod pritiskom pod trgovačkim imenom *Zamak*. Glavni dodatak je aluminijum (4—4,5 %), koji usitnjava zrno i poboljšava mehaničke osobine. Ali da bi se smanjila međukristalna korozija, prema kojoj su ove legure vrlo osetljive, dodaje se bakar (ispod 3 %). Osim za livenje pod pritiskom, ove legure se koriste i za izradu matrica za duboko izvlačenje limova lakih legura, jer se ostvaruje znatna ušteda u odnosu na gvožđe.

Najzad cink u obliku oksida koristi se za boje i u industriji gume; koristi se i u obliku sulfata za boje (litopon) i pri izradi veštačkih tkanina.

METALURGIJA ALUMINIJUMA

PROIZVODNJA. Aluminijum je vrlo rasprostranjen elemenat u Zemljinoj kori. Glavne rude su *boksit*, smeša više ili manje hidratisanih oksida, i *kriolit*, dvostruki fluorid aluminijuma i natrijuma. Budući da je oksid aluminijuma vrlo stabilan, neop-

hodno je da se prečisti pre nego što se sprovede njegova redukcija, pošto bi se sve nečistoće u obliku oksida redukovale pre aluminijuma. Najviše se koristi Bajerov postupak, po kome se boksit luži u rastvoru sode, što daje rastvorni aluminat, koji se filtrira; nerastvorni talog sačinjava crveni mulj, koji naročito sadrži okside železa, titana i silicijuma. Iz aluminata se dobija čisti aluminijum-oksid, koji se elektrolizom u rastopu na 950°C redukuje u aluminijum. Kupatilo se sastoji od rastvora aluminijum-oksida u rastopljenom kriolitu. Na katodi se odvaja tečni aluminijum, a na anodi smeša ugljen-monoksida i ugljen-dioksida. Elektrolitičko kupatilo predstavlja jedno topilište načinjeno od grafitnih opeka koje sačinjavaju katodu; anode su od grafita koji je prethodno pečen ili su neprekidne Zederbergovog (Söderberg) tipa (*sl.* 30). Metal se vadi iz kupatila i sipa u rastopljenom stanju u topilišnu otpornu peć radi prečišćavanja, koje se obavlja pretakanjem i odstranjivanjem gasova. Da bi se dobio još čistiji metal, primenjuje se elektroliza rastopa.

UPOTREBA ALUMINIJUMA I NJEGOVIH LEGURA. Osobine aluminijuma, zbog kojih je on mnogo tražen, su mala gustina, dobra električna i termička provodljivost, dobra otpornost prema oksidaciji. On je dobar reflektor. Zbog toga se primenjuje u gradnji (krovne konstrukcije, nameštaj, stolarija), za izradu domaćeg posuđa, za električne vodove, uobičajen je u aeronautici i saobraćaju, u hemijskoj industriji i industriji namirnica itd.

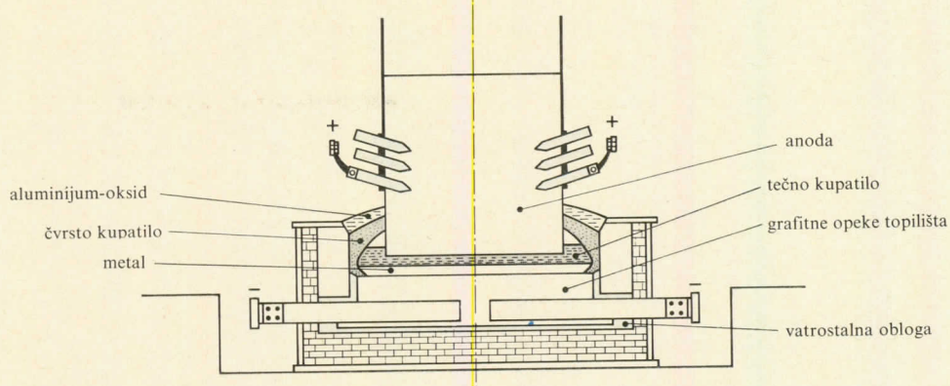
Legure aluminijuma, zadržavajući malu gustinu i dobru otpornost prema oksidaciji, imaju znatno poboljšane mehaničke osobine. Razlikuju se livene i kovane legure. U svakoj kategoriji sreću se legure termički obrađene i neobrađene. Legure do 5,6 % bakra mogu se prevesti u čvrsti rastvor na 548°C, dok je na sobnoj temperaturi rastvorljivost gotovo jednaka nuli. Tako se mogu otvrdnuti mnoge legure aluminijuma sa bakrom pomoću taloženja. Livene legure sadrže do 8 % bakra, od čega se jedan deo može zameniti silicijumom. Ali najpoznatija legura je duraluminijum, koji sadrži 4,5 % bakra i malo magnezijuma i silicijuma. Posle kaljenja i otpuštanja zatezna čvrstoća dostiže do 50 kg/mm². On se mnogo koristi u aeronautičkoj industriji. Zbog svoje izvrsne tečljivosti legure sa silicijumom (5—13 %) odlične su za livenje i od njih se mogu izraditi komadi vrlo složenog oblika i bez poroznosti. Legure sa magnezijumom (5—10 %) lakše su od aluminijuma, pri čemu imaju dobre mehaničke osobine, odličnu otpornost prema koroziji i dobro se obrađuju.

METALURGIJA MAGNEZIJUMA

PROIZVODNJA. Rude magnezijuma su karbonati (magnezit i dolomit) i hloridi kojih ima mnogo u morskoj vodi.

Metal se uglavnom dobija elektrolizom rastopa hlorida. Da bi se dobila čista so, magnezit se peče i prelazi u oksid, koji se zatim hloruje u prisustvu ugljenika, u peći koja se zagreva otporno pomoću grafita. Ako se polazi od dolomita, hlorid se dobija rastvaranjem u hlorovodoničnoj kiselini. Magnezijum-hlorid se odvaja od ostalih rastvorenih soli u morskoj vodi taloženjem magnezijum-hidroksida pomoću kreča (dobijenog pečenjem školjki ostriga). Tako izdvojen hidroksid rastvara se u hlorovodoničnoj kiselini da bi se dobio ponovo magnezijum-hlorid. Oksid dobijen pečenjem može se takođe redukovati pomoću ferosilicijuma u zatvorenim retortama na 1150°C.

UPOTREBA MAGNEZIJUMA I NJEGOVIH LEGURA. Magnezijum sagoreva proizvodeći jarku svetlost, zbog čega se koristi u fotografiji i pirotehnici. Ali njegova mala gustina čini ga posebno interesantnim u aeronautici, transportu, za izradu delova koji moraju imati malu inerciju (tekstilna industrija). Potrebno ga je legirati da bi se ublažile njegove loše



Sl. 30 Kupatilo sa Soderbergovom potrošnom elektrodom sa kosim klinovima.

mehaničke osobine. Tako se dobijaju *ultralake* legure. Oblast sastava je gotovo ista za livene i kovane legure. Prve ultralake legure u upotrebi bile su legure na bazi aluminijuma (4—9 %). One se još koriste, ali ne toliko kao legure »elektron« koje sadrže aluminijuma (4 %) i cinka (3 %). Poznate su i legure sa bakrom i aluminijumom (ukupno manje od 6 %). Nedavno su uvedene nove ultralake legure. One su dobijene dodavanjem cinka, cirkonijuma i metala retkih zemalja ili dodavanjem torijuma. Njihova je prednost u tome što su malo osetljive na efekat zareza i imaju, naročito poslednja, dobru otpornost na puzanje do 350°C. Njihova primena je u porastu.

METALURGIJA OLOVA

PROIZVODNJA. U rude olova uglavnom spadaju *galenit* (sulfid olova) i *ceruzit* (karbonat), koji je često spojen sa karbonatima cinka ili železa. Posle obogaćivanja flotacijom, najviše se za dalju preradu rude koristi metod prženja i redukcije. Prženje u Dvajtovoj i Lojdovoj peći daje oksid koji se u peći sa trupom redukuje pomoću ugljenika i ugljen-monoksida. Dobija se sirovo olovo koje treba prečistiti od šljake, koja sadrži sulfid bakra i železa i arsenid železa. Prečišćavanje sirovog olova ostvaruje se korišćenjem različitog afiniteta olova i nekih nečistoća prema kiseoniku i sumporu i zbog obrazovanja određenih jedinjenja koja su teže topiva od olova. Primenjuje se i elektrolitičko prečišćavanje.

UPOTREBA OLOVA I NJEGOVIH LEGURA. Olovo je važno u primeni zbog svoje kovnosti, niske tačke topljenja i dobre otpornosti prema atmosferskoj koroziji. Primenjuje se za izradu cevovoda u hemijskoj industriji i građevinarstvu, za spojeve, za limove za prevlačenje olovnih komora u proizvodnji sumporne kiseline. Olovo je isto tako korisno za zaštitu od X- i γ-zračenja, koje zadržava pošto ima veliku gustinu.

Glavna legura olova je sa antimonom, tzv. tvrdo olovo. Legirano sa 8—10 % koristi se za izradu akumulatorskih ploča; sa 3 % je olovo za lovačku sačmu. Legure olova sa kalajem koriste se za lemljenje, a sa antimonom i kalajem za štamparska slova ili kao antifrikcione legure; električni osigurači su legure olova i bizmuta sa malo kalaja. Najzad, hemijska jedinjenja olova mnogo se koriste kao boje (minijum), kao antidetonatori (tetrastil olovo) itd.

METALURGIJA NIKLA

PROIZVODNJA. Nikla ima u Kanadi u sulfidnim rudama (pirotin), u Novoj Kaledoniji u oksidnim rudama (laterit, peridotit). Posle flotacije sulfidne rude se prže i stapaju u kamenac. Iz ovog se uklanja železo u konvertoru, gde se ono prevede u šljaku pomoću kvarcnog peska, a bakar se odstranjuje na osnovu različitih gustina sulfida. Oksidne rude se posle sinterovanja podvrgavaju redukcionom topljenju i dobijeni nikl se prečišćava elektrolitički. Po Mondovom postupku nikl se prečišćava obrazovanjem nikl-karbonila sa ugljen-monoksidom.

UPOTREBA NIKLA I NJEGOVIH LEGURA. Čisti nikl koristi se za zaštitu od korozije, naročito od alkalija, za niklovanje u hemijskoj industriji. Za čelike i specijalne livove troše se velike količine nikla, pošto im on povećava mehaničku čvrstoću, daje im veću prokaljivost i bolju otpornost prema koroziji. Legure železa sa niklom su vatrostalne i nalaze primenu za lopatice turbina. Invar (36 % nikla) ima zanemarljiv temperaturni koeficijent dilatacije; permaloj ima vrlo visoki magnetni permeabilitet. Zbog svog dobrog ponašanja na visokoj temperaturi legure sa niklom i hromom služe za izradu otpornih grejača (20 % hroma), u gradnji turboreaktora (nimonik, sa 20 % hroma); one su vrlo otporne prema koroziji u alkalnoj i sumpornoj atmosferi (inkonel, sa 14 % hroma i 6 % železa). Među legurama sa bakrom treba ukazati na monel (30 % bakra), koji ima dobre mehaničke osobine i otpornost prema koroziji u sulfatnim rastvorima i pregrejanoj pari, na alpaku, koja je vrlo kovna, na mesinge i bronze na bazi nikla. Dodavanjem nikla poboljšavaju se i mehaničke osobine aluminijumovih legura i njihova otpornost na toploti. Koristi se gotovo u svim termoparovima, od kojih treba spomenuti alumel (2 % aluminijuma, 2 % mangana, 1 % silicijuma), u paru sa hromelom. Najzad, postoje dragocene legure nikla sa zlatom i srebrom.

METALURGIJA KALAJA

PROIZVODNJA. Rude kalaja sastoje se od *kasiterita*, oksida kalaja. Iz ekonomskih razloga ponekad je potrebno prečistiti rudu da bi se odstranile neke nečistoće, kao volfram. Redukcija je laka, ali je važno da se metal ne gubi u šljaki. Ova se sastoji od smeše krečnjaka i silikata koje treba tačno dodavati. Redukcija se izvodi pomoću antracita i ugljen-monoksida u plamenim pećima zagrevanim ugljem ili gasom. Sve više se koriste električne peći sa jednom elektrodom i provodnim topilištem ili sa tri elektrode, a zagrevanje se ostvaruje Džulovim efektom, a ne lukom. Sirovi kalaj se prečišćava segregacijom ili likvacijom, uz dodavanje aluminijuma koji smanjuje rastvorljivost glavnih nečistoća u niklu. Takođe se prečišćava pregrevanjem i potapanjem motki od sirovog drveta, što dovodi do oksidacije nekih nečistoća. Najzad, prečišćavanje se može vršiti elektrolitički.

UPOTREBA KALAJA I NJEGOVIH LEGURA. Mada se proizvodi u malim količinama, kalaj ima izuzetno veliki značaj. Naročito se koristi kao zaštitni sloj na čelicima. Zaštita limova obavlja se njihovim potapanjem u kupatilo rastopljenog kalaja. Kalaj ulazi u sastav mnogih legura: obrazuje bronze sa bakrom, legure za lemljenje (lotove) sa olovom, antifrikcione legure sa antimonom i bakrom.

Metalurgija dragocenih metala

METALURGIJA ZLATA

Zlato se nalazi u elementarnom stanju sa nešto srebra u rastvoru. Zlato se vadi iz ruda cijanizacijom, što je proces rastvaranja i taloženja, ili amalgamiranjem sa živom.

Zlato legirano sa bakrom (10 % bakra) koristi se kao podloga za novac. Za nakite se koriste različite legure zlata sa srebrom i bakrom, ili sa niklom, bakrom i cinkom, zavisno od boje koja se želi dobiti. Mogu se elektrolitički nanositi slojevi zlata i tako dobijati pozlaćeni predmeti. Tu spadaju i električni kontakti za male struje ili reflektori. U zubnoj protetici mnogo se koristi legura koja sadrži srebra, bakra, platine i paladijuma, pošto je stabilna, ima dobre mehaničke osobine posle strukturnog otvrdnjavanja i pošto se lako lije jer je njena tačka topljenja malo povišena.

METALURGIJA SREBRA

Srebro se nalazi u »suvim« rudama, koje se prerađuju samo radi srebra (argentit), ili u mokrim rudama, koje se prerađuju da bi se iz njih odvojili i drugi metali (bakar, olovo). Srebro se odvaja cijanizacijom, kao i zlato, ili legiranjem sa cinkom kada se odvaja od sirovog olova. Srebro je pogodnije od bakra u primenama gde je potrebna zaista dobra električna provodljivost i određena otpornost prema oksidaciji. U tu svrhu ono se koristi iscela i kao elektrolitičke prevlake, koje su našle veliku primenu u elektroindustriji i elektronici. Njegove reflektorske osobine koriste se za izradu ogledala i, razumljivo, za posebno posuđe, pri čemu se obično taloži na bakarnoj podlozi.

Za izradu skupocenijeg posuđa koristi se srebro legirano s bakrom u različitim proporcijama. To su legure koje se takođe koriste za izradu nakita i kovanje novca. Amalgami srebra, kalaja i žive, koji se brzo obrazuju, imaju dobre mehaničke osobine uz malo skupljanje pri očvršćavanju: oni sačinjavaju zubne amalgame. Eutektici srebro-bakar ili srebro-bakar-cink predstavljaju odlične legure za tvrdo lemljenje. Najzad, soli srebra osetljive na svetlost nalaze veliku primenu u fotografiji.

METALURGIJA PLATINSKIH METALA

Ovi metali, platina, paladijum, iridijum, osmijum, rodijum i rutenijum, dobijaju se pri preradi ruda bakra i nikla. Njihovo prečišćavanje se obavlja hemijskim postupcima. Budući da su retki, prijatne boje i izgleda, imajući dobre mehaničke osobine, i pošto ne gube sjaj, oni se mnogo koriste za izradu nakita bilo iscela bilo kao prevlake.

Oni su vrlo korisni kao električni kontakti za slabe struje. Platina je nezamenljiv katalizator u industriji azotne i sumporne kiseline. Postoje termoparovi platina-legura platine sa rodijumom, kao i termometrijske otporne sonde od platine.

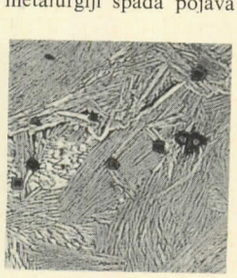
Metalurgija nuklearnih metala

METALURGIJA URANIJUMA

Rude urana sastoje se od oksida (pehblenda, uranit, uranotorit). Prvo se koncentrišu kiselim luženjem, koncentracijom na jonskim izmenjivačima i taloženjem pomoću sode. Posle ponovnog rastvaranja u azotnoj kiselini podvrgavaju se ekstrakciji pomoću organskih rastvarača, koji rastvaraju samo soli urana. Tako se dobijaju nitrati, koji se podvrgavaju prženju do oksida i zatim redukuju u dve etape prvo vodonikom i zatim, posle pretvaranja u fluoride, kalcijumom (ili magnezijumom) do metala. Nuklearnoj industriji potreban je uranijum koji je obogaćen izotopom 235. Ovo obogaćenje se postiže u postrojenjima za gasnu difuziju, u kojima gasoviti heksafluorid uranijuma prolazi kroz porozne pregrade. Uranijum 235 difunduje brže od uranijuma 238, što dovodi do obogaćivanja.

Uranijum (*sl.* 31a i 31b), čiji izotop 235 podleže nuklearnoj fisiji, koristi se kao nuklearno gorivo u atomskim reaktorima. Među mnoge probleme koje ovo korišćenje postavlja metalurgiji spada pojava transformacije na 670°C, koja se događa uz znatnu promenu zapremine, rđavo ponašanje u pogledu puzanja, velike deformacije pri termičkom cikliranju između sobne temperature i, npr., 500°C, ponašanje za vreme ozračivanja itd. Zbog toga su razvijene različite legure, koje neke od ovih nedostataka, ili više njih, ublažuju. Najčešće korišćeni legirajući dodaci su molibden, aluminijum, silicijum. Poslednjih godina sve veću važnost stiču keramička nuklearna goriva na bazi oksida, karbida, silicida i dr. uranijuma.





Sl. 31*a*. Optička mikrografija legure uranijuma sa 1,5% molibdena u livenom stanju.
Sl. 31*b*. Ista legura posle elektrolitičkog nagrizanja koje otkriva dvofaznu lamelarnu strukturu.

METALURGIJA PLUTONIJUMA

Plutonijum ne postoji u prirodi; on se proizvodi u nuklearnim reaktorima u uranu za vreme ozračivanja neutronima. Posle boravka u reaktoru uran se rastvara u azotnoj kiselini; plutonijum se odvaja pomoću selektivnih rastvarača. Posle prevođenja u fluorid, metal se dobija redukcijom pomoću kalcijuma. Sve ove operacije su vrlo složene zbog velike opasnosti od zračenja pri rukovanju plutonijumom i fisionim produktima.

Plutonijum se upotrebljava kao nuklearni eksploziv u atomskim bombama. Njegova primena u reaktorima nije još izišla iz eksperimentalne faze. U metalnom stanju plutonijum je nepogodan pošto ima šest alotropskih modifikacija, sa velikim zapreminskim promenama pri prelasku kroz tačku transformacije, kao i zbog mehaničkih osobina i niske tačke topljenja (640°C). U reaktorima treba plutonijum dovoljno razblažiti drugim elementima, npr. molibdenom. Postoje mnoga piroforna intermetalna jedinjenja koja su i vrlo krta, što otežava operacije. Zato se sve više ide u pravcu korišćenja njegovih jedinjenja karbida i oksida.

METALURGIJA BERILIJUMA

Najvažnija ruda je *beril*, dvostruki silikat berilijuma i aluminijuma. Kao i sve vatrostalne rude, treba je prečistiti pre redukcije. Ovo prečišćavanje se obavlja rastvaranjem u sumpornoj kiselini i naknadnim taloženjem. Redukcija se vrši elektrolizom stopljene smeše natrijum-hlorida i berilijum-hlorida koji se dobija hlorovanjem u prisustvu koksa.

Berilijum je vrlo propustljiv za neutrone i u tom pogledu bi bio bez premca za košuljice gorivnih elemenata u nuklearnim reaktorima. Berilijum je vrlo lak, velike čvrstoće i vrlo dobre termičke provodljivosti. Na nesreću, to je vrlo krt materijal. Stoga nije stekao do sada veću primenu, kao što bi trebalo u nuklearnoj tehnici i aeronautici. Međutim, vrlo važni elementi izvesnih veštačkih satelita izgrađeni su od berilijuma. Uglavnom se koristi kao legirajući element sa bakrom (2 % berilijuma): berilijum bronza ima odličnu otpornost na zamor i abanje.

METALURGIJA KADMIJUMA

Kadmijum je prateći proizvod metalurgije cinka. Nalazi se u velikoj razmeri u kondenzatorskom prahu (cinkovo sivo). Metal se dobija bilo redukcijom ovog produkta pomoću drvenog uglja, bilo preradom plavog mulja koji potiče od prečišćavanja cinkovih ruda.

Kadmijum je dosta otporan prema koroziji i dobar je reflektor, te se upotrebljava za elektrolitičko kadmijumiziranje delova koje treba zaštititi. U nuklearnim reaktorima koristi se njegova velika apsorpciona moć za termalne neutrone za izradu kontrolnih elemenata.

METALURGIJA TITANA

Dve glavne rude titana su *ilisklit* i *rutil* i to su oksidne rude. Metal se dobija hlorovanjem rude u prisustvu koksa i redukcijom tako dobijenog hlorida magnezijumom na 800°C. Dobija se sunđerasti titan, koji treba prečistiti destilacijom u vakuumu.

Titan ima gustinu koja se nalazi između aluminijuma i ultralakih legura. Ima visoku tačku topljenja (1 660°C), dobru mehaničku otpornost i na hladno i na toplo. Ponašanje prema koroziji je dobro. Ovako združene osobine čine titan izvrsnim materijalom za aeronautiku i prostornu tehniku i njegova se primena sve više širi. Osobine mu se još poboljšavaju legirajućim dodacima, naročito radi povećanja mehaničke otpornosti i otpornosti prema oksidaciji na povišenim temperaturama (oko 600°C). Titan se javlja u dve alotropske modifikacije, heksagonalnoj alfa i kubnoj beta na visokoj temperaturi. Legure titana razlikuju se prema tome da li je alfa ili beta-faza stabilisana ili su obe prisutne u smeši. Alfa-legure se lako zavaruju, imaju dobre mehaničke osobine i otporne su prema oksidaciji, ali nisu pogodne za termičku obradu. Najtipičnija je legura sa 5 % aluminijuma i 2,5 % kalaja. Beta-legure se dobijaju dodatkom vanadijuma, hroma, niobijuma, željeza, mangana ili molibdena. Zavaruju se, manja im je mehanička otpornost i otpornost na oksidaciju, ali su pogodne za termičku obradu i mogu se oblikovati na sobnoj temperaturi. Alfa-beta legure, od kojih je najtipičnija ona sa 6 % aluminijuma i 4 % vanadijuma (TA6V), imaju prelazne osobine između prve dve. One se koriste za izradu delova raketa ili satelita

rezervoara za gorivo, lopatica turbina itd. Treba paziti na štetno dejstvo vodonika, koji titan čini krtim.

METALURGIJA CIRKONIJUMA

Glavne rude su cirkon i badaleit, i to su oksidne rude. Postupak proizvodnje metala je u svakom pogledu sličan kao za titan.

Cirkonijum je duktilan i ima izvrsnu otpornost prema koroziji. Vrlo je propustljiv prema neutronima (pod uslovom da je hafnijum uklonjen dalekosežno), što ga čini pogodnim za košuljice gorivnih elemenata. Među mnoge njegove legure spadaju legure cirkaloj (zircalloy), koje sadrže vrlo male dodatke različitih elemenata. Kao i titan, ovaj metal postaje krt pod dejstvom vodonika.

Metalurgija vatrostalnih metala

METALURGIJA VOLFRAMA

Rude volframa su obično oksidi združeni sa kasiteritom, (oksidom kalaja) u šeelitu ili volframitu. Posle prečišćavanja rude, rastvaranjem i taloženjem, ona se redukuje vodonikom.

Zbog svoje visoke tačke topljenja volfram se upotrebljava za vlakna sijalica, za električne kontakte i lučne elektrode. Razvoj gasnih turbina, raketa, zahteva sve više upotrebu materijala koji su otporni prema oksidaciji na visokim temperaturama i koji imaju dobre mehaničke osobine u toplom stanju, posebno dobru otpornost na puzanje. Dodavanjem volframu elemenata koji su jako skloni da obrazuju karbide (titan ili cirkonijum, npr.) dobijene su legure pogodne za takve primene. Jedan drugi metod sastoji se u dispergovanju u volframu malih čestica oksida ili karbida: tako se, npr., sa uspehom koristi legura volframa sa 2 % oksida torijuma. Čelici legirani volframom dostižu izvanrednu tvrdoću: to su *brzorezni čelici*. Sa volframom se mogu načiniti legure vrlo velike gustine. Karbidi volframa imaju veliku tvrdoću i vrlo mnogo se koriste kao alati za sečenje ili kao matrice za izvlačenje žica. One se proizvode sinterovanjem u vakuumu ili u atmosferi vodonika sa malo nikla ili kobalta. Za vreme sinterovanja ovi metali obrazuju tečnu fazu, tako da je gustina krajnjeg proizvoda vrlo blizu teorijskoj.

METALURGIJA TANTALA

Rude tantala su oksidi koji se prerađuju hemijski da bi se dobio čisti oksid. Tantal se dobija elektrolizom rastopa hlorida ili redukcijom pomoću koksa ili kalcijuma.

Tantal je vrlo teško topiv (na 2727°C) i njegove legure služe za izradu delova koji treba da izdrže vrlo visoke temperature. Ako nije legiran, lako oksidiše i nema dobru mehaničku otpornost, ali može da služi, npr., za sudove za žarenje u atmosferi koja nije oksidirajuća. Obično mu se dodaje volframa i molibdena (Tantaloy), koji obrazuju čvrste rastvore sa tantalom, te mu tako povećavaju tvrdoću. Veliku primenu je tantal našao u proizvodnji električnih akumulatora.

METALURGIJA NIOBIJUMA

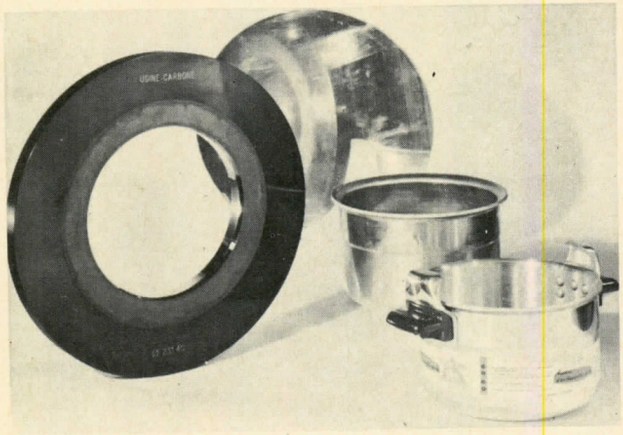
Niobijum se još naziva *kolumbijum*. On je, npr., uvek združen sa tantalom u kolumbitu. Princip odvajanja je isti kao i za prethodni metal.

Kao i tantal, niobijum se upotrebljava zbog svojih vatrostalnih osobina. Topi se na 2500°C. U stvari, on je više tražen nego tantal jer je manje gustine i ima bolju otpornost prema koroziji. Isto tako, on se često legira sa volframom i molibdenom da bi mu se povećala tvrdoća, a ako mu se još dodaju male količine titana i cirkonijuma, koji obrazuju karbide, povećava mu se otpornost prema puzanju, naročito prema oksidaciji.

METALURGIJA MOLIBDENA

Molibdenit je sulfid molibdena. Posle prženja on se redukuje pomoću vodonika.

Molibden je teško topivi metal koji se koristi kada se traži dobra otpornost na povišenim temperaturama, ali ga pri tom treba zaštititi od kiseonika. Od njega se, npr., izrađuju otporni grejači. Kada se legira sa volframom, tačka topljenja mu raste. Njegove legure se, isto tako, koriste za izradu elektronskih cevi. Legure koje sadrže malo titana i bora, imaju vrlo veliku mehaničku otpornost na povišenim temperaturama usled obrazovanja taloga. Njegove legure sve više se upotrebljavaju za izradu lopatica za gasne turbine koje rade na vrlo visokim temperaturama, kao i legure nikla (Hastelloy, sa 65 % nikla, 5 % železa i 30 % molibdena). Najzad molibden se vrlo često dodaje čelicima, čime im se povećava prokaljivost. Isto tako je ustanovljeno da prisustvo molibdena u nerđajućim čelicima utiče da ih živi organizmi lakše podnose, što je važna osobina za proteze. Najzad molibden-bisulfid je jedno od najboljih maziva.



Matrica od volfram karbida »Ugicarb« za duboko izvlačenje aluminijumskih ploča za kuhinjske sudove. *Fot. Photopress, dok. Ugine-carbone.*

OBLIKOVANJE METALNIH KOMADA

Postupci u primeni

Komad metala određenog oblika može se dobiti različitim postupcima, od kojih svaki ima svoju oblast primene, svoja preimućstva i nedostatke. Glavni postupci su:

- *livenje*, pri čemu metal prolazi kroz tečno stanje;
- *plastična deformacija* u hladnom ili toplom stanju, pri čemu metal ostaje u čvrstom stanju;
- *aglomeracija prahova* ili sinterovanje;
- *zavarivanje*, koje omogućuje da se spoje elementarni delovi;
- *obrada rezanjem*, pri čemu se sa metala skidaju strugotine, poseban je slučaj oblikovanja, koji više spada u oblast mašinstva.

Livenje

Livenje je zbir tehnika neposrednog oblikovanja, koje omogućuju da se dobiju komadi različitog oblika, dimenzija i svojstava izlivanjem tečnog metala ili legure u kalup određenog oblika, gde metal očvršćava i hladi se.

Za livenje je potrebno sredstvo za stapanje legure (peć), otisak željenog oblika i dimenzija (kalup) i postupak za transport metala iz peći u kalup.

Očvršćavanje je bitna pojava u procesu livenja.

OČVRŠĆAVANJE

STVARANJE KLICA I POTHLAĐENJE. Treba razlikovati slučaj čistog metala i legure.

Očvršćavanje čistog metala događa se na konstantnoj temperaturi koja se naziva temperaturom očvršćavanja ili topljenja. Ova promena stanja je izotermalna; oslobođena toplota je latentna ili skrivena toplota očvršćavanja. Kada se jedna masa tečnog metala hladi homogeno, na temperaturi očvršćavanja primećuje se pojava čvrstih čestica koje rastu iz »klica« na račun tečne faze. Da bi se ove klice razvijale, tj. da bi napredovalo očvršćavanje, potrebno je da se oslobođene kalorije odstrane. Ako se u toku promene stanja sistem izoluje, očvršćavanje se zaustavlja u stanju koje je tog trenutka dostignuto. Očvršćavanje je utoliko brže ukoliko je hlađenje sistema uspešnije. Dakle, kristali čvrste faze rastu počev od klica. Postoje dve mogućnosti nastajanja klica.

1. Izvesni atomi u tečnosti slučajno zauzmu periodičan položaj, koji odgovara kristalnoj rešetki čvrste faze. Ova pojava se naziva *homogenom nukleacijom*. Klice se mogu uporediti sa malim čvrstim loptama. One bivaju postojane samo ako njihov poluprečnik dostigne određenu vrednost, »kritični poluprečnik«. Ako im poluprečnik ostane ispod te vrednosti, klice se ponovo rastvaraju u tečnosti. Pokazuje se da je ovaj kritični poluprečnik beskonačno veliki na temperaturi očvršćavanja, ali da opada kada se temperatura snižava, dok ne postane dovoljno mali da bi neke klice dostigle veličinu i nastavile da rastu.

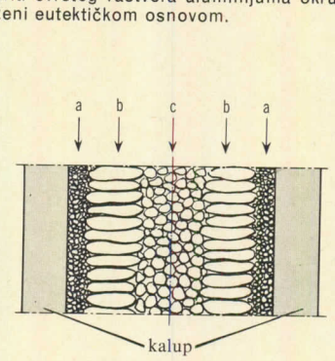
2. Često čestice stranog tela, koje su nerastvorene u tečnom metalu, pomažu obrazovanje klica. Ova nukleacija, koja se naziva *heterogenom nukleacijom*, utoliko je lakša ukoliko je kristalna rešetka nečistoće sličnija rešetki očvrslog metala. Klica i ovde mora da dostigne kritičnu veličinu; to je moguće samo pri temperaturi koja je niža od teorijske temperature transformacije.

Dakle, očvršćavanje uvek počinje pri nekoj temperaturi nižoj od teorijske: to je *pothlađenje*. Pothlađenje je uvek mnogo veće u slučaju homogene nukleacije. Ono može dostići i 370°C za platinu, a 300°C za železo. Ali nukleacija je najčešće heterogena, a pothlađenje je obično ograničeno na nekoliko stepeni. Čim je počelo očvršćavanje, tj. čim klice počnu da rastu, temperatura teži da se digne na svoju teorijsku vrednost. Ona je dostigne i tu se učvrsti do kraja transformacije, sem ako pothlađenje nije bilo suviše veliko.

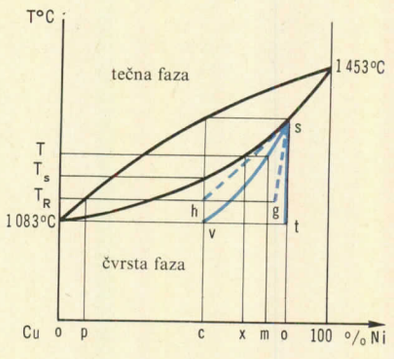
Očvršćavanje legure je takođe pojava pothlađenja. Nastajanje klica u ovom slučaju uslovljeno je, u lokalnim razmerama, time što male zapremine u tečnosti dobijaju ne samo kristalnu strukturu čvrste faze, koja treba da se obrazuje, već i sastav te čvrste faze.



Sl. 32 Legura aluminijum-silicijum ili alpaks. Proeutektoidni dendriti čvrstog rastvora aluminijuma okruženi eutektičkom osnovom.



Sl. 33 Stubasta struktura.



Sl. 34. Očvršćavanje legure bakar-nikl bez difuzije ili uz nepotpunu difuziju.

ZRNO. Kada se očvršćavanje završi, svaka klica koja je dostigla kritičnu veličinu stvorila je po jedno zrno.

Srednja veličina zrna zavisi od broja formiranih klica i od brzine njihova rasta. Ako je hlađenje brzo, nastaje veliko pothlađenje, usled čega nastaje veliki broj klica: dakle, stvara se fino zrno. Ako je hlađenje sporo, pothlađenje je malo i stvara se mali broj klica, zrno je grubo.

Oblik zrna potiče, po pravilu, od anizotropne brzine rasta. Zaista, klice se brže razvijaju u kristalografskim pravcima najgušćeg atomskog pakovanja. Tako kristali metala ili čvrstih rastvora imaju dendritičan izgled usled velike brzine rasta u tri pravca (*sl.* 32). Klica ima tri glavna grananja, koja mogu imati sekundarna grananja u istim povlašćenim pravcima. Svakako, ovaj dendritičan izgled očvršćavanja iščezava ako u toku hlađenje legura podlegne novoj transformaciji u čvrstom stanju. Prema tome, zrno je obično poliedarskog oblika.

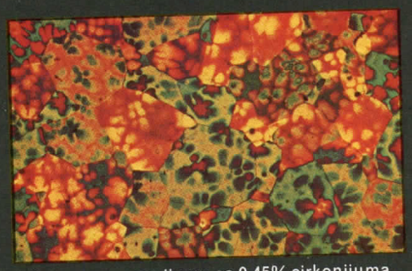
Homogenost zrna se teško postiže. Samo po sebi, hlađenje metala ili legure retko kad je homogeno. U stvari, kalup se nalazi na znatno nižoj temperaturi od temperature očvršćavanja. Metal u dodiru sa zidovima se naglo hladi. Veliko pothlađenje stvara veliki broj klica. Dakle, na površini onoga što će biti ingot ili odlivak stvara se čvrsti sloj finih zrna (*sl.* 33a). Očvršćavanje ovog sloja oslobađa toplotu koja sprečava da se zaostala tečnost tako naglo hladi. Brzina nukleacije je na taj način smanjena i postojeći kristali se razvijaju, ali samo oni kristali čiji je pravac brzog rasta upravan na zid, dakle upravan na izoterme, mogu da rastu u pravcu središta ingota i da na taj način obrazuju velika izdužena zrna (*sl.* 33b). Ova struktura se naziva *bazaltna ili stubasta*. Središte ingota se hladi sporije. Pothlađenje je slabo. Broj klica je smanjen; ove klice rastu polako po celoj masi preostale tečne faze i dolaze u dodir jedna sa drugom. Ova treća zona se naziva »ravnoosna« (*sl.* 33c), pošto su dosta velika zrna haotične orijentacije poligonalnog oblika. Stubasta struktura unosi u ingot anizotropiju i uzrok je tzv. teksture očvršćavanja.

SEGREGACIJA. Očvršćavanje jedne legure, npr., nikla i bakra, može da nastane samo ako se sastav tečne, a naročito čvrste faze može neprekidno da menja, da bi odgovarao odnosima ravnoteže, koji su naznačeni u dijagramu (*sl.* 9). Ovo podešavanje pretpostavlja u toku očvršćavanja difuziju atoma bakra u kristalima čvrste faze koji su već obrazovani, pošto solidus pokazuje da koncentracija bakra čvrste faze raste za vreme očvršćavanja kada se temperatura snižava. Ali difuzija u čvrstoj fazi je relativno spora dok je u tečnoj fazi vrlo brza. Ako je brzina hlađenja vrlo velika, ne može da dođe do difuzije u čvrstoj fazi i, prema tome, koncentracija u istom zrnu nije homogena.

Ako se jedna legura bakra i nikla sastava C hladi dovoljnom brzinom da bi difuzija u čvrstoj fazi bila zanemarljiva, klice imaju sastav *a* i zadržavaju ga. Sloj čvrste faze koji se tek nataložio ima teorijski sastav naznačen solidusom. Vrlo mali sloj koji se nataložio, npr., na temperaturi T, ima sastav *x* i takav zadržava. Prema tome, na toj temperaturi sastav kristala nije homogen, nego se pravilno menja od vrednosti *a* u jezgru kristala do vrednosti *x* na periferiji. Dakle srednji sastav je *m*, između *a* i *x*. Opšte uzev kristali su suviše siromašni u bakru, a tečna faza suviše bogata u odnosu na ravnotežne koncentracije. Na temperaturi T_S teorijskog kraja očvršćavanja ostaje još tečne faze, i očvršćavanje se



Čisti bakar (O. F. H. C.) hladno deformisan 80% i žaren na 700°C.



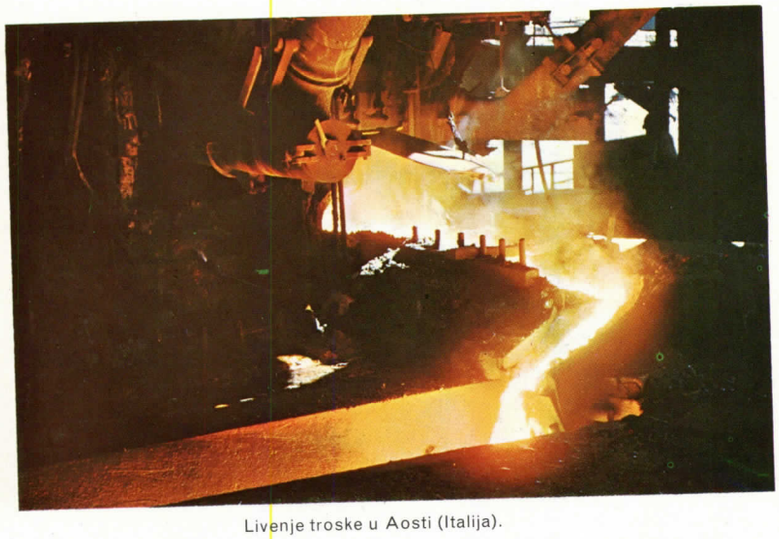
Legura magnezijuma sa 0,45% cirkonijuma.



Peć Kaldo: punjenje gvožđem u fabrici Seremanž-Solak (Sérémange-Sollac).



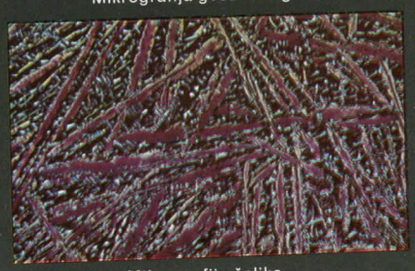
Legura cirkonijuma (Cirkaloj).



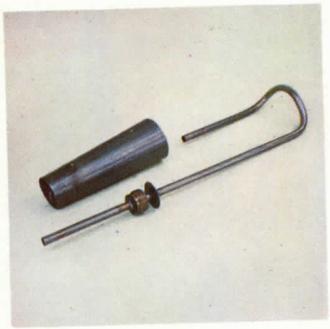
Livenje troske u Aosti (Italija).



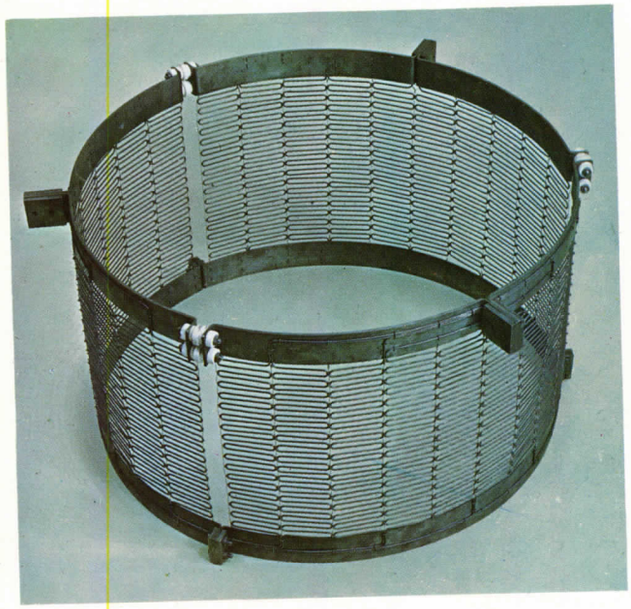
Mikrografija gvozdenog liva.



Mikrografija čelika

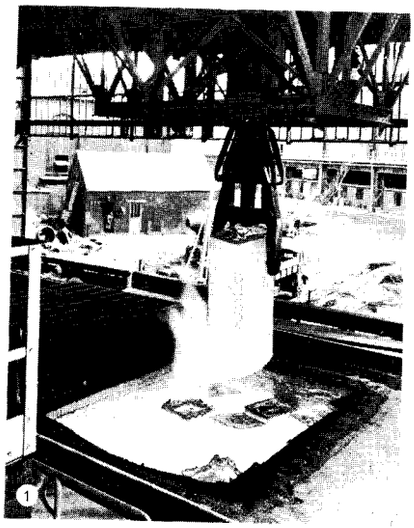


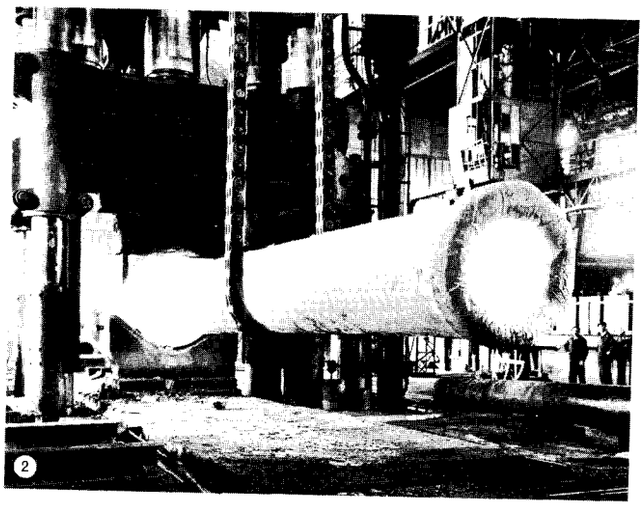
Lonac za topljenje od tantala.

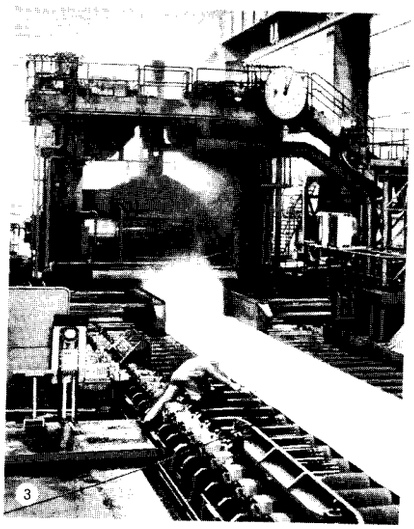


Otporni elementi od molibdena za topljenje u vakuumu.

Fot. C. E. A., I. R. S. Lacheroy, Manet, Tréfimétaux



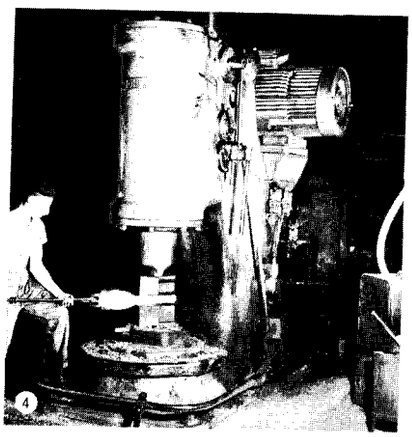


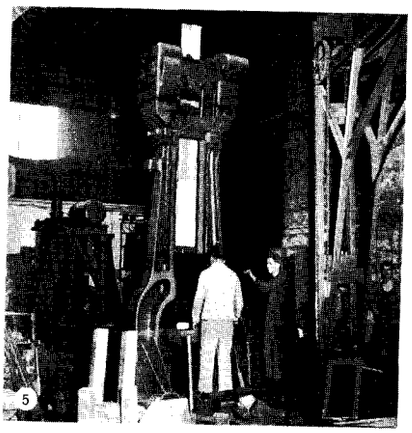


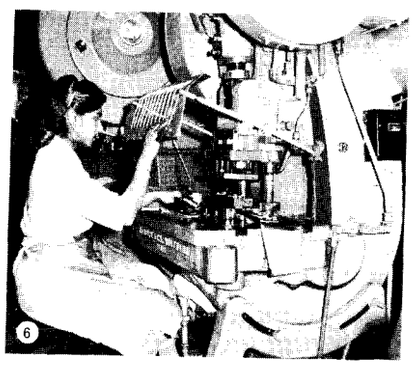
OBRADA METALA

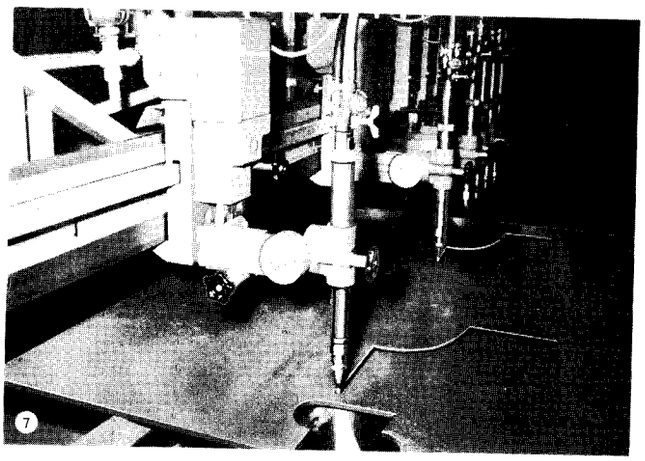
1. Jamska peć za zagrevanje lingota pre valjanja.
2. Hidraulična presa za kovanje velikih predmeta.
3. Kvarto stan, veliki povratni stan za debele limove.
4. Samohodni čekić-malj za kovanje poluproizvoda.
5. Frikcioni čekić sa daskom za pretkovanje, kovanje i kovanje u kalupu.
6. Presa za sečenje ili duboko izvlačenje sa ekscentrom.
7. Baterija oksiacetilenskih plamenika za sečenje.
8. Presa za duboko izvlačenje sa dva ekscentra.
9. Mašina za savijanje sa četiri valjka za debele limove.
10. Mašina za obradu radilica.

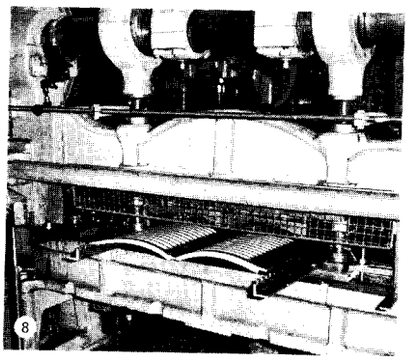
Fot. Lamos, R.N.U.R. Lacheroy, S.F.A.C., Fototeka, G. Meurisse.

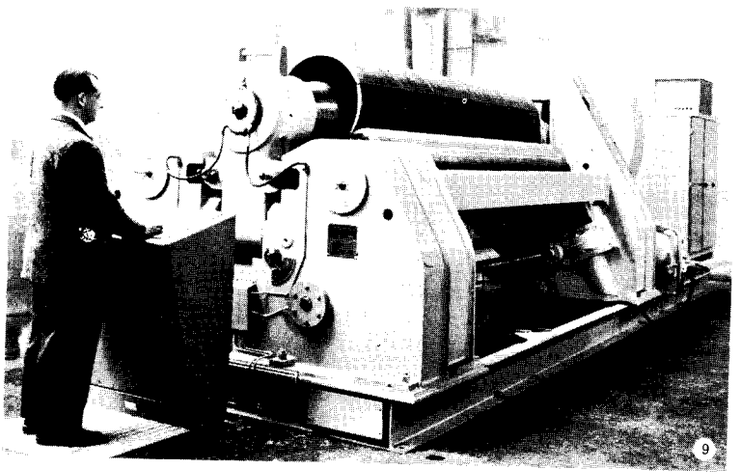


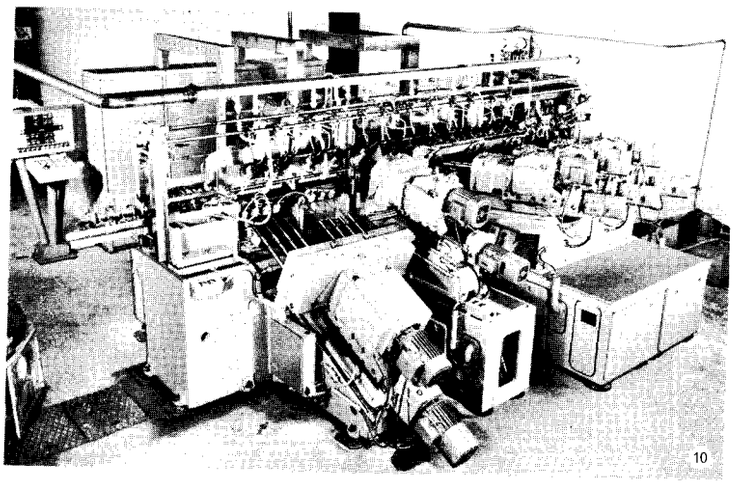












završava na 1083°C, na temperaturi topljenja bakra, a poslednja kap čvrste faze ne sadrži više nikla.

Lokalna koncentracija koja odgovara klicama nije se menjala i opisala je vertikalni odsečak *st* apscise *a*.

Srednja koncentracija kristala opisuje krivu koja se na kraju očvršćavanja zadržava na tački *v* na vertikali celokupne koncentracije legure C. U stvarnosti, difuzija nije potpuno odsutna, tako da se kristali delimično homogenizuju difuzijom bakra u već stvorenoj čvrstoj fazi. Sastav tačke koja je služila za klicu menja se u pravcu teorijskog sastava, ali ga ne dostiže. Odgovarajuća tačka opisuje krivu *sg* na *sl.* 34. Isto tako, razni slojevi teže da dostignu ravnotežni sadržaj, tako da je srednji sadržaj bakra u obrazovanim kristalima veći na datoj temperaturi nego da je difuzija bila potpuno odsutna. Odgovarajuća kriva *sh* nalazi se, dakle, između solidusa i krive za bezdifuzioni proces. Očvršćavanje se završava na temperaturi T_R, koja se nalazi između teorijske temperature T_S i temperature topljenja bakra. Interval očvršćavanja je porastao: $T - T_R$ je veće nego $T - T_S$. Dakle, kad je difuzija nepotpuna, sastav zrna se menja od centra ka periferiji. Ova razlika sastava zrna naziva se *segregacijom u kristalima* ili *mikrosegregacijom*.

U razmerama odlivka javlja se druga vrsta segregacije, *segregacija u bloku* ili *makrosegregacija*. Zaista, tečna faza koja očvrsne na kraju bogata je najlakše topivim metalom. U prethodnom primeru (*sl.* 34) sadržaj bakra poslednjih kapi tečne faze je *p*. U proseku, sadržaj bakra raste od periferije odlivka (zona sitnih zrna) prema centru (ravnoosna zona).

Najzad, pri očvršćavanju nekih legura nastaje vertikalna segregacija kada je razlika u gustini između kristala i tečne faze takva da čvrsta faza stvorena u početku ispliva ili potone.

SKUPLJANJE. Kada se metal ili legura izliju u kalup i dok se ohlade posle očvršćavanja do sobne temperature, njihova gustina se neprekidno menja.

Najpre, u tečnom stanju legura se hladi od temperature livenja do temperature očvršćavanja. U tom intervalu temperature koji se naziva *pregrevanjem*, ona se skuplja. Ovo skupljanje u tečnoj fazi utoliko je veće ukoliko je veći koeficijent termičke dilatacije.

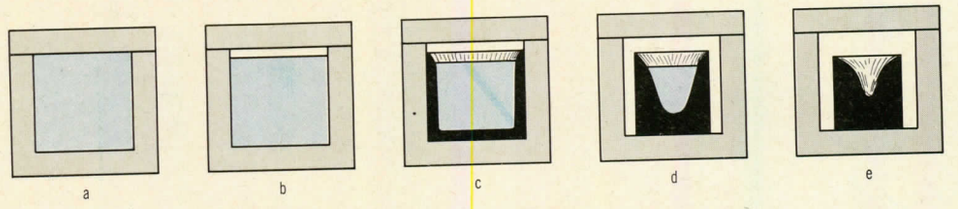
Gustina čvrste faze je obično veća od tečne. Prema tome, očvršćavanje predstavlja još jedno skupljanje. Osim bizmuta, i neki livovi se šire pri očvršćavanju, kao voda. Sa svoje strane čvrsta faza se takođe skuplja pri hlađenju do sobne temperature. Alotropska transformacija može takođe da dovede do skupljanja.

Kvantitativno uzeto, ukupno linearno skupljanje je razlika između linearnih dimenzija kalupa i dimenzija ohlađenog komada. Ono se izražava u milimetrima po metru ili u promilima (‰). Skupljanje se ograničava na taj način što se kalup komada koji treba da se izlije snabde velikom masom tečnog metala nad odlivkom u obliku levka, koji se naziva *hranilištem*. U toj srazmerno velikoj količini metala hlađenje je sporije i očvršćavanje traje duže: na taj način još tečni metal iz hranilišta postepeno se spušta u kalup za vreme očvršćavanja komada.

Posledice skupljanja. Skupljanje unosi određene vrste grešaka.

Male usahline. Mogu se razlikovati tri faze u toku očvršćavanja: najpre dendriti obrazuju prekidnu čvrstu fazu u neprekidnoj tečnoj fazi; zatim se dendriti spajaju i obrazuju neprekidnu sredinu u neprekidnoj tečnoj fazi; zatim se dendriti spajaju i obrazuju neprekidnu sredinu u neprekidnoj tečnoj fazi; najzad, čvrsta faza razdvaja tečnu koja zato postaje prekidna.

Tako nastali džepovi očvršćavaju, zatim, nezavisno jedan od drugog. Čvrsta faza koja se u njima obrazuje, budući da je gušća, ne može da popuni svu zapreminu: stvara se šupljina. Ako je brzina hlađenja bila velika, mnogobrojni kristali izdvajaju džepove male zapremine. Šupljine su vrlo male, nevidljive golim okom. To su *mikrousahline*. Ako je hlađenje bilo sporo, broj izdvojenih džepova je manji, ali su oni veće zapremine, pa stvaraju veće šupljine pod



Sl. 35. Obrazovanje velike usahline.

imenom *male usahline*. Ove usahline nemaju veze sa spoljnom sredinom te ne mogu da se oksidišu; ako je komad poluproizvod, potonji mehanički postupak (kovanje ili valjanje) uklanja ove šupljine; ako je odlivak konačan proizvod, greška se ne može ukloniti.

Velike usahline. Zamislimo da se jedan kalup ispuni tečnim metalom (*sl.* 35a). Pri skupljanju u tečnom stanju spušta se nivo metala u kalupu (*sl.* 35b); očvršćavanje počinje na zidovima kalupa gde je hlađenje najuspešnije. Stvara se kora (*sl.* 35c) i nastaje novo skupljanje usled očvršćavanja. Ova kora pri hlađenju podleže skupljanju koje je odvaja od zidova kalupa. Očvršćavanje napreduje (*sl.* 35d) povećavanjem debljine čvrstog sloja. Skupljanje se srazmerno nadoknađuje spuštanjem nivoa zaostalog rastopljenog metala u srednjem delu ingota, tako da se u gornjem delu odlivka obrazuje jedna šupljina (*sl.* 35c). Takve šupljine se nazivaju *velikim usahlinama*.

Prskotine. Ponekad je skupljanje pri očvršćavanju i u čvrstoj fazi ometano oblikom kalupa. Ako je metal dovoljno plastičan, komad se deformiše. U suprotnom, on puca uz pojavu prskotina. Transformacije u čvrstom stanju, naročito ako se dobijaju kaljenjem, mogu takođe izazvati prskotine.

Unutrašnji naponi. Termički gradijenti koji postoje u komadu za čitavo vreme očvršćavanja, stvaraju naprezanja čije se stanje menja u toku hlađenja. Zbog njih se komad često deformiše. Osim toga, svaka naknadna izmena geometrije komada, npr. obradom, rezanjem, menja stanje naprezanja i zbog toga može nastati nova deformacija. Dugo žarenje komada uz naknadno polagano hlađenje obično omogućuje da se ova naprezanja suzbiju.

Uklanjanje grešaka usled skupljanja. Velike usahline predstavljaju nedopustivu grešku. Može se odseći gornji deo odlivka koji sadrži usahlinu, ali je to veliki gubitak. Da bi se oslobodilo usahlina, obično se ili onemogući njihovo stvaranje ili se dopuste na mestu koje nije štetno.

Suzbijanje usahlina. Usahline se javljaju u zonama koje poslednje očvršćavaju. Zato se može učiniti da se ove zone lokalno hlade od samog početka na pogodan način. Obično se kao hladioci upotrebljavaju metalne mase. Stvaranje usahlina može se sprečiti i usporavanjem hlađenja drugih zona, koje, ako bi se hladile suviše brzo, odvajaju delove komada u toku očvršćavanja. Različiti fizički ili hemijski postupci omogućuju da se hlađenje lokalno uspori.

Ograničavanje usahlina na određeno mesto. Predviđena su hranilišta gde će se smestiti usahline. Hranilište je rezerva metala koja snabdeva šupljine nastale u komadu za vreme skupljanja (*sl.* 36). Ovo hranilište mora očvrsnuti posle zone koju snabdeva tečnim metalom. Zato njegova zapremina mora biti velika da bi rezerva bila dovoljna i da bi to ostalo najtoplije mesto sistema, gde se konačno obrazuje usahlina. Stoga je pogodno da se kalup puni kroz hranilište. Na taj način metal u prolazu zagreva okolinu hranilišta, koje se, osim toga, poslednje napuni toplim rastopom. Oblik hranilišta mora biti takav da ona obezbeđuju zdrav odlivak, da pri tom budu što manje zapremine i da se mogu lako odstraniti (odlamanje velikim čekićem, mehaničko odsecanje i odsecanje plamenom.



Sl. 36
Hranilište.

ŠUPLJIKAVOST. Šupljikavost nastaje zbog prodiranja gasa u odlivak; to su mehuri gotovo loptastog oblika, glatkih zidova. Poreklo im je različito.

— Tečni metal rastvara gasove. Obično rastvorljivost ovih gasova opada sa temperaturom. Zato gasovi u višku teže da napuste metal, ali mogu ostati zatvoreni u obliku mehura ili šupljina.

— Ulazeći u kalup, metal može povući i gasove, naročito ako je livenje turbulentno.

— Kalup je pun vazduha. Ovaj vazduh može obrazovati šupljine, sem ako nije potpuno uklonjen kroz porozni kalup od peska ili pomoću odušaka za vazduh pogodno postavljenih (u slučaju metalnog kalupa).

— Materijal kalupa, isto tako, može da prouzrokuje šupljine. Ako je vlažan, voda isparava i stvara mehure. Nečistoće takođe mogu da izazovu hemijske reakcije koje stvaraju gasove. Ako je očvršćavanje sporo, ovi mehuri mogu da izbiju na površinu. Ako je hlađenje brzo, oni ostaju zatvoreni pod slojem sitnih zrna i pojave se pri prvoj obradi. Stoga je, obično, dovoljno povisiti temperaturu livenja da bi bilo dovoljno vremena da se ovi mehuri uklone pre očvršćavanja.

GREŠKE KOJE POTIČU OD LOŠE LIVKOSTI. Livkost je sposobnost jedne legure da zauzme zapreminu koja joj stoji na raspolaganju. Ona se određuje merenjem dubine do koje ispitivana legura prodire u jednu spiralu pri livenju pod određenim uslovima. Ako livkost legure ne zadovoljava, kalup se loše puni i komad nije tačna kopija modela. Livkost, u stvari, zavisi od pregrejanosti i prirode legure. Ona linearno raste sa stepenom pregrevanja. Obično, dva čista metala imaju bolju livkost nego bilo koja njihova legura, izuzev eutektičkih legura, ukoliko ih ima, čija je livkost isto tako vrlo dobra.

SREDSTVA KOJA SE KORISTE PRI LIVENJU

Livenje se sastoji od tri osnovne operacije:

— izrada kalupa za dobijanje livenih predmeta željenih dimenzija;

— topljenje metala ili legure od koje treba da se sastoje izliveni predmeti;

— livenje ili punjenje kalupa pod pogodnim uslovima da bi se dobili zdravi odlivci, bez grešaka, i čije hemijske, fizičke i mehaničke osobine zadovoljavaju zahteve koji, u stvari, zavise od primene kojoj su ovi predmeti namenjeni.

KALUP je načinjen od dva dela spojena u ravni spajanja; jedan sadrži glavni otisak predmeta za livenje, a drugi je ili ravna ploča ili isto tako otisak i sačinjava zatvarač kalupa. Razlikuje se više vrsta kalupa.

KALUP OD PESKA. Pesak koji se koristi može biti:

— prirodni, koji se sastoji od kvarcnih zrna spojenih omotačem od gline, i

— veštački, koji se obično sastoji od kvarcnih zrna dobijenih mlevenjem šljunka, koja su savršeno kalibrisana; pokrivena su omotačem od prirodne koloidne gline (bentonit) ili od gline koja se dovede u takvo stanje hemijskim postupkom.

Izabrani sastav peska zavisi od metala koji treba izliti i od oblika predmeta koji treba izraditi. Ali u svakom slučaju, pesak pre upotrebe treba da se homogenizuje i pripremi drobljenjem, mlevenjem, prosejavanjem i ispiranjem. Pesak mora imati sledeće bitne osobine:

— dovoljnu koheziju da bi sačuvao dati oblik pri uzimanju otiska;

— sposobnost da izdrži termičke udare prilikom livenja;

— takvu propustljivost da gasovi različitog porekla mogu da se odstrane, a da tečni metal ne može da se uvuče između zrna peska;

— dovoljnu mehaničku otpornost da izdrži mlaz metala koji se uliva, ali ipak dovoljno nisku da ne bi sprečavao skupljanje odlivka.

Pesak se mnogo puta može ponovo iskoristiti uz dodavanje vode i novog peska.

Svrha kalupa. Delovi peščanog kalupa koji odgovaraju spoljnim površinama predmeta koje treba izraditi dobijaju se pomoću *drvenih* ili *metalnih modela*. Unutrašnji delovi koji daju oblik i dimenzije šupljina u predmetu načinjeni su od peščanog *jezgra* uz pomoć *jezgrenika*, takođe od drveta ili metala.

Izrada modela i jezgrenika naziva se *modeliranje*.

Pri ručnoj izradi kalupa od peska za predmete malih i srednjih dimenzija, koji se izrađuju pojedinačno ili u malim serijama, koristi se obično, lakovano ili obojeno drvo: jela, hrast, bor, vrba, lipa, eventualno orah ili kruška. Ove vrste drveta zadržale su se u upotrebi zbog njihove dobre otpornosti na mehaničko naprezanja, na udare i na vlažnost da bi se sprečila deformacija modela u dodiru sa vlažnim peskom. Od ovih drveta zahteva se, isto tako, da se dobro glačaju, da bi se olakšao postupak odstranjivanja modela tako što se smanjuje trenje površina o vlažan pesak dobijenog kalupa.

Modeli za mašinsko kalupljenje na odgovarajućim mašinama za izradu serije odlivaka obično su metalni. Najviše se koriste modeli od lakih legura, od gvožđa, od nikla, od legura cinka i olova. Isto tako, prave se modeli od plastike. Njihove osobine su na sredini između drvenih i metalnih modela.

Skupljanje. Zbog skupljanja metala posle livenja, dimenzije kalupa treba da su malo veće od dimenzija predmeta koji će se izraditi. Pri izradi modela za kalup se koriste lenjiri koji su posebno obeleženi (livački metri), na kojima je pri upisivanju dužina uzeto u obzir skupljanje metala za koji su načinjeni. Ove dužine u milimetrima, centimetrima, decimetrima i metrima povećane su za vrednost koja odgovara skupljanju: »metar« modelara je veći nego metar, jedinica za dužinu. Svaki od ovih lenjira sadrži broj koji odgovara skupljanju metala za koje su napravljeni. Upotrebom lenjira čiji broj odgovara naznačenom skupljanju dobijaju se dimenzije modela koje su sistemski povećane za veličinu skupljanja.

Skupljanje livenog čelika je veće od skupljanja drugih metala i legura. U izvesnim slučajevima ono prelazi i 20 ‰. Za predmete od gvožđa ono je reda veličine 10 ‰, za tanke delove predmeta, 6 ‰, za visinu punog valjka i 8 ‰ za prečnik tog valjka.

Zakošenje. Da bi se model mogao izvaditi, a da se kalup ne ošteti treba da sve površine modela budu malo nagnute u odnosu na ravan vađenja modela. Ovaj ugao nagiba naziva se *zakošenje*: on se menja od 1 do 5°.

Ako su neki delovi predmeta u suprotnom zakošenju vađenje modela nije moguće. U tom slučaju treba povećati broj ravni spajanja ili koristiti spoljna jezgra, što povećava cenu odlivka.

Dodatak za obradu. Gotovo sve odlivke za mašinsku industriju treba naknadno obraditi, bar neke njihove površine. Zato odlivak koji dolazi iz livnice treba na nekim mestima da bude veći nego konačni predmet. Ova dodatna debljina materijala, koja je određena da bude docnije odstranjena rezanjem, naziva se *dodatak za obradu*. Zato ga treba predvideti na modelu.

Izrada kalupa i vađenje odlivka. Kalupi se izrađuju na više načina.

Izrada kalupa u kalupnicima. Izrada kalupa može biti ručna i mašinska. Po ručnom postupku, koji se primenjuje na manje serije ili za pojedinačne predmete, pesak se nabija u kalupnik oko modela. Ako je predmet okrugao, može se u pesku okretati šablon koji ima profil predmeta koji treba izliti. U mašinskom postupku kalupnici se pune peskom pomoću razvodnika, peskometa. Pomoću njih se mehanički nabacuje i zbija kalupna smeša u kalupnik.

Odlivak se vadi razaranjem kalupa. Prema tome, kalup od peska služi samo jedanput.

Izrada kalupa u grudvi. Ovaj postupak je poseban način kalupovanja u pesku, koji se sastoji u upotrebi kupastih ili rasklapajućih kalupnika, koji se skidaju sa kalupa čim je ovaj gotov. Taj postupak se mnogo koristi za odlivke male i srednje težine, zbog veoma smanjenog broja kalupnika u livnici i zbog gotovo ukinute potrebe da se o njima vodi briga.

Izrada kalupa u jami. Za vrlo velike odlivke kalup se izrađuje neposredno u velikoj jami ispunjenoj peskom, koja je iskopana u podu livnice. Tako se postupa, npr., pri izradi kalupa za rotore turbina. Obično se na dno jame pod peskom postavlja sloj koksa da bi se olakšao odvod gasova iz donjeg dela kalupa.

Sve legure koje se danas liju, mogu da se liju u peščanim kalupima.

METALNI KALUP ILI KOKILA dobija se obradom masivnog komada, najčešće metalnog (čelik, gvožđe, bronza). Takva obrada je vrlo skupa, ali se sa jednom kokilom može dobiti veliki broj odlivaka. Zato je ovaj postupak pogodan za izradu velikih serija. Sve industrijske legure mogu da se liju u kokili, ali se za čelike ređe primenjuje, pošto njihova visoka temperatura topljenja brzo upropaščuje kokile. Hlađenje odlivka je obično mnogo brže u kokili nego u peščanom kalupu. Zato je zrno sitnije, mehaničke osobine su bolje, kao i stanje površine. Ali su kokile nepropustljive za gasove, a otežavaju i skupljanje.

ŠKOLJKA. Livenje u školjki je nov poluautomatski postupak izrade kalupa u pesku koji sadrži veštačko vezivo (prah termootvrdnjavajuće smole, obično fenolne bakelitnog tipa). Model, koji je obavezno od metala, ima oblik ploče koja se drži na oko 200°C u sušnici, pošto je prethodno premazana slojem silikonskog ulja da bi se olakšalo naknadno rasklapanje. Zatim se smeša peska i praha termootvrdnjavajuće smole nabacuje ili pritiska na toplu model-ploču. Na površini ploče nastaje vrlo brzo otapanje smeše peska i smole. Zatim se ova ploča okrene da bi se otresao suvišan pesak, a na njoj ostaje školjka od stvrdnutog peska debljine 4—10 mm, koja tačno zadržava oblik ove model-ploče. Polimerizacija se izvodi tako što se školjka sa pločom stavi u sušnicu na oko 400°C. Zatim se školjka odvoji da bi se model-ploča mogla ponovo upotrebiti. Tako se dobija vrsta polukokila ili školjki, koje se spajaju u odgovarajući komad da bi se načinio kalup.

Rukovanje ovim školjkama i njihovo čuvanje su dosta laki, imajući u vidu njihovu relativno malu težinu i malu debljinu. Osim toga, pošto su neosetljive na vlagu i temperaturu, mogu se čuvati na neodređeno vreme. One se ne vitopere čak ni na toploti, što omogućuje da se sklapaju lepljenjem na toploti.

KALUP SA TOPLJIVIM VOSKOM. Ovaj postupak, koji je poznat još iz najranijeg antičkog doba za livenje umetničkih predmeta od bronze, omogućuje dobijanje mašinskih delova vrlo velike tačnosti, te je njihova potonja obrada rezanjem svedena na najmanju meru. Model, zajedno sa hranilištima i ulivnim kanalima, izrađuje se potpuno od voska. Zatim, pošto se pokrije premazom, on služi za izradu kalupa u jednom komadu, bez ravni spajanja.

Posle sušenja na vazduhu i stvrdnjavanja ovaj kalup se zatim suši i zagreva u peći. Vosak iscuri kroz ulivne kanale i izgori. Sloj premaza ostaje u kalupu i sačinjava otisak u koji se lije metal. Posle očvršćavanja i hlađenja predmeta kalup se razbija, a ulivni kanali se odvajaju od samog predmeta.

Po ovom postupku, voštani model se mora ponovo izraditi toliko puta, koliko predmeta treba da se izliju. Obično, ovi modeli se dobijaju polazeći od sklopa metalnih kokila, koji se naziva *matični model* i puni se biljnim voskom koji se u testastom stanju utiskuje pomoću specijalne prese.

Za livenje velikog broja istih predmeta voštani modeli se spajaju kod hranilišta, koja su takođe od voska i kod voštanih ulivnih kanala, obrazujući tako *grozdove modela*, koji imaju zajednički grlić za ulivanje i, obično, zasebno hranilište.

Postupak livenja sa topljivim voskom se koristi industrijski za izradu velikih serija malih predmeta od nerđajućeg i vatrostalnog čelika (krilca turbokompresora avionskih motora, lopatice parnih turbina i turboreaktora, mali predmeti kao delovi tekstilnih mašina, aeronautike, itd.).

Njegove prednosti leže u kvalitetu stanja dobijene površine, u odsustvu »brkova« spajanja i u tačnosti tako dobijenih predmeta, koja je reda ± 0,1 mm.

Postoje mnogobrojne varijante. Jedna od njih se sastoji u zameni voska živom koja se očvrsne hlađenjem na oko —40°C. Prednost ovog postupka uglavnom je odsustvo skupljanja žive za vreme njenog očvršćavanja u matičnom modelu.

KALUP U PESKU SA TOPLJIVIM MODELIMA. Ovaj novi postupak, koji potiče od starog postupka sa topljivim voskom, upotrebljava se za dobijanje velikih složenih odlivaka gvožđa, pojedinačno ili u malim serijama. Model se izrađuje od šupljikavog polistirola, zatim se stavlja u kalupnik i pokriva potpuno livačkim peskom tako da se ostave samo otvori za ulivanje i, eventualno, otvori za hranilišta, kao pri izradi peščanog kalupa. Za vreme livenja šupljikavi polistirol sagori, a metal zauzima njegovo mesto u kalupu. Posle hlađenja i očvršćavanja metala odlivak se vadi tako što se razbija kalup.

Prednost ovog postupka je najviše u pojednostavljenju izrade kalupa, u odsustvu spojnih površina i u mogućnosti da se liju odlivci sa obrnutim zakošenjem. Model od šupljikavog polistirola je izuzetno lak, što olakšava rukovanje. Najzad, ugljenik koji nastaje sagorevanjem polistirola pod dejstvom stopljenog metala nalazi se na površinama kalupa, što poboljšava stanje površine dobijenih odlivaka. Kao i u postupku sa topljivim voskom, potrebno je toliko modela od polistirola koliko i komada koji treba da se odliju.

Za velike serije može se predvideti izrada modela uz pomoć glavnog metalnog modela.

PEĆI ZA TOPLJENJE. Vrste peći koje se koriste za topljenje metala i legura radi njihovog livenja zavise od temperature topljenja tih proizvoda.

Peći za sagorevanje. Potrebna toplota za topljenje šarže dobija se sagorevanjem čvrstog materijala (uglja), tečnog (ugljovodonika) ili gasovitog (prirodnog gasa ili gasova različitog porekla). Glavne peći za sagorevanje koje se koriste u operaciji livenja su sledeće:

Jamaste peći, od kojih je najvažnija kupolna peć, su vrsta skraćene visoke peći koja se upotrebljava za gvožđe. Gorivo je koks.

Peći sa topilištem (plamene peći), u kojima se mogu sagorevati različita goriva i koje se takođe koriste za topljenje gvožđa, dozvoljavaju da se može tačno podešavati sastav legure koja se prerađuje.

Rotacione peći, koje, zbog gorionika koji bacaju plamen pravo na šaržu, omogućuju dobijanje viso-

kih temperatura, te su pogodne za topljenje legura ili metala sa visokom tačkom topljenja.

Peći sa loncem, koje služe za topljenje svih legura. Lonac koji sadrži leguru za topljenje postavlja se iznad ognjišta za tečno ili gasovito gorivo. Lonac mora biti od vatrostalnog materijala i hemijski otporan prema metalu koji sadrži.

Konvertori, u kojima se rastopljeno gvožđe iz visoke ili kupolne peći prerađuje u čelik, koji se zatim lije. Toplota, potrebna da se šarža održava u rastopljenom stanju, dobija se sagorevanjem prisutnih nečistoća (Si, Mn, C, P).

Električne peći. U ovom slučaju potrebna toplota dobija se pomoću električne struje. Glavne električne peći koje se koriste u livarstvu su:

Otporne peći, u kojima električna struja prolazi kroz otpornik i stvara Džulovu toplotu. Otpornik može da bude nemetalan (grafit) ili metalan (legura nikla i hroma). Obično se toplota prenosi na šaržu zračenjem.

Lučne peći, u kojima se između elektrode i metala koji se topi uspostavlja luk. Električno kolo se zatvara bilo preko još jedne elektrode ili preko topilišta. Elektroda je obično od ugljenika (amorfni ugljenik ili grafit); u slučaju kada je ugljenik štetan, ona može biti od vatrostalnog metala kao što je volfram. Najzad, materijal elektrode može biti i sam metal koji se topi; takva elektroda, koja se naziva »potrošnom«, izrađuje se van livnice.

Indukcione peći, u kojima se metal zagreva strujom koju indukuje kalem kroz koji prolazi naizmenična struja. Ovaj postupak obezbeđuje brzo zagrevanje i može se primeniti za sve legure.

LIVENJE. Livenje je operacija sipanja rastopljenog metala u kalup. Prenos rastopljenog metala između peći za topljenje i kalupa koje treba napuniti obavlja se većinom u loncima. To su obično sudovi sa metalnim omotačem obloženi vatrostalnom opekom, koji imaju ili nos ili otvor za livenje. U poslednjem slučaju metal ističe sa dna lonca pomoću sistema koji se sastoji od otvora i čepa. U nekim posebnim uređajima tečni metal se izliva iz peći za topljenje neposredno u kalup. Vrlo veliki kalupi ne mogu se pomerati s mesta, te se livenje metala obavlja na mestu izrade kalupa. To posebno važi za kalupe izrađene u jami.

PREKIDNO LIVENJE. Livenje je prekidno ako se mlaz rastopljenog metala ili legure prekida svaki put kada se kalup napuni.

Obično livenje ili livenje na principu gravitacije. Metal pada usled svoje težine u kalup. Kalup može da se postavi pod otvor za livenje na peći za topljenje (npr., plamena peć) ili se metal može preliti iz nagibnog lonca za topljenje, koji je bio napunjen na izvoru tečnog metala (npr. konvertor ili električna peć). Metal pada u ulivnu čašu i stiže u kalup usled nagiba livenja. Ako mlaz liva stiže direktno u kalup, to je direktno livenje ili livenje slobodnim padom. Ulivni kanal može isto tako da služi za odušak i kao hranilište, ali ovaj metod važi samo za jednostavne odlivke. Ako je mlaz liva u vidu kapljica i dospeva do kalupa na više mesta, to je livenje prskanjem. Ako metal nailazi na otisak kalupa sa donje strane, to je livenje sa dna.

Livenje u vakuumu. Topljenje i livenje u vakuumu upotrebljava se naročito za metale i legure koji lako oksidišu na vazduhu. Ali sve više se koristi i za odlivke od čelika. Pošto nikakvi gasovi nisu uticali na tečno kupatilo, većina problema pri livenju sa gasovima otpada. U stvari, kalup je prazan, nikakvi gasovi nisu ni dovedeni ni rastvoreni u mlazu liva. Međutim, treba degazirati kalup pre upotrebe. S druge strane, odstranjivanje gasova tečnog metala u vakuumu daje zdravije odlivke.

Uređaj se sastoji od jedne komore pod vakuumom koja može da se okreće i sadrži lonac koji se zagreva indukciono i nalazi se pored kalupa koji treba da se napuni. Posle stapanja metala okretanjem komore pod vakuumom metal pada u ulivni kanal kalupa. Operacije se nadgledaju kroz okno ili pomoću televizije.

Livenje pod pritiskom najviše se koristi za livenje u metalne kalupe složenih odlivaka od lakih legura (legure bakra, aluminijuma, magnezijuma), čija tačka topljenja nije suviše visoka. Ono omogućuje vrlo visoku produktivnost pošto je punjenje i hlađenje kokile vrlo brzo.

Ima dve vrste mašina za livenje pod pritiskom.

U mašinama sa toplom komorom jedan lonac za livenje zahvata metal iz rezervoara i zatim se spaja sa kalupom pomoću za to predviđenog uređaja. Pritisak, koji se ostvaruje komprimovanim vazduhom ili klipom, nagoni metal da ispuni kalup. Zatim se kalup odvoji od lonca za livenje, koji se ponovo puni tečnim metalom, a za to vreme se odlivak izvlači iz kokile.

U mašinama sa hladnom komorom kalup je stalno povezan sa jednim rezervoarom koji prima potrebnu količinu metala za odlivak. Zatim jedan klip istera metal iz rezervoara u kalup. Odlivak se odstranjuje čim očvrsne, a za to vreme rezervoar se ponovo puni. Kad se kalup i rezervoar ponovo zatvore, lije se sledeći odlivak.

Livenje okretanjem omogućuje da se dobiju šuplji odlivci, čije stanje unutrašnje površine nije mnogo važno (kipovi, olovni vojnici, vaze itd.). Kokila ima horizontalnu osu okretanja. Čim je jedan dovoljno debeo sloj metala očvrsnuo u dodiru sa kokilom, ova se okreće oko svoje ose. Zaostali tečni metal se prospe i dobija se šuplji odlivak oblika kokile.

Centrifugalno livenje se veoma mnogo koristi, naročito za okrugle predmete; izvodi se na tri načina:

Pravo centrifugalno livenje najviše se primenjuje za okrugle predmete. Ovim metodom dobija se većina livenih cevi za gradsku razvodnu mrežu za plin i pijaću vodu, sve do prečnika reda veličine 1 200 mm. Držač kalupa, koji se sastoji od metalnog omotača hlađenog obično vodom, ima unutrašnju oblogu od peska, koja, u stvari, predstavlja kalup. Taj kalup bez jezgra, postavljen horizontalno na točkiće, okreće se oko svoje ose i u njega se sipa rastopljeni metal preko izlivnog nosa, koji se može pomerati u odnosu na kalup. Zahvaljujući ovom pomeranju, vrši se postupno punjenje po celoj dužini kalupa. Usled centrifugalne sile rastopljeni metal prianja uz peščani zid kalupa i očvršćavanje počinje od spolja ka unutra. Obično se peščani kalup razori pri vađenju odlivka. Brzina okretanja kalupa mora biti dovoljna da bi centrifugalna sila bila veća od sile teže.

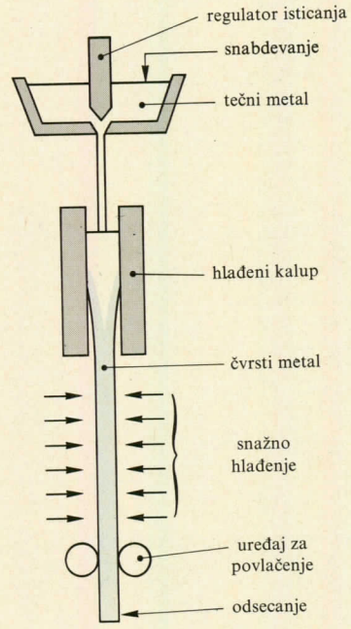
Polucentrifugalno livenje obavlja se okretanjem kalupa oko svoje ose u vertikalnom položaju. Nasuprot pravom centrifugalnom livenju, sve šupljine se ostvaruju pomoću jezgara. Osa otvora za livenje je istovremeno i osa rotacije, a centrifugalna sila, u stvari, olakšava da se ispune periferne šupljine kalupa.

Taj postupak se najviše koristi za livenje točkića, kaišnika, točkova, venaca, zupčanika, doboša za kočnice, glodalice sa pravim ozubljenjem, glatkih ležaja, košuljica za eksplozione motore. Osobine metala su poboljšane, a naročito otpornost na abanje.

Centrifugalno livenje pod pritiskom primenjuje se za odlivke bilo kog oblika i predstavlja izmenjeni postupak livenja pod pritiskom.

Kalup je obično tako izveden da omogućuje istovremeno livenje velikog broja odlivaka, a delovi kalupa koji se pune postavljeni su simetrično da bi se obezbedila njegova ravnoteža pri okretanju, kao i dobra raspodela rastopljenog metala. Kao i prethodno, osa ulivnog kanala je istovremeno i osa okretanja. Centrifugalna sila tera metal u delove kalupa koji se pune utoliko snažnije ukoliko su dalje od ose ulivnog kanala, što rastopljeni metal prisiljava da savršeno ispuni sve detalje kalupa. Pored toga, mehaničke osobine tako dobijenih odlivaka su poboljšane, tj. granica elastičnosti, zatezna čvrstoća, ukupno izduženje i kovnost.

NEPREKIDNO LIVENJE. Ovaj postupak (*sl.* 37) koristi se za neprekidno livenje šipki nepromenljivog preseka i poluga, a ponekad i poluprerađevina (cevi) najčešće od lakih legura ili od bronze, ređe od čelika.



Sl. 37

Princip se sastoji u livenju rastopljenog metala u vertikalni kalup čiji su krajevi otvoreni i koji se hladi vodom. U početku rada u kalup se stavlja poluga pogodnog oblika, koja se zatim spušta stalno istom brzinom kojom i metal ulazi u kalup. Zbog vrlo energičnog hlađenja usled proticanja vode, očvršćavanje metala napreduje sa spuštanjem. Brzina spuštanja podešava se da bi poluga potpuno očvrsla pre nego što napusti kalup. Na taj način se mogu dobiti šuplji odlivci i okrugle poluge bilo kakvih preseka svih oblika i dimenzija. Da bi se dobili šuplji odlivci, dovoljno je da se na otvor kalupa postavi jezgro koje se hladi protočnom vodom.

Ovakvi uređaji za neprekidno livenje moraju se graditi uspravno, pa su zbog toga dosta visoki. Prednost ovog postupka je, pre svega, u tome što se dobijaju poluge bez šupljina i bez otpadaka. Osim toga, hlađenje je dovoljno brzo da bi se segregacija veoma smanjila, a metal, pošto nije porozan, ima finiju strukturu nego metal izliven u pesku ili u kokili.

Oblikovanje plastičnom deformacijom

OPŠTI POJMOVI. Oblikovanje metala plastičnom deformacijom postiže se tako što se on prinudi da promeni svoj oblik kada se izloži određenim mehaničkim opterećenjima. Najčešće je prvobitni oblik jednostavan. Ako se deformacijom žele promeniti samo osobine metala, konačni oblik takođe ostaje jednostavan. Ako, pak, treba da se dobije grubi oblik proizvoda ili čak gotov proizvod, oblik se menja od jednostavnog ka složenijem.

Pri plastičnoj deformaciji važno je ponašanje metala. Ove deformacije se dobijaju vrlo različitim uređajima.

Uticaj plastične deformacije. Deformacija menja fizičke i mehaničke osobine metala, a i njegovu mikrografsku strukturu i kristalografsku orijentaciju.

Promene osobina metala. Ako se epruvete nekog metala, koje su bile plastično deformisane u različitom stepenu, podvrgnu klasičnim mehaničkim ispitivanjima, vidi se da se različite mehaničke osobine metala menjaju zavisno od stepena deformacije. Osobine kao tvrdoća, otpornost na kidanje σ, granica elastičnosti E, koje karakterišu statičku otpornost na deformaciju, poboljšavaju se kada se stepen deformacije povećava. Nasuprot tome, duktilnost, tj. izduženje pri kidanju ε u % i sužavanje Σ, kao i žilavost smanjuju se. *Sl.* 38. pokazuje opšti tok promene ovih osobina.

S druge strane, gustina se vrlo malo povećava pri deformaciji. Metali u deformisanom stanju su manje otporni prema koroziji, a specifični električni otpor im je znatno povećan.

Promene mikrografske strukture. Plastična deformacija izaziva porast broja dislokacija. Kada je deformacija vrlo velika, prvobitno je zrno razoreno. Ono se sve više rasparčava i struktura može biti znatno izmenjena.

Pojava tekstura. U svakom zrnu određene ravni i kristalografski pravci teže da se poređaju u pravcu deformacije. Ova pojava se može ispitivati difrakcijom X-zraka i neutrona. Ova »tekstura« daje metalu anizotropne mehaničke osobine, koje utiču na eventualnu potonju deformaciju.

Pored ove kristalografske teksture javlja se i »vlaknasta« tekstura: uključci, šupljikavost, usahline teže da se poređaju u pravcu deformacije i da unesu anizotropiju. Ako se kovanjem gnječi komad u kome ima šupljina i uključaka, ove šupljine postaju plosnate i u obliku diskova, koji predstavljaju prekid u strukturi, a uključci poprimaju, više-manje, oblik plosnatih sočiva. Zna se dobro da je u pravcu *a* otpornost na kidanje veća ili manja, već prema tome da li je ono normalno ili u pravcu deformacije.

Odstranjivanje uticaja plastične deformacije. Žarenje. Ovo poništavanje se obično postiže žarenjem. Mogu se razlikovati tri faze pri žarenju deformisanog metala.

U toku prve faze, koja se naziva *oporavljanjem,* mnogobrojne greške kristalne rešetke (šupljine, dislokacije) iščezavaju, a unutrašnji naponi se smanjuju, ali se ni mikrografska struktura ni kristalografska tekstura ne menjaju.

Na određenoj temperaturi, koja inače zavisi od mnogih činilaca, deformisana zrna usled plastične deformacije bivaju zamenjena novim vrlo pravilnim zrnima: to je *rekristalizacija.* Ova zrna, kao i u slučaju očvršćavanja, potiču od klica koje nastaju u čvrstoj fazi i rastu na račun deformisanih zrna. Orijentacija novih zrna je nezavisna od starih. Da bi se rekristalizacija dogodila, potrebno je da metal bude podvrgnut minimalnoj deformaciji, koja se naziva *kritičnom deformacijom.* Ukoliko je deformacija veća, utoliko je rekristalisano zrno sitnije. Sa napredovanjem rekristalizacije mehaničke osobine se vraćaju na vrednosti koje su imale pre deformacije, kao što se vidi na *sl.* 39. Žareni uzorak nema više kristalografsku teksturu. Međutim, ponekad rekristalizaciju prati pojava nove teksture rekristalizacije.

Posle rekristalizacije pri produženom žarenju pojedina zrna rastu na račun svojih suseda. Žarenje veoma malo utiče na vlaknastu strukturu.

Oblikovanje u toplom i u hladnom stanju. Kaže se da se oblikovanje jednog metala vrši u toplom stanju ako je temperatura takva da rekristalizacija neprekidno poništava uticaj deformacije. Prema tome, u metalu u toplom stanju događa se plastična deformacija a da se pri tom ne povećava njegova mehanička otpornost. Prvobitne strukture, kao, npr., stubasta struktura očvršćavanja, bivaju uništene i zamenjuju se vrlo pravilnim strukturama. Znači da je obrada metala u toplom stanju vrlo korisna, ali se mora paziti da metal ne oksidiše, a temperatura se mora održavati u određenom intervalu, iznad koga može da nastaje topljenje, a ispod koga brzina rekristalizacije nije dovoljna.

U toku obrade metala u hladnom stanju metal postaje sve otporniji i sve manje dopušta da se deformiše. Stoga se oblikovanje često mora prekinuti da bi se metalu žarenjem povratila duktilnost. Konačni stepen deformacije podešava se kako bi se dobile određene mehaničke osobine.

Klasični postupci oblikovanja plastičnom deformacijom

KOVANJE. Pod kovanjem se podrazumeva skup operacija koje se vrše na komadima metala menjanjem oblika materijala pod uticajem udaraca ili pritiska, bilo na sobnoj temperaturi (kovanje u hladnom stanju) za oblikovanje kovnih i duktilnih materijala, bilo u toplom stanju, iznad temperature rekristalizacije (kovanje u toplom stanju), za oblikovanje čelika, kao i metala i legura sa velikom granicom elastičnosti.

PRINCIP. Ovaj postupak stvara u metalu vlaknastu strukturu koja se nikada ne može potpuno ukloniti, čak ni žarenjem, i poboljšava osobine metala.

Već prema obliku alata koji najvećim delom prenosi sile pritiska, metal se može deformisati na različite načine: može se izdužiti u jednom pravcu uz smanjivanje preseka (npr., kovanje osovine za turbinu), smanjiti dužina uz povećanje preseka (kovanje točka za zupčanik) ili pak grubo uobličiti geometrijski jednostavnim deformacijama (savijanje, probijanje).

Ali kovanje nije samo postupak za oblikovanje materijala. Ono dovodi do poboljšanja mehaničkih osobina metala: zatvara pore, spljeskava šupljine, zavaruje mikrousahline, čini uključke plosnatim. Usled ove mehaničke obrade nastaje vlaknasta struktura koja predmetu daje mnogo bolje mehaničke osobine u pravcu vlakana. Zbog toga vlakna treba da se stvaraju u pravcu u kome će metal biti najviše napregnut. Osim toga, kovanje često unosi vrlo velike deformacije, koje razaraju postojeće zrno, posebno stubasto zrno, izazivajući vrlo finu rekristalizaciju.

Prema tome, kovanje je operacija od dvostrukog interesa: ona omogućuje da se komad grubo uobliči i da mu se daju dobre mehaničke osobine. Isto tako, kovanjem u toplom stanju mogu se zavariti dva ili više komada. Uspeh operacije zavisi od mnogobrojnih uslova koji se odnose na kvalitet metala, njegovu temperaturu, prirodu, brzinu i stepen deformacije itd. Ako se udalji od idealnih uslova, mogu se pojaviti greške. Među njima su najvažnije:

— nedovoljno prodiranje, kada je kovanje bilo ograničeno na površinski sloj, a jezgro zadržalo svoju livačku strukturu;

— površinske prskotine;

— boranje metala i

— uvlačenje stranih čestica.

PRETKOVANJE I KOVANJE U KALUPU su postupci kovanja u vrućem ili hladnom stanju: oni omogućuju da se sa jednom ili više operacija dobiju otkivci što je moguće sličniji obliku koji komad treba da ima posle konačne obrade.

Materijal, obično u obliku komada šipke ili poluge, čija je zapremina nešto veća od zapremine gotovog predmeta, stavlja se između dva dela kalupa pričvršćena na presu. Zatvaranjem prese (*sl.* 40) metal se uteruje u otisak kalupa. Pošto je nemoguće tačno podesiti zapreminu, predviđen je mali višak materijala, koji se smešta u šupljinu za tzv. brkove. Posle opsecanja brkova, što se obično obavlja u vrućem stanju, predmet se može dovesti na tačne dimenzije pomoću kalupa za završno kovanje. Pretkovanje obično daje komade po obliku slične otkivku, što povećava kapacitet kovanja, dok kovanje daje komade potpuno tačnog oblika. U oba slučaja kovanje se obavlja sa više puta ponovljenim udarcima ili pritiscima. U nekim slučajevima se prethodno podešava oblik predmeta ručnim kovanjem.

Kovanje složenijih predmeta obično se obavlja primenom više kalupa koji su najbliži obliku koji se želi iskovati. Za male predmete ova postupnost otisaka može se izraditi na jednom istom kalupu.

Pretkovanje i kovanje na presi naročito se koriste za velikoserijsku proizvodnju klinova i zakivaka.

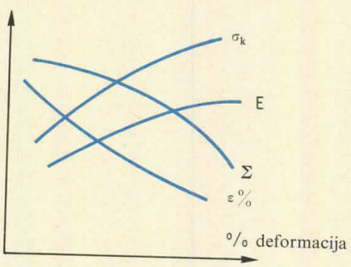
OPREMA. Kovanje zahteva dve vrste uređaja: *peći* za dovođenje metala do željene temperature, i *mašine za njegovu deformaciju.*

Peći za zagrevanje najčešće koriste gas ili tečno gorivo, ređe su to električne peći. Operacija zagrevanja je dugotrajna i skupa. Zato se nastoji da se što je moguće više smanji mrtvo vreme u toku kovanja, kako bi se izbeglo često ponovljeno zagrevanje.

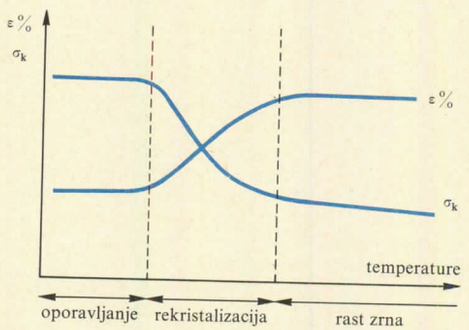
Osim toga, obrazovanje oksidne kore, kovarine, štetno je, jer narušava kvalitet otkivka i skraćuje vek alata.

Mašine za kovanje mogu se podeliti u tri grupe prema načinu na koji se sila primenjuje na metal.

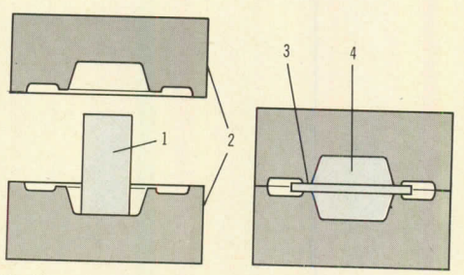
Kovačke mašine koje dejstvuju sporim pritiskom su hidraulične prese. Pritisak se vrši pomoću klipa koji se pokreće tečnošću (voda ili ulje) pod pritiskom.



Sl. 38



Sl. 39. Promene mehaničkih osobina u toku žarenja.



Sl. 40. Kovanje u kalupu u jednoj operaciji: 1. komad gredice; 2. matrica; 3. metal u višku (brkovi); 4. otkivak.

Kovačke mašine koje dejstvuju na udar. Komad se deformiše usled slobodnog pada ili dodatnog ubrzanja metalne mase. Metalni malj kovačkog čekića pokreće se pomoću klipa sa sabijenim vazduhom ili pomoću vodene pare, sa prostim ili dvostrukim dejstvom. U slučaju malja masa se podiže mehanički. Zato postoje padni čekići sa kaišem i frikcioni čekići sa diskom.

Mašine sa dvostrukim dejstvom. U izvesnim slučajevima potrebno je da se pritisak zadrži i posle udara. Za to se koriste mehaničke ekscentar prese i prese na zavrtanj.

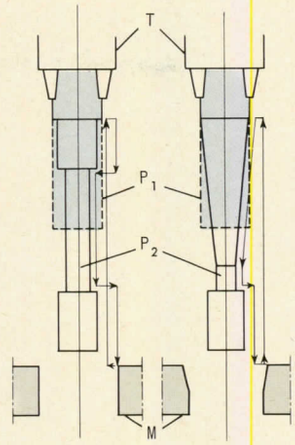
PRECIZNO AUTOMATSKO KOVANJE je način obrade lokalnim pomeranjem materijala pod dejstvom niza udaraca (*sl.* 41). Komad koji treba oblikovati učvršćen na *steznoj glavi* podvrgava se dejstvu trokrake (ili četvorokrake) *kovačke čeljusti,* čiji su kraci raspoređeni na 120° (ili 90°) oko ose komada i udaraju ga u ritmu od 300 do 1 000 udaraca u minutu.

Maksimalni pritisak kovanja jedne čeljusti obično je preko 100 tona; on, najvećim delom, potiče od mehaničkog dejstva ekscentričnih osovina; uticaj kinetičke energije kraka čeljusti je praktično zanemarljiv. Ako se stezna glava pokreće samo podužno, dobijeni otkivak je kvadratnog pravougaonog, trougaonog ili plosnatog preseka, već prema broju čekića koje ima mašina. Osim toga, stranice komada dobijaju tačno oblik udarne strane čekića. Ako se stezna glava okreće oko sebe, otkovani komad je obao, cilindričnog, kupastog ili loptastog oblika. Ciklus kovanja je obično automatizovan (*sl.* 42). Okretanje komada i kretanje kovačkih čeljusti izvode se pomoću mehaničkih sistema koje pokreću električni motori. Podužno napredovanje komada postiže se direktnim dejstvom hidrauličnog klipa. Određivanje krajnjih dimenzija otkivaka obavlja se pomoću graničnika i vođica. Drugi graničnici i vođice određuju ciklus kovanja, menjajući tako smer i brzinu kretanja komada u odnosu na kovačke čeljusti.

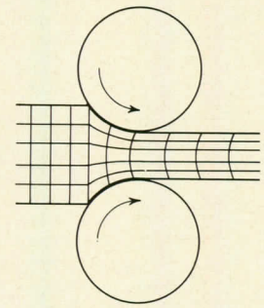
VALJANJE. Nasuprot kovanju, ovaj postupak plastične deformacije je neprekidna operacija.

PRINCIP. Valjanje je operacija kojom se metal plastično deformiše tako što prolazi između dva valjka koji se okreću jedan prema drugom u suprotnom smeru. Trenje omogućuje valjcima da uvlače metal. Metal je u dodiru sa valjcima po jednoj određenoj površini, koja trpi pritisak nazvan *pritiskom valjanja.* Valjanjem se smanjuje debljina, koja se nadoknaduje (pošto je zapremnina metala stalna) jedino izduženjem u smeri valjanja. Zaista, metal praktično ne menja dimenzije u pravcu upravnom na smer valjanja i paralelan osi valjaka: pri valjanju komad se stanji i izdužuje, ali se ne širi. Moguće je da se ove deformacije prikažu tako što se po površini komada za valjanje ureže pravilna kvadratna mreža, pa se posle valjanja posmatraju njene promene. *Sl.* 43. daje shemu takvog eksperimenta. Pri pokušaju da se po jednom provlaku između valjaka dobija preterano velika redukcija uvlačenje komada neće biti moguće: da bi se postiglo veliko smanjenje preseka komada, mora se obaviti valjanje sa više uzastopnih provlaka.

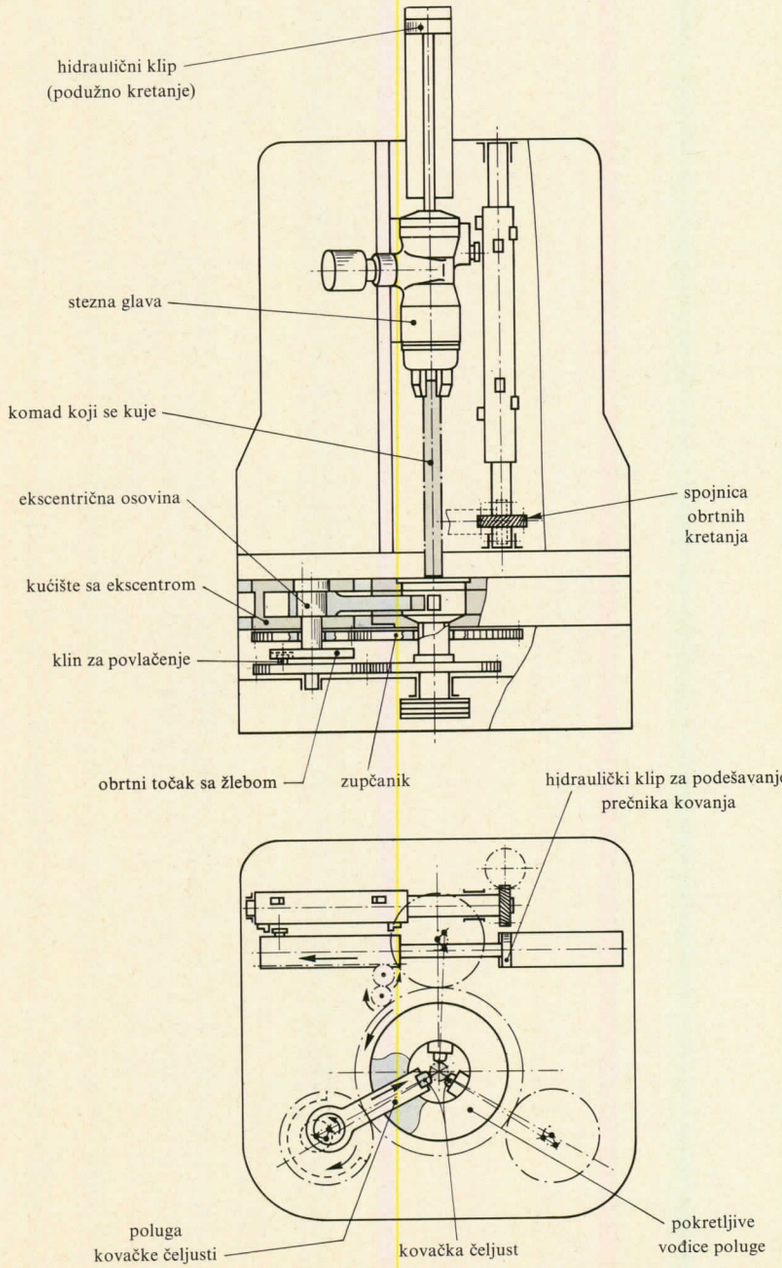
Da bi se materijal mogao deformisati valjanjem, on mora biti duktilan. Osim toga poželjno je da ima što je moguće manju otpornost na deformaciju; zato se valjanje najčešće obavlja u toplom stanju. Otpornost na deformaciju čelika znatno se smanjuje na visokoj temperaturi, dok mu se duktilnost povećava, tako da se on valja između 950° i 1 150°C. Pri visokim temperaturama nastaju nejednaka izduženja sredine i krajeva komada koji se valjaju, naročito plosnatih, zato što im debljina i stanje površine nisu ujednačeni. Čelik se valja i u hladnom stanju kad mu je debljina suviše mala (ispod 2 mm) ili ako je potrebna tačna debljina ili bolji kvalitet površine koji se ne mogu dobiti valjanjem u toplom stanju. U tom slučaju su veličine deformacije po provlaku znatno ograničene. Štaviše, često se između dva broja prevlaka mora izvršiti žarenje. Isto vazi i za



Sl. 41. Shema principa kovanja na automatskoj mašini.
Levo, komad sa cilindričnim graničnicima.
Desno, konusni komad. T, stezna glava, P_1, komad pre kovanja, P_2, otkivak, M, kovačka čeljust.



Sl. 43
Deformacija usled valjanja.



Sl. 42 — Automatska kovačka mašina velike tačnosti.

većinu drugih metala; međutim, neke legure imaju bolju duktilnost u hladnom nego u toplom stanju. One se zato uvek valjaju u hladnom stanju, čak i ako imaju veliku debljinu. Sa naročito podešenim valjcima, čija je površina polirana do visokog sjaja, dobijaju se proizvodi visokog kvaliteta savršenog izgleda.

Vrši se i valjanje dva ili više limova različitih materijala radi njihovog zavarivanja. Tako se dobijaju planirani proizvodi i »sendviči«. Npr., može se planirati lim običnog čelika limom nerđajućeg čelika.

Posle valjanja u toplom stanju proizvodi se hlade na prostranim rešetkama, zatim se podvrgavaju završnoj obradi: sečenju na dužinu, ispravljanju, kontroli, vezivanju u snopove itd. Proizvodi koji su valjani u hladnom stanju obično se žare posle valjanja da bi se uklonilo otvrdnjavanje usled hladne obrade. Zatim se podvrgavaju završnoj obradi.

Površinske greške imaju veliki uticaj pošto su valjani proizvodi često vrlo tanki. One često potiču od oksida stvorenih za vreme toplog valjanja. Mogu se javljati i prskotine. Najzad, kada se pritisak valjanja povećava, valjci se ugibaju, što može izazvati lako povećanje debljine po sredini proizvoda.

OPREMA. Koriste se uređaj koji često može biti veoma složen a naziva se *valjaoničkim stanom.*

Opis. Valjaonički stan (*sl.* 44) sastoji se od gvozdenih ili čeličnih valjaka vodoravnih osovina, čiji se krajevi, koji obrazuju rukavce, nalaze u širokim ležištima. Ležišta su smeštena u ram valjaoničkog stana, koji se sastoji od dve masivne kolevke od livenog čelika, pričvršćene na podložnu ploču i spojene poprečnim traverzama. U ovim stalcima užlebljena su čelična kućišta za ležišta rukavaca, koja se nazivaju kolevkama. Podešavanje položaja valjaka vrši se pomoću pritisnih vretena koja se kreću u maticama smeštenim u stalcima. Kod malih stanova zavrtnji se okreću ručno, a kod velikih mehanički. Valjci se pokreću bilo preko produženih delova rukavaca, čapova, čiji je presek u obliku »deteline« ili »rozete« i koji se povezuju sa pogonom pomoću spojnica i vretena, bilo preko vretena sa zglobom. Pogon valjaoničkog stana sastoji se od električnog motora, eventualno reduktora sa zupčanicima i prenosnog stana sa grebenjacima, ozubljenim valjcima, radi istovremenog pogona oba valjka.

Za ravne proizvode, limove ili trake koriste se glatki valjci, koji su pri tom vrlo malo ispupčeni u srednjem delu, nekoliko stotih milimetra. Ovim se kompenzira elastičnost valjaka valjaoničkog stana, čiji je presek relativno mali u odnosu na dužinu. Za dobijanje takvih proizvoda kao što su nosači, šine itd. upotrebljavaju se kalibrisani valjci sa prstenastim žlebovima, koji drže šupljinu preseka koji se želi dobiti. Ovi žlebovi moraju imati dobro proučen oblik i sadržavati lako ispupčene strane zbog širenja materijala na izlazu iz valjaoničkog stana usled elastičnosti. U svim slučajevima polazi se od livene poluge grubog kvadratnog ili pravougaonog preseka. Određivanje oblika postupnih žlebova koji omogućuju da se od jednog takvog oblika dođe do konačnog oblika, kao npr., šina ili nosač, briga je stručnjaka za kalibrovanje. Tehnika kalibrovanja je vrlo složena, usled mnogobrojnih izduženja, sređivanja i sastava vlakana metala. Pored šipki i plosnatih proizvoda, upotrebom posebnih valjaoničkih stanova valjanjem se dobijaju bešavne cevi, bandaži, vagonski točkovi itd.

Vrste. Valjaonički stanovi se dele prema položaju valjaka u stalcima ili prema njihovoj nameni.

Prema *položaju valjaka u stalcima* razlikuju se:

— *duo-stanovi,* koji sadrže samo dva valjka, koje pokreće motor u oba smera, što omogućuje postupne provlake u istom stanu;

— *trio-stanovi,* koji sadrže tri valjka, provlačenje se obavlja postupno izmedu gornjeg i srednjeg valjka, zatim između srednjeg i donjeg valjka, bez izmene smera okretanja motora;

— *dupli duo-stanovi* sastoje se od dva duo-stana koji rade u suprotnom smeru;

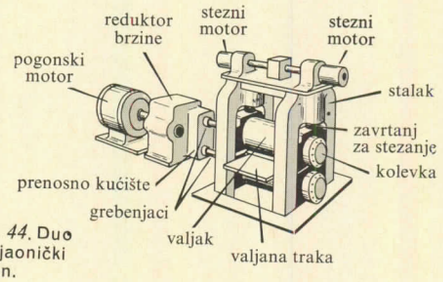
— *kvarto-stanovi,* ili sa četiri valjka, koji imaju dva mala radna valjka. Oni omogućuju da se dobiju vrlo male debljine pri valjanju, reda milimetra ili manje. Ali ovi valjci nisu dovoljno kruti da bi na metal preneli pritisak valjanja a da se ne deformišu Zato su spolja poduprti velikim potpornim valjcima, koji sprečavaju prekomerno ugibanje radnih valjaka. Često se valjak malog prečnika podupire nizom sve krućih valjaka; takav jedan mnogovaljkasti stan je i *Sendzimir.*

Valjaonički stanovi su često postavljeni jedan za drugim u liniji. Npr., za proizvodnju tankih čeličnih limova najpre se koristi pruga duo-stanova za toplo valjanje, a zatim pruga duo i kvatro-stanova za hladno valjanje. Proizvod prolazi bez prekida s jednog kraja linije na drugi; kako se izdužuje, tako raste i brzina provlaka pri svakom smanjenju debljine. Zato brzine svih valjaoničkih stanova moraju biti usklađene.

Prema *nameni valjaoničkih stanova* (*sl.* 45) razlikuju se:

— *Valjaonički stanovi za blumove i slabove,* koji valjaju blumove i brame polazeći od teških ingota. To su vrlo veliki povratni duo-stanovi čiji se valjci, u modernim izvedbama pokreću ponaosob motorima od oko 6000 KS.

— *Valjaonički stanovi za debele limove,* sa vrlo teškim stalcima sa četiri valjka, koji omogućuju valjanje limova širine 4 m, ponekad i više. Kao i kod bluminga, valjci se pokreću pomoću dva motora od oko 6000 KS.



Sl. 44. Duo valjaonički stan.

— *Valjaonički stanovi za gredice,* obično postavljeni kontinuirano, tj. sa dosta velikim brojem stanova u liniji jedan za drugim, koji omogućuju da se proizvod od preseka bluma svede na presek gredice.

— *Valjaonički stanovi za šine ili profile,* koji su ili veliki duo, ili veliki trio-stanovi, sa stalcima koji su postavljeni jedan pored drugog.

— *Kontinuirani valjaonički stanovi za toplo valjanje traka* sadrže desetak vrlo teških kvarto-stanova postavljenih jedan za drugim i koji valjaju trake širine 1 do 2 m i minimalne debljine od 2 mm. Brzina izlaska proizvoda iz posljednjeg stana je oko 10 do 15 m/s; to su vrlo veliki uređaji; ukupna snaga pogonskih motora stanova je reda 50000 — 90000 KS.

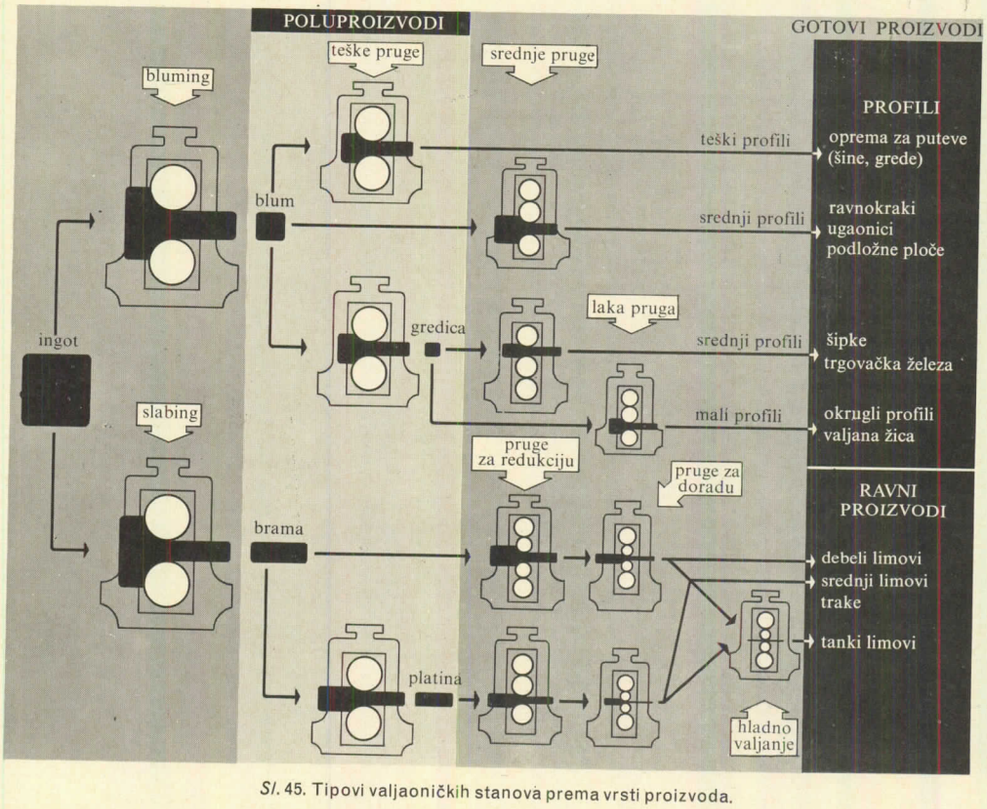
— *Kontinuirani valjaonički stanovi za hladno valjanje* sadrže tri stana za proizvodnju tankih limova (naročito za karoserije) i pet stanova za proizvodnju traka belog lima; brzina izlaska iz ovih poslednjih je gotovo 90 km/h.

— *Pruge za valjanje žice* uvek su kontinuirani valjaonički stanovi; izlazna brzina žice u najnovijim prugama iznosi 30 m/s ili više od 100 km/h.

— *Specijalni valjaonički stanovi,* u koje naročito spadaju *stanovi za valjanje cevi:* za valjanje šupljih tela, *stanovi za kovanje*: traka, bandaža, venaca itd., *stanovi za valjanje profila raznih oblika, stanovi za valjanje prahova,* koji omogućuju presovanje prahova namenjenih za naknadno sinterovanje, *stanovi za poprečno valjanje,* za valjanje kugli.

PRESOVANJE ISTISKIVANJEM. Istiskivanje je postupak izrade profilisanih cevi i šipki presovanjem metalne oblice u jednom recipijentu pomoću *prese* i *istiskivača.* Pod dejstvom vrlo visokog pritiska metal teče kroz matricu (pravo istiskivanje) ili između jedne igle i matrice. Ovaj poslednji postupak koristi se naročito za izradu cevi koje su zatvorene na jednom kraju i naziva se istiskivanje udarom.

Način rada. U oba slučaja razlikuju se dva različita načina rada.



Sl. 45. Tipovi valjaoničkih stanova prema vrsti proizvoda.

Kod *direktnog presovanja* istiskivanjem (*sl.* 46) kretanje istiskivača je u istom smeru kao i tečenje metala. Na jednom kraju recipijenta nalazi se otvor ili *matrica*. Drugi kraj je otvoren i dopušta ulaz istiskivaču, koji sabija metal u recipijentu i nagoni ga da prolazi kroz matricu, gde prima oblik njenog otvora. Metal je izložen gotovo jedino naponima na pritisak. Zato se mogu istiskivati i metali koji su relativno malo duktilni. Potrebne sile su vrlo velike. One se povećavaju usled trenja oblice o unutrašnje zidove recipijenta.

Kod *povratnog presovanja* (*sl.* 47), koje je lišeno ovog trenja, kretanje istiskivača je u suprotnom smeru od tečenja metala. Oblica je nepokretna u odnosu na recipijent, ali se mora predvideti izlaz proizvoda kroz unutrašnjost klipa koji nosi matricu.

Istiskivanje se vrši u toplom ili hladnom stanju, već prema slučaju. Mogu se istiskivati i šuplja tela, polazeći od probušene oblice koja se istiskuje pomoću klipa koji se produžava u iglu oblika unutrašnjosti cevi (*sl.* 48). Takođe se i kabl može obložiti istiskivanjem željene obloge oko njega (oblaganje olovom električnih kablova).

Najzad najmekši metali (olovo, kalaj, aluminijum, bakar) istiskuju se udarom kada se zahtevaju proizvodi male dužine. Posebno se tako istiskuju cevi, tube za zubnu pastu i sl. Udarno istiskivanje može biti direktno ili indirektno (*sl.* 49).

Postupak je moguć samo za duktilne i kovne metale i legure. On se posebno preporučuje za oblikovanje lakih legura, u izvesnim slučajevima kovnost se povećava zagrevanjem. Ako se presovanje istiskivanjem vrši u toplom stanju, treba predvideti ponovljeno zagrevanje oblica i ponekad čak, i recipijenta u toku operacije, ako je brzina istiskivanja mala.

U toku rada matrica trpi ogromne napone i zagreva se usled trenja. Zato mora biti posebno otporna i treba je podmazivati (lanolin, stearat cinka) da bi se smanjilo trenje i zagrevanje. Podmazivanje na povišenoj temperaturi je uvek teško, a toplo istiskivanje čelika (1 200°C) nije bilo moguće dok Sežurne (Séjournet) nije došao na ideju da koristi stopljeno staklo kao mazivo.

Prednosti ovog postupka su mnogobrojne:

— ušteda metala; nema otpadaka ili su eventualno vrlo mali;

— kvalitetni proizvodi (vrlo mala odstupanja, vrlo dobro stanje površine);

— mogućnost izrade čaura vrlo tankih zidova (nekoliko desetih milimetra);

— i, naročito, olakšano dobijanje, samo u jednoj operaciji, proizvoda za čiju bi izradu tradicionalnim metodima bio potreban niz operacija. Vrlo često se istiskivanjem dobijaju šipke i profili grubih dimenzija, koji se zatim kalibrišu valjanjem, izvlačenjem šipki i izvlačenjem žice.

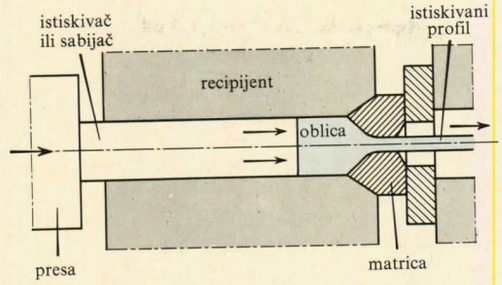
IZVLAČENJE ŠIPKI sastoji se u provlačenju vučenjem šipki bilo kakvog preseka (profilisanih), koje su dobijene prethodnim valjanjem ili istiskivanjem kroz jedan kalibrisani otvor, koji se zove matrica.

Cilj ove operacije koja se obavlja u hladnom stanju je sledeće:

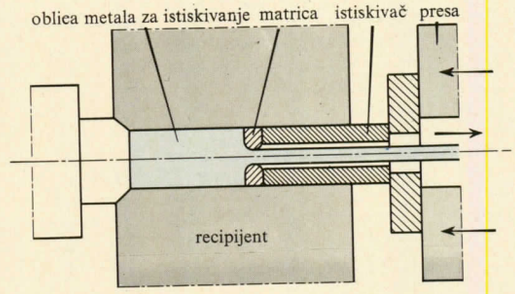
— da podesi presek nekog profila ako ovaj nije mogao da se dobije sa potrebnom tačnošću i sa određenom obradom iz valjaoničkog stana ili iz prese za istiskivanje;

— da se poveća otpornost materijala plastičnim otvrdnjavanjem;

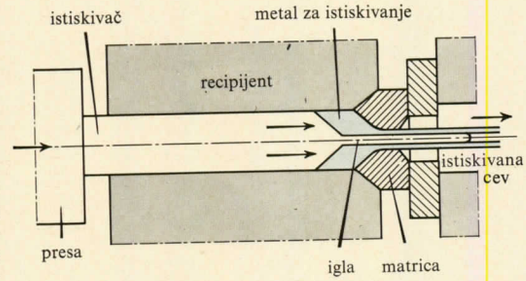
— da se smanji presek nekog profila. Ako treba da se dobije velika redukcija preseka, postupak se izvodi sa više provlaka kroz sve manje matrice; ali u tom slučaju treba da se obavljaju međustupna žarenja uz čišćenje površine. Matrica se podmazuje da bi se olakšao prolaz šipki, a u nekim slučajevima šipke se prethodno prevuku slojem kovnog metala (srebro na zlato, bakar na srebro, iridijum na platinu), koji se zatim može ukloniti, ako je potrebno, dekapiranjem u kiselini.



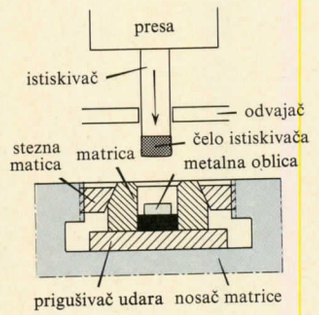
Sl. 46



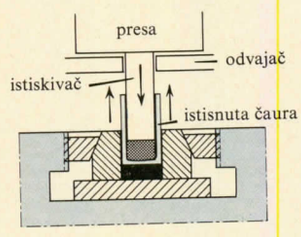
Sl. 47



Sl. 48. Direktno presovanje cevi.



Sl. 49. Povratno presovanje metalne čaure udarom.



Primena. Operacija izvlačenja šipki je, pre svega, završna tehnika, koja se primenjuje za izradu profila od čelika, bakra, mesinga, lakih legura.

Poslednjih godina ova tehnika se koristi za izvlačenje limova vrlo velikih dimenzija (širine 2 do 3 m). Matrice za ove postupke izvlačenja podešljive su kao i brzina prolaza lima, tako da smanjenje debljine dobijeno na istom limu može da bude promenljivo. Ove mašine isto tako mogu da se koriste za savijanje limova. Ne samo da mogu da savijaju prave listove već mogu i da deformišu već savijene listove, tako da ovi dobiju sasvim drukčiju krivinu. Matrice se izrađuju od zamenljivih elemenata koji, kada se podese, daju različite krivine u vrlo širokim granicama, što je velika prednost u odnosu na tehnike klasičnog izvlačenja limova i traka sa kojim se sa jednim sistemom matrice i istiskivača može dobiti samo jedan oblik. Nedostatak je što je brzina deformacije malo manja: ona zavisi od dimenzija lima i od prirode metala. Može se oblikovati 1 do 4 ploče od više kvadratnih metara u minuti. Ovaj postupak koji ima malo otpadaka sada se mnogo koristi u aeronautičkim konstrukcijama.

IZVLAČENJE ŽICE. Izvlačenje žice je postupak koji se izvodi hladno i sastoji se u tome da se žici, šipki ili valjku, koji su dobijeni valjanjem i istiskivanjem, da tačno određeni presek izvlačenjem kroz matricu. Matrica ima takav profil da kompresione sile koje nastaju usled njenog otpora izazivaju postupno smanjenje preseka žice, a da se ne dostigne lom usled stiskanja. Ranije su matrice izrađivane od kaljenog ugljeničnog čelika ili kaljenog čelika legiranog hromom. Sada se matrice prave od metalnih karbida (karbid volframa), a vrlo male matrice od rubina ili od dijamanta.

Deformacija i trenje su takvi da izazivaju veliko zagrevanje. Zato se matrice intenzivno hlade mlazom sapunske ili uljne emulzije. Neki put su matrice i komad koji se obrađuje potopljeni u tečnosti. Neki metali se pre izvlačenja oblažu elektrolitički ili hemijski slojem od nekog od kovnijih metala. Za izvlačenje čelične žice na šipku se prethodno nanese elektrolitički jedan sloj bakra. Za izvlačenje zlata, srebra i platine koriste se nanosi srebra, bakra i iridijuma respektivno. Ove metalne prevlake mogu se zatim ukloniti dekapiranjem kiselinom, kada se dostigne izvlačenjem željeni prečnik; ovaj metod se naročito koristi za proizvodnju žica od iridirane platine.

Brzina izvlačenja žice može da dostigne brzinu od 100 m u minuti. Na prostim mašinama za izvlačenje žice, vuča potrebna za ovu operaciju ostvaruje se pomoću vučnog bubnja. Kod mašina za višestruko izvlačenje posle svakog izvlačenja, dakle, iza svake matrice žica se povlači naročitim vučnim bubnjem, čekrkom. Pri okretanju bubnja, izlazeći iz matrice, žica se istovremeno i namotava i odmotava da bi prošla kroz sledeću matricu.

Kao i pri presovanju istiskivanjem, izvlačenje je utoliko lakše ukoliko je metal duktilniji i kovniji i ukoliko je njegov kapacitet deformacije, označen intervalom između granice elastičnosti σ_e i napona na kidanje σ_k, veći. U većini slučajeva metali su pre izvlačenja u žice u odžarenom stanju, a pošto izvlačenjem metal otvrdnjava, u izvesnim slučajevima se mora između provlaka obavljati ponovno žarenje.

Veliki broj metala i legura mogu da se izvlače u žice: bakar, aluminijum, čelik, mesing, zlato, srebro, volfram, platina, molibden itd. Od ovih metala mogu se izvlačiti žice od nekoliko milimetara do nekoliko hiljaditih delova milimetra u prečniku.

OBLIKOVANJE RAVNIH LIMOVA. Ova tehnika je posebno složena zbog nesrazmernosti dimenzija materijala koji se obrađuje. Moguće je oblikovati lim primoravajući ga da se delimično ili potpuno prilagodi alatu za oblikovanje. Operacija može da bude jednostavna, ali često može da izazove u limu istovremeno višestruke napone (zatezanje, pritisak, smicanje, savijanje itd.).

SEČENJE. Sečenje je operacija oblikovanja u toku koje se plastična deformacija sprovodi do prekida. Ona se obavlja izlaganjem komada koji se seče jednovremenom pritisku ivica dva alata koji se nalaze s jedne i s druge strane lima, jedan iznad drugog i deluju tako da se stranice alata koji seku nalaze na istoj ravni upravnoj na lim. Zavisno od upotrebljenog alata razlikuje se sečenje pomoću makaza i probijanje pomoću probijača.

Sečenje makazama. Pri ovom postupku dva alata se sastoje od pravih ili kružnih sečiva koji se nazivaju *makaze*.

Ručne makaze (makaze za ruke, makaze sa tegom, makaze sa polugom itd.) koriste se za sečenje limova do oko 3 mm debljine. To su većinom alati koji se upotrebljavaju u limarskom zanatu.

U industriji, za serijsku proizvodnju i za sečenje limova velikih dimenzija upotrebljavaju se mehaničke makaze. One mogu imati bilo prava sečiva, pa se nazivaju »giljotinom«, bilo kružna sečiva.

Giljotina sadrži s jedne strane horizontalno nepomično sečivo, a s druge strane sečivo je lako nagnuto i pokretno u vertikalnom pravcu. Ovo sečivo je vođeno na kliznim ležištima, a njegovo kretanje gore-dole ostvaruje se pomoću ekscentra. Velike površine ova dva sečiva nalaze se gotovo na istoj vertikalnoj ravni. Niz pritiskivača limova na mehanički ili hidraulični pogon pritiska lim na radnom stolu makaza sve dok traje sečenje. Ove mašine imaju isto tako graničnike i vođice koji se mogu podešavati za precizno sečenje velikih serija komada.

Cirkularne makaze omogućuju sečenje limova po bilo kakvoj liniji, do debljina od oko 7 mm. Sečiva u obliku kružnih diskova, s jedne strane zaoštrene ivice, delimično se prekrivaju (*sl.* 50) tako da lim prolazi između njih bez klizanja i bez potrebe da se gura. U praksi, prečnik sečiva D veći je za više od trideset puta od debljine *e* lima koji treba da se seče ($D > 30\ e$). Naravno, ukoliko je prečnik sečiva veći utoliko je i njihovo prekrivanje veće i utoliko mora biti veći i minimalni poluprečnik krivine po kojoj se komad može seći. Vođenje komada koji se seče obavlja se ručno.

Probijanje. Pri ovom postupku alati se sastoje od probijača i matrice. Probijač, čiji presek tačno odgovara otvoru koji treba probiti, ulazi u matricu koja ima otvor istog preseka. Alati su od kaljenog i brušenog čelika. Obično dimenzije probijača ne treba da budu manje od debljine metala koji se probija, izuzev za matrice posebno namenjene za precizno probijanje malih komada. Zazor između probijača i matrice je obično reda 0,1 mm za limove debljine manje od 1 mm. Za limove debljine manje od 1 mm ovaj zazor je reda desetog dela debljine lima.

Matrice koje se upotrebljavaju za probijanje su različite vrste.

Proste matrice su one sa kojima se mogu seći komadi ograničeni spoljnom ivicom i u jednoj operaciji. Pri svakom spuštanju rama prese dobija se jedan isečen komad.

Višestruke matrice imaju više probijača, koji su često jednaki i učvršćeni na jednom nosaču da bi se pri svakom spuštanju rama prese dobilo istovremeno više komada.

Višestupne matrice sadrže jedan niz različitih probijača i seku komad u više postupnih operacija. Zbog toga je potrebno da se više puta ponavlja spuštanje rama prese, ali pošto se sve operacije obavljaju istovremeno sa više komada, posle svakog spuštanja prese dobija se jedan gotov komad. Ova vrsta alata sve se više upotrebljava, jer omogućuje sečenje komada najrazličitijih spoljnih i unutrašnjih ivica.

Složene matrice su alati koji istovremeno ostvaruju i operaciju sečenja i dubokog izvlačenja. One mogu biti višestupne ili sa dvostrukim dejstvom. Mogu da se postave samo na prese sa dvostrukim dejstvom koje imaju dva rama koji se spuštaju jedan za drugim.

Matrice za bušenje su obično proste matrice, većinom predviđene za probijanje okruglih otvora na limovima vrlo velike debljine, do oko 10 mm.

IZVLAČENJE LIMOVA I TRAKA (DUBOKO IZVLAČENJE) je operacija oblikovanja limenih komada koji su, obično, prethodno odsečeni u obliku okrugle ploče, tzv. *rondele.*

Razlikuje se ručno izvlačenje pomoću čekića i malog nakovnja (izrada bakrača) i mehaničko izvlačenje pomoću presa snabdevenih matricama.

Ručno izvlačenje se obavlja tako što se lim oslanja na jedan izdubljeni ili ispupčeni alat i što se po njemu udara pomoću pogodnog metalnog čekića čiji je oblik sličan onom koji treba dati pločici, rondeli. Zbog toga lokalni naponi kojima se metal izlaže moraju biti veći od granice elastičnosti, ali da bi se izbeglo cepanje lima, ovi lokalni naponi moraju istovremeno biti manji od napona pri prekidu. Obično se granica elastičnosti smanjuje na taj način što se upotrebljava lim koji je prethodno bio žaren i što se za vreme rada lim lokalno zagreva plamenikom. Ručno izvlačenje koristi se samo za pojedinačnu izradu ili za vrlo male serije: izrada prototipova, autolimarija itd.

Izvlačenje limova i traka na presi vrši se gotovo uvek u hladnom stanju, naročito sa tankim limovima (debljina $\leqslant 3$ mm), koji su prethodno odžareni. Matrice za izvlačenje, odn. alat za izvlačenje, većinom se sastoje od jedne patrice, koja u potpunosti odgovara unutrašnjem obliku komada koji se izvlači, i jedne matrice čiji je otvor jednak vodoravnom preseku patrice povećanom za debljinu lima. Patrica je obično učvršćena na pokretni ram prese, a matrica je ukleštena u sto prese.

Komad se drži na matrici pomoću pritiskivača koji ponekad dejstvuje i većim pritiskom kako se komad ne bi borao (*sl.* 51). Jedan alat, ili patrica, deformiše lim tako što se on izmiče pod pritiskivačem i ulazi u otvor matrice. Izvlačenje se najčešće izvodi na hladno. Zato komadi koji potiču od žarenog lima otvrdnjavaju pri izvlačenju. Ako je izvlačenje dublje, mora se ponekad obaviti međustupno žarenje. Ako se metal deformiše više nego što može da izdrži, on prska.

Izvlačenjem se teško dobijaju tačne dimenzije, pošto deformacija nije homogena, te debljina gotovog komada nije jednaka. Osim toga, kao pri svim oblikovanjima, plastična deformacija se dopunjuje i elastičnom deformacijom, koja iščezava kada se komad oslobodi. Ona predstavlja veliki deo ukupne deformacije pošto je dubina izvlačenja mala. O tome se mora voditi računa pri proračunavanju patrice.

Ova tehnika se uglavnom primenjuje za proizvodnju velikih serija. Za svaki različiti komad potrebno je izraditi matrice, većinom od čelika, čija je cena izrade velika; ali sa jednom matricom mogu se uraditi desetine hiljada komada sa učestanošću od više komada u minuti, uz korišćenje nekvalifikovane radne snage. Uloga radnika se svodi na:

— stavljanje limene rondele na samu matricu i dovođenje patrice do njenog graničnog položaja;

— puštanje prese u pogon pomoću pedale ili pritiskom na dugme;

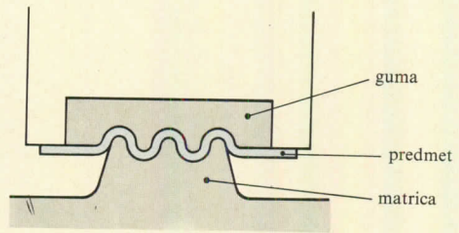
— odstranjivanje gotovog komada i stavljanje nove rondele.

Projektovani su mnogobrojni alati koji oblikovani komad odstranjuju automatski iz matrice i odbacuju ga u prijemnu korpu za gotove komade.

Neke usavršene matrice snabdevaju se trakom koja se odmotava sa doboša. Za male komade ista matrica često obavlja više uzastopnih operacija, sečenje, probijanje, izvlačenje, savijanje, opsecanje itd. U takvom slučaju ritam proizvodnje može biti i pet stotina komada na čas.

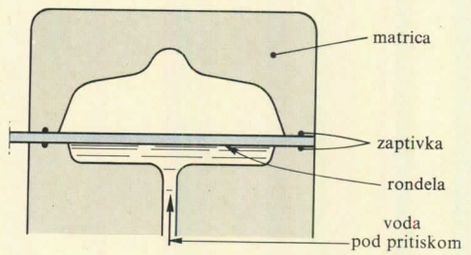
SPECIJALNI POSTUPCI. Postoje tri posebna postupka oblikovanja limova. To su:

Gerenov (Guérin) postupak, po kome se (*sl.* 52) alat sastoji od komada gume koji pritiska metal na kalup podvrgavajući ga uglavnom hidrostatičkim naponima.

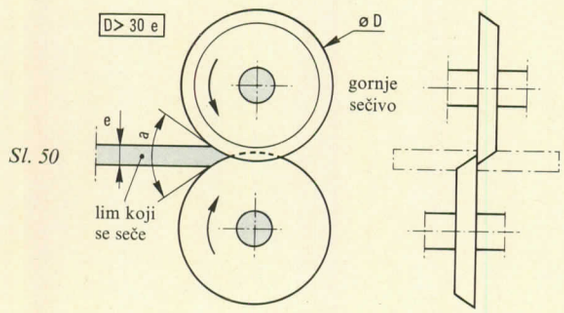


Sl. 52

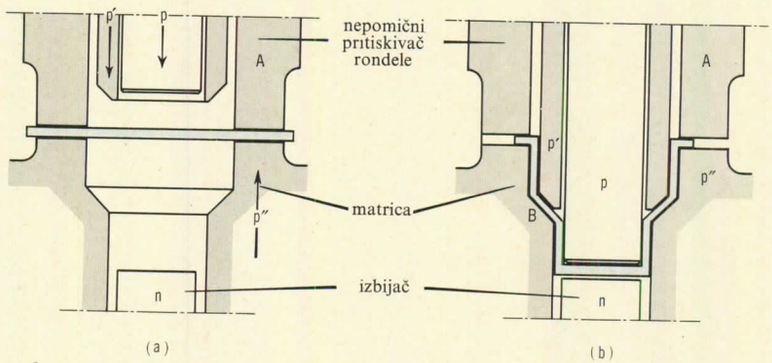
Hidrauličko oblikovanje, po kome se (*sl.* 53) lim pritiska na matricu željenog oblika pomoću hidrauličkog pritiska.



Sl. 53

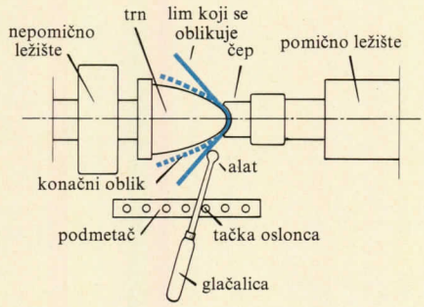


Sl. 50



Sl. 51 Cilindrično izvlačenje na presi sa trostrukim dejstvom: *p* se diže sa rondelom i pritiska je na nepomično A; zatim se *p* i *p'* zajedno spuštaju, dok *p'* ne dopre do graničnika B, gde nadalje ima ulogu pritiskivača, a *p* nastavlja da se spušta do završetka izvlačenja. Najzad se *p* i *p'* podignu, a istiskivač *n* oslobađa predmet iz matrice B.

Obrtno glačanje, koje omogućuje da se plastičnom deformacijom izrade okrugli proizvodi bilo kakvog profila. Operacija se obavlja na posebnom strugu ili strugu za obrtno glačanje (*sl.* 54) koji sadrži jedno nepomično ležište i jedno pomično ležište velikog podužnog hoda. Nepomično ležište sastoji se od vretena koje može da izdrži velike aksijalne i poprečne sile, a pomično ležište od oslonca sa kugličnim ležištem. Na vreteno se natiče trn, koji se još naziva *kalupom za obrnuto glačanje,* obično od drveta, a ponekad od metala, čiji oblik odgovara obliku gotovog komada. Rondela koju treba oblikovati stegne se u njenom središtu između trna na vretenu i jednog čepa na osloncu koji se može okretati. Sistem trn-rondela i oslonac okreće se, i uz pomoć ručnog alata, čiji je kraj zaobljen, vrši se pritisak na rondelu prisiljavajući je postupno da uzima tačan oblik trna. Operacija se gotovo uvek obavlja u hladnom stanju, ali uz podmazivanje kako bi se sprečilo da alat zagrebe lim koji se oblikuje. Ponekad ručni alat, koji se još naziva *glačalica,* ima na vrhu točkić, što omogućuje da se na lim vrši veći pritisak, a da se on ne pocepa.



Sl. 54

Metali koje treba obrtno glačati moraju biti kovni, kao zlato, srebro, aluminijum, cink, bakar, meki čelik, nerđajući čelik. Ovi se metali oblikuju polazeći od odžarenih limova, a za oblikovanje komada u oblik koji je teško dobiti ovim postupkom, mora se primeniti i međustupno žarenje. Ovaj postupak je pogodniji od postupka izvlačenja za okruglé komade u obliku kupe i u vidu obluka.

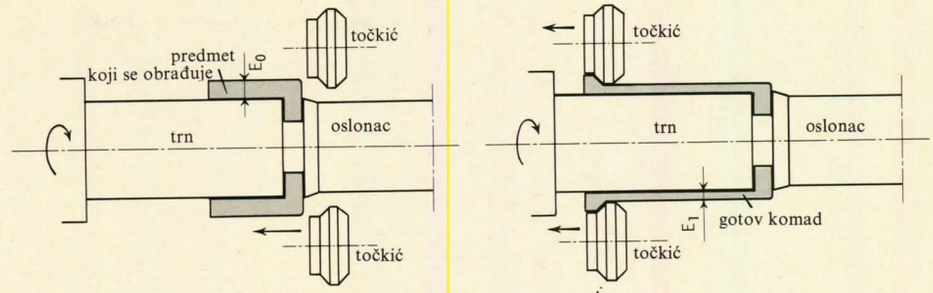
Obrtno glačanje na strugu je dugo važilo kao zanatska tehnika za izradu lustera i u kujundžijskom zanatu, a koristilo se i u slučajevima kada veličina serije nije opravdavala izradu alata. Danas se sve više koristi u radionicama aeronautičke industrije i prostorne tehnike.

OBRTNO IZVLAČENJE. Obrtno izvlačenje je novi postupak oblikovanja metalnih komada deformacijom materijala, koji je uveden u Sjedinjenim Američkim Državama tek pre nekoliko godina i naziva se »flowturning« i »hydrospinning« (franc. »fluotournage«).

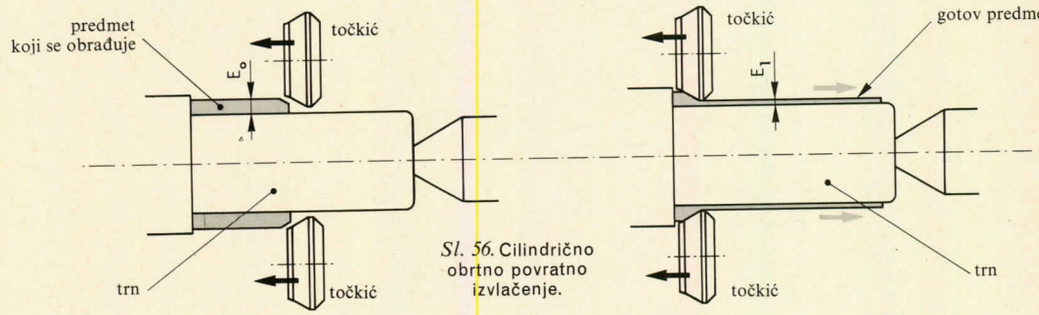
PRINCIP. Obrtno izvlačenje omogućuje da se izrade šuplji okrugli predmeti od ravnih diskova, od kovanih karika, od karika od savijenog i zavarenog lima, od kovanih kupastih poluproizvoda ili izrađenih od savijenog i zavarenog lima, uopšte od poluproizvoda predmeta koji su dobijeni kovanjem, izvlačenjem ili pomoću matrica.

Mašine koje se koriste u tu svrhu slične su strugovima velikih dimenzija, ali pošto su potrebne velike sile za deformaciju velikih metalnih komada, a naročito komadi od čelika, cela mašina je mnogo jača nego klasični strug, a alat je zamenjen sa dva točkića od kaljenog čelika koji se nalaze jedan nasuprot drugom u odnosu na osu trna. Upravljanje je gotovo uvek hidraulično.

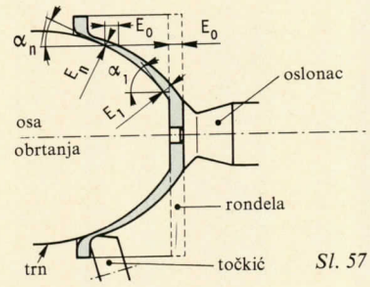
Rondela ili poluproizvod koji treba konačno oblikovati čeono je pritisnut pomoću jednog oslonca na trn čiji spoljni oblik odgovara unutrašnjoj površini predmeta koji treba ostvariti. Sistem trn-poluproizvod-



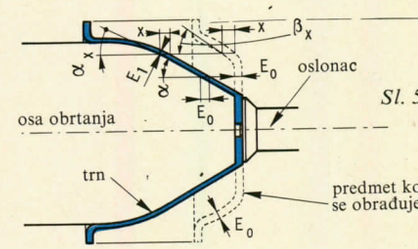
Sl. 55. Cilindrično obrtno izvlačenje uz izduženje: E_0, početna debljina komada; E_1, konačna debljina predmeta.



Sl. 56. Cilindrično obrtno povratno izvlačenje.



Sl. 57



Sl. 58

oslonac stavlja se u obrtno kretanje oko horizontalne ose i pod dejstvom dva alata, točkića, postavljena jedan nasuprot drugom u odnosu na predmet, ovaj se nagoni da prianja uz trn i da postepeno zauzima njegov oblik uz smanjivanje svoje debljine. Obično se operacija obavlja u više uzastopnih prolaza.

NAČIN RADA. Uglavnom se razlikuju dva načina rada: valjkasto obrtno izvlačenje i kupasto ili krivolinijsko obrtno izvlačenje.

Valjkasto obrtno izvlačenje. Oblikovanje valjkastih predmeta, koje se teško obavlja sa dobrom tačnošću, može se vršiti na dva načina.

Po direktnom postupku, koji se još naziva *direktno obrtno izvlačenje* ili *direktno obrtno izvlačenje uz izduženje,* poluproizvod je u obliku karike sa graničnikom (*sl.* 55). Ona se stavlja na čelo valjkastog trna, koji je obavezno duži od karike, a izduženje se ostvaruje plastičnom deformacijom metala u smeru kretanja dva točkića.

Po *obrtnom postupku,* koji se još naziva *obrtnim povratnim izvlačenjem,* poluproizvod je u obliku proste karike bez graničnika. Ona se navlači na valjkasti trn sve do njegove osnove (*sl.* 56) i pod dejstvom dva točkića izduženje karike se ostvaruje u suprotnom smeru od kretanja točkića. Ovim postupkom mogu se dobiti valjkasti šuplji predmeti koji su duži od trna.

Kupasto ili krivolinijsko obrtno izvlačenje vrši se po direktnom postupku sa trnovima odgovarajućeg oblika. Kada se oblikuje predmet na krivolinijskom trnu polazeći od rondele stalne debljine E_o, dobija se predmet promenljive debljine $E_1,\ldots,E_n$ (*sl.* 57), pošto se konačno dobijena debljina menja sa uglom $\alpha_1,\ldots,\alpha_n$, koji u posmatranoj tački obrazuje tangenta na izvodnicu sa osom obrtanja tog predmeta. Zbog toga, da bi se dobio jedan zakrivljeni predmet ujednačene debljine, treba poći od rondele promenljive debljine $E_1,\ldots,E_n$ (*sl.* 58). Drukčije rečeno, ako se pođe od rondele čija je debljina smišljeno odabrana, mogu se dobiti zakrivljeni predmeti čija debljina sledi gotovo svaku pravilnost.

PRIMENA. Tehnika obrtnog izvlačenja razvila se zahvaljujući prostornoj tehnici. Ovim postupkom, bez zavarenih spojeva i bez gubitaka materijala, oblikuju se predmeti velikih dimenzija i vrlo male debljine, od materijala najrazličitijih vrsta: vatrostalni čelici, nerđajući čelici, lake legure itd. U Sjedinjenim Američkim Državama izrađuju se ovom tehnikom predmeti od 2 do 3 m u prečniku i do 10 m dužine. Debljina ovih predmeta može se menjati približno od 1 mm do nekoliko centimetara.

SAVREMENI POSTUPCI OBLIKOVANJA POD VISOKOM ENERGIJOM

Opšti pojmovi. Neki postupci oblikovanja zahtevaju vrlo brzo oslobađanje energije. Metal podleže pritisku i deformiše se vrlo velikom brzinom, pri čemu je vreme trajanja operacije uvek ispod jedne sekunde, često čak reda samo nekoliko milisekundi.

Pri povišenom pritisku poboljšava se duktilnost metala. Neki krti metali postaju duktilni. Isto se povećava granica elastičnosti i otpornost na kidanje.

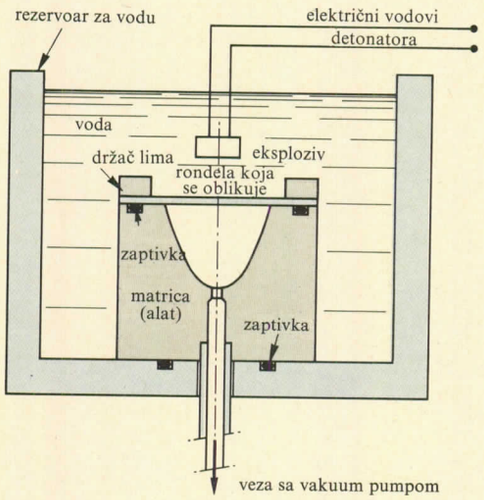
Kada se povećava brzina deformacije, raste duktilnost i u izvesnim slučajevima (čelik, aluminijum) teži nekoj granici. Dvojnikovanje postaje prevashodni način deformacije.

Na taj način, oblikovanje brzim oslobađanjem energije olakšava oblikovanje metala. Ali za svoj današnji uspeh ono, isto tako, mora da zahvali i ekonomskim razlozima. S jedne strane, početne investicije su vrlo male, pošto je energija koja se brzo oslobađa, npr., eksploziv, jeftina, i potrebne matrice su jednostavne, a, s druge strane, pošto se može osloboditi velika količina energije, mogu se oblikovati vrlo veliki predmeti, koji premašuju radne dimenzije i najvećih presa.

OBLIKOVANJE EKSPLOZIJOM. Ovaj postupak se uglavnom primenjuje za oblikovanje nedovoljno duktilnih materijala (specijalni čelici, legure titana, vatrostalne legure itd.), kao i onih koje je teško izvlačiti klasičnim postupcima. Ovaj se metod sve više upotrebljava u aeronautičkoj industriji.

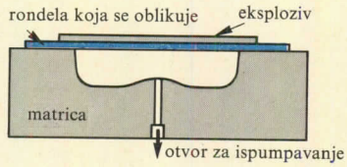
Princip. Pucanj ili brzo sagorevanje eksploziva stvara lokalno veliku količinu gasova pod vrlo visokim pritiskom, koji se vrlo brzo šire stvarajući udarni talas krutog fronta. On se prostire brzinom zvuka u svim pravcima u sredini oko centra eksplozije. Osim toga, širenje gasova pod vrlo visokim pritiskom izaziva silu pritiska na čitavu prepreku postavljenu u blizini područja eksplozije i prouzrokuje njenu deformaciju. Dejstvo ovog širenja, zajedno sa udarnim talasom, izaziva deformacije sa izduženjima bez prekida, koja su znatno veća od izduženja koja se dobijaju pri sporoj deformaciji, npr., pri izvlačenju na presi.

Ostvareno dejstvo na dati materijal zavisi, svakako, od prirode, količine, oblika i položaja upotrebljenog eksploziva. Ali, isto tako, zavisi i od sredine u kojoj se eksploziv nalazi. Ako je sredina vazduh, onda je brzina širenja vrlo velika. Ako je sredina voda (*sl.* 59), onda je brzina širenja manja, ali je zato pritisak znatno veći. Maksimalni pritisak kojim ovo širenje dejstvuje na materijal zavisi od udaljenosti koja razdvaja eksplozivno punjenje od površine predmeta koji treba oblikovati. Što je ova udaljenost veća, to je i maksimalni pritisak slabiji.



Sl. 59

Oprema. Oprema za eksploziono oblikovanje je relativno prosta i nije skupa. Alati do izvesne mere liče na one koji se koriste kod izvlačenja limova; ipak, u većini slučajeva koristi se samo matrica, a probijač je, da se tako kaže, zamenjen širenjem sredine u kojoj se događa eksplozija. Matrice se izrađuju od najjeftinijeg mogućeg materijala (beton, armirana plastika, čelik itd.). Ako pri operaciji oblikovanja postoji mogućnost da se zatvori vazduh između matrice i lima koji se oblikuje, a to je, npr., slučaj kada je matrica izdubljena, onda treba predvideti otvor za evakuaciju tog prostora pre oblikovanja. U nekim posebnim slučajevima eksploziv se stavlja u dodir sa materijalom koji treba oblikovati (*sl.* 60). Zato je pritisak mnogo veći. Sa eksplozivom u obliku lista u dodiru sa limom mogu se obavljati metalna planiranja. Sa eksplozivima složenije geometrije mogu se predmeti bušiti i seći (odvajanje nekog stepena rakete).



Sl. 60

Prednosti. Mehaničke osobine materijala oblikovanih eksplozijom su u većini slučajeva različite od njihovih početnih osobina.

— Izduženje pri prekidu je gotovo uvek povećano.

— Granica tečenja je u najvećem broju slučajeva smanjena, što olakšava oblikovanje.

— U izvesnim slučajevima tvrdoća dobijenih proizvoda je znatno veća od tvrdoće proizvoda dobijenih klasičnim postupcima.

Ritam proizvodnje je relativno spor, što čini da se ovaj postupak primenjuje jedino za oblikovanje pojedinih komada ili malih serija.

OBLIKOVANJE POMOĆU ELEKTRIČNOG PRAŽNJENJA. Baterija kondenzatora se prazni proizvodeći varnicu između dve elektrode. Ove elektrode su uronjene u vodu koja delimično isparava pod dejstvom varnice stvarajući talas pritiska. Voda u zatvorenoj sredini prenosi ovaj talas na lim, koji se pribija uz matricu.

MAGNETNO OBLIKOVANJE. Plosnat i savitljiv navoj se naslanja na magnetni lim koji treba oblikovati. Zatim se kroz navoj propusti pogodna električna struja. Polje magnetnih sila, koje tom prilikom nastaje, deformiše lim dok se ovaj ne nasloni na matricu.

Metalurgija praha

Metalurgija praha je postupak oblikovanja metala i legura. Sastoji se u pripremi finih prahova metala, njihovoj aglomeraciji presovanjem, zatim, međusobnom stapanju čestica metala ili njihovom »sinterovanju« na temperaturi ispod tačke topljenja.

NAČIN RADA. Metalurgija praha sadrži tri posebne delatnosti: pripremanje prahova, presovanje, koje im daje željeni oblik i izvesnu koheziju, zatim sinterovanje ili spajanje čestica praha zagrevanjem.

PROIZVODNJA PRAHOVA. Shodno upotrebljenim metalima i legurama i shodno osobinama prahova koje se traže, koriste se dve vrste postupaka: mehanički i fizičko-hemijski postupci.

Mehanički postupci su atomizacija i mlevenje.

Atomizacija je metod koji se najviše primenjuje. Mlaz tečnog metala šalje se u vrlo jaku struju gasa (vazduh, vodena para, neutralni gas). Metal se gasnim mlazom rasprašuje u fine kapljice koje očvršćavaju dajući metalni prah. Većina metala može se ovim postupkom pretvoriti u prah (železo, olovo, cink, bakar, kalaj, bronza, itd.).

Mlevenjem se mogu dobiti prahovi, pod uslovom da je materijal krt. Tim postupkom se mogu usitniti krti prahovi koji su dobijeni elektrolizom.

Fizičko-hemijski postupci. Redukcija oksida metala i elektroliza su dva postupka koji se vrlo mnogo primenjuju.

Metalni oksidi, koji su najčešće vrlo krti, mogu se veoma fino samleti mehaničkim postupkom. Zatim se prah oksida redukuje ugljenikom, vodonikom ili ugljen-monoksidom. Dobijene čestice metala su utoliko finije ukoliko je oksid bio finije samleven, ukoliko je gas suvlji a temperatura redukcije niža. Prah železa može se načiniti redukcijom vrlo čiste rude. Volfram i molibden u prahu dobijaju se takođe iz njihovih oksida.

Elektroliza metalnih soli u vodenom rastvoru daje vrlo krte metalne taloge, koji se lako melju, pod uslovom da su parametri elektrolize (koncentracija, gustina struje, temperatura itd.) smišljeno izabrani. Železo, nikl, kobalt, bakar, bronza, mesing mogu, pored drugih, da se dobiju i u obliku praha ovim postupkom.

PRESOVANJE. Prah koji treba presovati je prah metala ili legure, ili vrlo homogena smeša dva ili više metala. Često se dodaje neki materijal za mazivo, kao što je stearinska kiselina, koji olakšava presovanje a zatim se uklanja na početku zagrevanja. Prah se presuje na hladno pod pritiscima koji mogu da budu veći od 10 t/cm², u matricama od čelika koje imaju oblik predmeta koji treba dobiti, pomoću klipova koje pokreću mehaničke ili hidraulične prese. Pritisak mora da bude homogen, bez obzira na oblik predmeta. Posle presovanja jedan od klipova oslobađa predmet iz matrice. Tako dobijeni ispresak je krt, ali ima dovoljnu koheziju da bi se njime rukovalo bez oštećenja. Ova kohezija dobrim delom potiče od međusobnog pakovanja zrna. Otpornost na kidanje presovanog železnog praha ne dostiže 1 kg/mm. Gustina presovanog proizvoda zavisi od primenjenog pritiska i, za dati pritisak, od stišljivosti praha.

SINTEROVANJE. Tako oblikovani predmeti pod pritiskom dovode se do temperature omekšavanja zrna. Ova temperatura, koja se naziva temperaturom sinterovanja, uvek je znatno niža od temperature topljenja materije koja sačinjava zrna. Ona se obično nalazi na 50 do 90 % temperature topljenja izražene u Kelvinovoj skali. U izvesnom opsegu temperature čestice se međusobno spajaju i gustina ispreska raste. Zato nastaje skupljanje. Osim toga nastaje rekristalizacija metala, koji je bio deformisan usled pritiska.

Mehanizam. Mehanizam sinterovanja je dosta složen i malo poznat.

— Sinterovanje čistog metala događa se u čvrstoj fazi u potpunosti. Područja dodira između zrna u ispresku postepeno se povećavaju zbog priliva energije usled porasta temperature.

— Sinterovanje smeše od dva metala, bez pojave tečne faze, nastaje obostranom difuzijom između čestica dva metala. Ova difuzija u čvrstom stanju je dosta spora, pa koncentracija postaje homogena tek posle dugog zagrevanja. Ako jedan metal difunduje znatno brže od drugog, mogu nastati šupljine [Kirkendalov (Kirkendall) efekat].

— Moguće je sinterovati ispresak uz pojavu tečne faze. Ispresak zadržava svoj oblik ako udeo tečne faze nije suviše velik (najviše 25 — 30 %).

Tečna faza se javlja ako, npr., temperatura pređe tačku topljenja jedne od komponenti. Sinterovanje smeše 90 % bakra i 10 % kalaja (srazmera jedne bronze) počinje topljenjem kalaja. Tečna faza pospešuje difuziju i posle toga dosta brzo postiže se zadovaljajuća homogenost.

Način rada. Sinterovanje se obavlja u redukujućoj atmosferi, a izuzetno u vakuumu. Redukujuća atmosfera (vodonik) sprečava oksidaciju prahova i čak smanjuje tragove oksida koji su mogli nastati usled velike reaktivnosti praha.

Do 1 200°C za sinterovanje se upotrebljavaju cevne peći koje se greju elektrootporno. Cev sadrži vodonik. Na krajevima cevi plamena zavesa izoluje od okolnog vazduha vodonik koji izlazi i sagoreva ga. Proizvod se kreće kroz peć na pokretnoj traci. Za temperature iznad 1 200°C ne postoje pokretne trake. Zato je na tim temperaturama operacija prekidna.

Peći nepropustljive konstrukcije otvaraju se povremeno radi pražnjenja i punjenja. One se greju otporno (grafit, molibden, tantal) ili indukciono.

Dobijeni proizvod može se zatim podvrgnuti različitim operacijama: kalibraciji radi postizanja tačnih dimenzija, klasičnim postupcima elektrolitičkog predačenja, termičkoj obradi, cementaciji itd.

Osobine sinterovanih metala. Proizvodi koji su dobijeni sinterovanjem imaju znatno drukčije osobine od proizvoda od istog metala ili legure koji su dobijeni klasičnim metalurškim postupcima.

— Gustina sinterovanih metala zavisi naročito od vremena sinterovanja. Ona teži teorijskoj gustini u srazmeri sa nastajanjem pora. Može se, isto tako, ponovo presovati metal posle prvog sinterovanja i ponovo zagrevati. Ali često se ne zahteva približavanje teorijskoj gustini i predmet zadržava izvesnu poroznost. Jedan deo šupljina povezan je sa spoljnom sredinom (otvorena »poroznost«), drugi deo je izolovan (zatvorena »poroznost«). Gustina sinterovanog metala određuje njegove fizičke i mehaničke osobine.

— Električna provodljivost i indukcija sinterovanog metala manje su od livenog.

— Modul elastičnosti i zatezna čvrstoća brzo se smanjuju sa gustinom. Npr., kada im je gustina 75% od teorijske, metali i legure imaju čvrstoću koja jedva da iznosi polovinu veličine njihove čvrstoće u livenom stanju.

— Sinterovani metali znatno prigušuju vibracije, ali slabo izdržavaju udare.

— Sinterovani predmeti obično nemaju tačne dimenzije. Posle sinterovanja oni se mogu kalibrisati u hladnom stanju provlačenjem kroz matrice.

PRIMENA METALURGIJE PRAHA. Metalurgija praha primenjuje se u dva vrlo različita područja: jedno područje je svojstveno njoj samoj, gde ono jedino omogućuje da se dođe do proizvoda određenih osobina, a drugo područje je ono u kome se metalurgija praha takmiči sa drugim postupcima.

SVOJSTVENO PODRUČJE METALURGIJE PRAHA. Ovo je jedini postupak kojim se mogu dobiti predmeti određene poroznosti (filtri, samopodmazajuća ležišta) i kojim se mogu oblikovati predmeti koji se ne mogu ili ne žele liti.

Dobijanje poroznih predmeta. Sinterovani predmeti imaju svojstvo da mogu biti više ili manje porozni. Ovo svojstvo se koristi za izradu određenih proizvoda. Metalni filtri (nerđajući čelik, nikl, bronza itd.) nisu osetljivi na nagle temperaturne promene. Dobija se vrlo postojana poroznost, za izabrane dimenzije, korišćenjem prahova loptastih zrna koja se slažu u kalupima vrlo pravilno. Samopodmazajuća ležišta su sinterovani prstenovi velike otvorene poroznosti, koji se natope uljem pod vakuumom u toplom stanju. Ovo ulje služi za podmazivanje osovine koja se okreće u prstenu.

Oblikovanje određenih predmeta. Metalurgija praha omogućuje da se dobiju predmeti polazeći od materijala čije osobine praktično onemogućuju svaki drugi postupak dobijanja, kao što su vatrostalni materijali visoke tačke topljenja i slabe duktilnosti, karbidi, kermeti, pseudolegure i legure načinjene od metala čije se tačke topljenja veoma razlikuju.

Proizvodi od vatrostalnih metala. Teško je stopiti molibden, volfram i tantal, čije su tačke topljenja oko 2000°C. Osim toga, na tim temperaturama metali bi bili onečišćeni u loncima za stapanje i postali bi krti usled rastvorenih gasova (vodonik). Sinterovanjem dobijaju se u duktilnom obliku. Na taj način se volfram može pretvoriti u vrlo tanke žice koje služe za izradu vlakana za sijalice.

Karbidi. Karbidi nekih metala (volfram, tantal) veoma su tvrdi. Njihovo oblikovanje livenjem je nemoguće pošto se razlažu pre stapanja. Zato se sinteruju uz pomoć kobalta kao metalnog veziva. Sinterovanje se obavlja u dva dela: *predsinterovanje* (900°C) daje manje tvrd proizvod koji se može obrađivati klasičnim postupcima, i *pravo sinterovanje* (1500°C) koje daje predmetu konačnu tvrdoću. Sinterovani karbid volframa zadržava svoju tvrdoću i na visokoj temperaturi. Koristi se za izradu matrica za presovanje istiskivanjem i za izvlačenje žica, a u obliku odgovarajućih pločica služi za obradu rezanjem tvrdih metala.

Kermeti. Ovi mešoviti materijali, koji na visokim temperaturama imaju zadovoljavajuće mehaničke osobine, mogu da budu na bazi karbida, borida ili metalnih oksida i klasičnih metala ili legura. Na vrlo visokim temperaturama kermeti združuju osobine svojstvene keramikama (tvrdoća) i metalima (provodljivost, duktilnost).

PODRUČJE KONKURENCIJE. Glavni razlozi koji su doprineli razvoju masovne proizvodnje sinterovanih predmeta su najvećim delom ekonomske prirode.

Mehanički delovi. Metalurgija praha konkuriše klasičnim postupcima za izradu nekih mehaničkih delova. Pored normalnog livenja i livenja pod pritiskom, presovanja i izvlačenja još je i obrada rezanjem omogućivala doskora izradu velikih serija metalnih predmeta. Za obradu rezanjem primenjuju se skupocene alatne mašine za koje je potrebno kvalifikovano i iskusno osoblje. Osim toga, otpadak je velik i podiže cenu koštanja. Zbog toga, da bi se povećala produktivnost fabričkih radionica, išlo se na uklanjanje tog »uskog grla« i na zamenu skupocene obrade rezanjem ekonomičnijim postupcima, kao što je sinterovanje. Postupak je konkurentan, ako je proizvodnja brojčano velika, ako je vreme potrebno za klasičnu obradu veliko i ako predmet ne mora da ima suviše dobre mehaničke osobine. Na ovaj način izrađuju se zupčanici sa unutrašnjim i spoljnim ozubljenjem.

Čisti metali. Neki metali (železo, berilijum) koji se traže u vrlo čistom stanju, reaguju sa loncem u kome se stapaju, te se onečiste. Na temperaturi sinterovanja lakše je da se izbegne ova pojava.

Magneti. Magnetna legura železo, nikl (28%), aluminijum (12%) i kobalt (5%) teško se lije, kuje i obrađuje. Metalurgijom praha izrađuju se magneti na potpuno zadovoljavajući način, polazeći od smeša prahova u pogodnim srazmerama. Isto tako se izrađuju magneti na bazi oksida železa i kobalta.

Zavarivanje

Zavarivanje je operacija kojom se spajaju dva metalna predmeta istovremenim stapanjem jedne zone uz obe strane kojima se oni dodiruju. Prema tome, karakteristika zavarivanja je lokalno stapanje. Da bi se postiglo takvo stapanje, koriste se različiti postupci.

METALURŠKI ZNAČAJ ZAVARIVANJA

POČETNO STANJE. Metal koji se zavaruje, ili osnovni metal, ima pre zavarivanja određeni sastav, stanje i strukturu. Polazi se od toga da je homogenog sastava i da sadrži određene nečistoće. Njegovo stanje je ili naznačeno ravnotežnim dijagramom stanja njegovih sačinitelja (žareno stanje) ili je neko drugo, neravnotežno (kaljeno) stanje. Njegova struktura, posebno veličina zrna, zavisi od njegove »termičke istorije«. Često se zapremina metala povećava nekim dodatkom spolja: ovaj »dodatni« metal, koji, uostalom, ne mora da bude isti kao osnovni metal, ponekad je »uvijen«, tj. zaštićen nekom oblogom. Zavarivanje se obavlja bilo na vazduhu, ili u neutralnoj atmosferi (argon, helijum), ili u redukcionoj atmosferi (vodonik), ili, čak, u vakuumu.

POSLEDICE ZAVARIVANJA. Po pravilu, zavarivanje se obavlja uvek na visokoj temperaturi.

Termički ciklus. U toku operacije predmet se podvrgava određenom termičkom ciklusu. Poznavanje tog ciklusa je od osnovne važnosti za razumevanje i objašnjenje pojava koje nastaju za vreme zavarivanja. Određena zona oko vara se zagreva. U svakoj tački ovog područja temperatura se menja zavisno od vremena po određenom zakonu, koji zavisi od postupka zagrevanja, prirode metala, geometrijskog oblika predmeta. Snimanjem krive temperatura — vreme u više tačaka može se zabeležiti:

— maksimalna temperatura koja se dostiže u svakoj tački;

— vreme iznad neke određene temperature ili temperature transformacije;

— brzina hlađenja.

Na osnovu ovih podataka mogu se odrediti nastale promene u zoni vara i objasniti dobijeno stanje i struktura.

U najopštijem slučaju područje vara ima dve ili tri zone koje se jasno vide makrografski.

— »Stopljena« zona, gde je temperatura bila veća od temperature likvidusa osnovnog metala. Često je to zona sitnih zrna, pošto je hlađenje vrlo brzo. Ona može imati iste greške kao i odlivak (šupljikavost, mikrousahline). Skupljanje, naročito, ometaju okolni delovi koji se nisu stopili. Stoga mogu nastati prskotine.

— »Termička« zona vara, u kojoj je temperatura ispod tačke topljenja, ali može ipak da bude dovoljna da promeni stanje (promena ravnotežne faze ili, u slučaju vrlo brzog hlađenja, pojave neravnotežne faze, kao martenzit u čeliku) ili mikrografsku strukturu (rast zrna).

— Jedna zona, obično vrlo mala, delimičnog stapanja, tamo gde je temperatura dostigla interval očvršćavanja legure.

Termički ciklus se može do izvesne mere izmeniti. Može se, npr., obaviti prethodno lokalno ili potpuno zagrevanje predmeta, ili da bi se izbegao veliki termički udar ili da bi se smanjila brzina hlađenja. Nasuprot tome, može se ubrzati hlađenje.

Naponi. Lokalni i prolazni karakter zagrevanja prouzrokuje temperaturnu neujednačenost predmeta za vreme zavarivanja, što izaziva unutrašnje napone. Ovi naponi u metalu mogu da prevaziđu napon pri prekidu: nastaju prskotine. Oni mogu da izazovu samo trajnu deformaciju predmeta. Najzad, oni se mogu javiti samo kao zaostali naponi, koji mogu da se uklone stabilizacionim žarenjem jer su opasni u slučaju obrade rezanjem.

Fizičko-hemijske promene. Metal koji se zagreva i lokalno topi može u dodiru sa spoljnim činiocima (atmosfera, omotač) da pretrpi fizičko-hemijske promene.

— Legura koja sadrži isparljivi sastojak može lokalno da osiromaši.

— Stopljeni metal može da reaguje sa okolnom sredinom (obrazovanje oksida, zadržavanje nečistoća iz elektroda).

— Najzad, može da rastvara gasove (kiseonik, vodonik, azot), koji ponekad imaju katastrofalno dejstvo (krtost čelika zbog vodonika).

Zavarljivost. Prema tome, mnogobrojni su faktori koji utiču na kvalitet zavarivanja. Rezultati se ne mogu predviđati polazeći od mehaničkih i metalurških osobina metala. Zato se pokušavaju odrediti probe zavarljivosti.

Ovim probama traže se odgovori na sledeća pitanja:

— da li je moguće spajanje dva predmeta lokalnim stapanjem;

— kakve metalurške promene nastaju;

— kakav je kvalitet vara (osetljivost prema prskotinama i na efekat zareza).

KLASIČNI POSTUPCI ZAVARIVANJA

ZAVARIVANJE KOVANJEM upotrebljava se za spajanje komada od niskougljeničnog čelika. Komadi koji treba da se spoje, zagrevaju se na kovačkoj vatri ili u peći do belog usijanja, zatim se stave jedan na drugi i energično kuju na nakovnju. Da bi se spojio čelik sa više ugljenika, između komada koji se spajaju stavlja se jedan topitelj (boraks), koji sa oksidom železa obrazuje lako topljivo jedinjenje.

ZAVARIVANJE PLAMENIKOM. U ovom postupku, koji se još naziva *autogenim zavarivanjem* ili *oksiacetilenskim zavarivanjem,* toplota potrebna za zavarivanje dobija se sagorevanjem acetilena u kiseoniku na izlasku iz plamenika. Sagorevanje smeše oslobađa vrlo veliku toplotu. Shodno uzajamnom odnosu kiseonika i acetilena u smeši, plamen može biti naugljenisavajući ili redukcioni (manjak kiseonika), oksidišući (višak kiseonika) ili neutralni (stehiometrijska smeša).

Prethodno se ivice komada koje treba zavariti »obore« i postave jedna prema drugoj; u tako obrazovani V oblik lije se dodatni metal istog sastava, koji se u obliku šipke sasvim blizu mesta zavarivanja stapa najtoplijim delom plamena iz plamenika. Zagrevanje je dosta sporo. Stopljena zona, kao i temperaturna zona, je široka. Metalurške promene i uneti naponi su veliki.

ZAVARIVANJE U LUKU. Toplotna energija se dovodi pomoću električnog luka čija temperatura prelazi 3000°C; on izbija između dve elektrode čiji se potencijal razlikuje i može da bude jednosmerni ili naizmenični. Predmet koji se zavaruje može da predstavlja jednu od elektroda. Ponekad čak svaki od oba dela koja treba spojiti imaju ulogu elektroda (zavarivanje varničenjem). Često dodatni metal služi kao jedna od elektroda. Luk se uspostavlja tako što se elektroda, pošto prethodno dodirne predmet koji se zavaruje, malo odmakne. Elektroda može biti od teško topivog metala (volfram). Toplota koja se oslobađa prolaskom struje kroz luk stapa metal predmeta koji se zavaruje na mestu izbijanja luka. Na tom istom mestu prinosi se dodatni metal, koji može biti u obliku metalne šipke. Ovaj postupak se većinom obavlja u atmosferi neutralnog gasa (argon). Dobri rezultati se postižu korišćenjem jedne zaštićene elektrode koja se naziva »potrošnom«, koja se stapa istovremeno kad i komadi koji se spajaju. Ona je zaštićena jednom oblogom koja se takođe stapa; materijal obloge skuplja nečistoću i štiti var od oksidacije. Komadi koji se zavaruju imaju isto tako oborene ivice, kao kod autogenog zavarivanja; dodatni metal mora da ispuni tako stvoreni V oblik između dva komada. Zavarivanje železnih metala može se obaviti dobro bilo naizmeničnom bilo jednosmernom strujom; ipak se jednosmerna struja preporučuje u slučaju nerđajućih čelika, a obavezno za specijalne čelike, za bronzu i aluminijum. Osim toga, jednosmerna struja olakšava stvaranje luka i omogućuje veću brzinu stapanja elektrode, te zbog toga veću brzinu nanošenja metala. Zbog toga je termička zona vara uža.

OTPORNO ZAVARIVANJE. Toplota potrebna za zavarivanje dobija se Džulovim efektom. Komadi su čvrsto naslonjeni jedan na drugi i kroz njih se propušta struja velikog intenziteta koja, nailazeći na otpor kontakta, vrši lokalno pregrevanje i stapanje. U toku hlađenja pritisak se povećava da bi se ostvarilo lokalno kovanje.

Tačkasto zavarivanje naročito se koristi za limove, a ostvaruje se nizom zavarivanja koja se vrše pritiskivanjem limova između dve elektrode malog preseka koje obrazuju klešta. Ako se pritisnuti limovi neprekidno pomeraju između dve elektrode u obliku točkića, dobija se prava spojna traka, a ne samo odvojene tačke.

Aluminotermija. Sjedinjavanje aluminijuma sa kiseonikom iz oksida železa, koje se izaziva sagorevanjem magnezijuma, oslobađa vrlo veliku količinu toplote i odvaja žeželo u rastopljenom stanju. Smeša prahova ova dva materijala reaguje na dodiru dva komada koja treba spojiti, te se oni lako stapaju i zavaruju. Ovim postupkom se zavaruju železničke šine.

SPECIJALNI POSTUPCI

Zavarivanje pomoću atomskog vodonika. Struja vodonika prolazi kroz električni luk koji izbija između dve nepotrošne elektrode. Na temperaturi luka molekularni vodonik disocira u jone H^+. Joni dospevaju do hladnog predmeta, gde se ponovo obrazuju molekuli uz veliko oslobađanje toplote. Osim toga struja vodonika štiti var od okolnih gasova.

ZAVARIVANJE ELEKTRONSKIM BOMBARDOVANJEM. Potrebna toplota za stapanje dobija se sudaranjem elektrona iz jednog snopa sa metalnom površinom, pri čemu se njihova kinetička energija pretvara u toplotnu. Elektroni se dobijaju iz elektronskog topa. Predmet se pomera u odnosu na snop elektrona (ili snop u odnosu na predmet). Sistem elektronski top — predmet nalazi se u vakuumu. Top (*sl.* 61) sadrži katodu (tantal ili volfram) koja u vakuumu emituje elektrone.

Ova katoda se greje naposredno Džaulovim efektom ili posredno zračenjem zagrevnog vlakna. Visoki napon između katode i anode ubrzava elektrone, koji se zatim fokusiraju magnetnim ili elektrostatičkim sočivom. Ponekad jedna dodatna elektroda [Veneltova (Wehnelt) elektroda] služi za regulisanje emisije sa katode. Snop elektrona može imati prečnik od nekoliko desetih milimetra pa naviše u svom najužem delu.

Karakteristike postupka su uglavnom sledeće:

— vrlo velika specifična snaga;

— mala površina snopa na mestu zagrevanja;

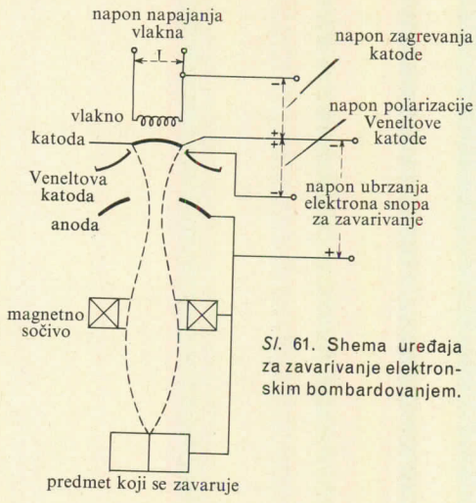
— vrlo dobar vakuum koji vlada u trenutku izvođenja operacije.

Iz toga proizlaze sledeće osobine koje su značajne za zavarivanje:

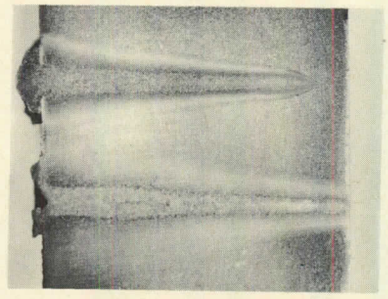
— vrlo velika dubina prodiranja, pri čemu odnos dubine prema širini stopljene zone može dostići vrednost od 15, čak i 20;

— vrlo mala širina stopljene zone i termičke zone vara; zato su trajne deformacije vrlo male;

— nemoguće je onečistiti metal pošto je atmosfera veoma razređena.



Sl. 61. Shema uređaja za zavarivanje elektronskim bombardovanjem.



Sl. 62

Fot. CEA

Sl. 62. pokazuje mikrografiju vara ostvarenog na mekom čeličnom limu.

Gotovo svi metali se mogu zavarivati elektronskim bombardovanjem. Mana ovog postupka je naročito u tome što se mora raditi u vakuumu. Dimenzije vakuumske komore i, sledstveno tome, dimenzije predmeta ne mogu ići preko nekih granica. Vrše se pokušaji radi oslobađanja od ove zavisnosti bilo, ukoliko je to moguće, delimičnim unošenjem velikih predmeta u vakuumsku komoru, bilo da se vakuumska komora potpuno odbaci i da se razvije elektronski top dovoljno snažan da bi putanja elektrona kroz vazduh bila dovoljna. Uređaj za zavarivanje bombardovanjem elektrona predstavlja veliku investiciju.

POSTUPCI ZAVARIVANJA BEZ STAPANJA OSNOVNOG METALA

Klasični ili specijalni postupci koji su bili prethodno opisani uključuju stapanje. Ali moguće je zavarivanje dva metalna predmeta a da se ni u kom trenutku ne pojavi njihova tečna faza.

ZAVARIVANJE DIFUZIJOM. Dva metala koji se greju na temperaturi ispod njihove tačke topljenja i koji su pritisnuti jedan na drugi, mogu da se zavare uzajamnom difuzijom kroz međupovršinu. Tako se mogu zavariti jedan s drugim dva različita metala (zlato i srebro). Pritisak i temperatura mogu se postići pomoću eksplozije. Ponekad je zavarivanje moguće pod pritiskom, bez ikakvog zagrevanja (bakar, aluminijum, olovo, nikl). U tom slučaju sigurno je da se metalurške osobine komada nisu promenile.

ZAVARIVANJE TRENJEM. Sastoji se u obrazovanju neke vrste »zaribanog« dodira između dva komada koji se zavaruju. Ako se, npr. okreće jedan metalni komad koji se opire o drugi učvršćeni komad, pod određenim uslovima nastaje zavarivanje ta dva komada mehanizmom koji nije još poznat. Tako se zavaruju krajevi cevi, jedan na drugi, ili prirubnice cevi, okretanjem komada koji treba da se spoje, u smeru suprotnom jedan od drugoga.

ZAVARIVANJE ULTRAZVUKOM. Dva metalna dela koji su prislonjeni jedan uz drugi zavaruju se pod dejstvom ultrazvuka. Mehanizam spajanja je i u ovom slučaju slabo poznat. Veza nastaje usled uzajamnog prodiranja materijala u dodiru, bez pravog stapanja i bez promene kristalne strukture spojenih materijala. Za vreme operacije zavarivanja komadi se pritisnu između metalnog čekića koji se pobuđuje ultrazvučnim vibracionim kretanjem i masivnog nakovnja koji služi kao reflektor. Porast temperature je mali. Koriste se učestanosti reda 20000 Hz, a snage ne prelaze 5 kW. Debljina komada koji je postavljen prema emiteru vibracija ograničena je (2 mm za aluminijum pri snazi od 2 kW).

Ovaj postupak omogućuje da se spoje elementi metala i legura koji se ne mogu zavariti klasičnim postupcima (plamenikom, lučno ili otporno); osim

toga, on omogućuje zavarivanje vrlo tankih listova i spajanje različitih metala, posebno spajanje cirkonijuma i nerđajućeg čelika, čelika i titana, molibdena i aluminijuma itd. Otpornost i hermetičnost varova uobičajenih metala iste su kao u slučaju otpornog zavarivanja. Bitne osobine ultrazvučnog zavarivanja su otpornost stopljene zone i očuvanje kristalne strukture zavarenih komada.

LEMLJENJE. Lemljenje je postupak spajanja bez stapanja predmeta koji se sjedinjuju, ali uz stapanje dodatnog metala ili *lema*, koji se razlikuje od osnovnog metala. Lem se sam topi i kvasi predmete koji ostaju u čvrstom stanju; on, obično, difunduje u njih. Lemovi su najčešće legure sa niskom tačkom topljenja na bazi kalaja, srebra, bakra. Klasična lemljenja pospešuju se materijalom kao natrijum-borat (»topitelj«), koji čisti i potpomaže kvašenje površine. Zagrevanje može biti lokalno (na plameniku ili lemilicom) ili potpuno (u peći, npr., indukcionoj).

Lemljenje na temperaturi ispod 400°C obično se naziva *mekim lemljenjem*. Kada temperatura prelazi 400°C reć je o *tvrdom lemljenju* i u tom slučaju se mora koristiti plamen visoke temperature ili peć.

MENJANJE OSOBINA KOJE SU STEČENE U PRETHODNIM OBRADAMA

Termička obrada

Često je potrebno da se metali i legure podvrgnu termičkoj obradi da bi se struktura ili homogenizovala, bilo da se promeni kapacitet deformacije (izduženje, krtost), ili da se promeni otpornost na deformaciju (tvrdoća, zatezna čvrstoća).

Ona se primenjuje uglavnom na čelike, bakarne i lake legure. Termička obrada je operacija ili splet operacija koje se sastoje od: zagrevanja i, zatim, hlađenja metala ili legure u čvrstom stanju. Nove osobine, koje dobija proizvod, zavise od strukturnih promena koje su nastale u toku ove obrade.

OTKLANJANJE DEFORMACIONOG OTVRDNJAVANJA; REKRISTALIZACIJA

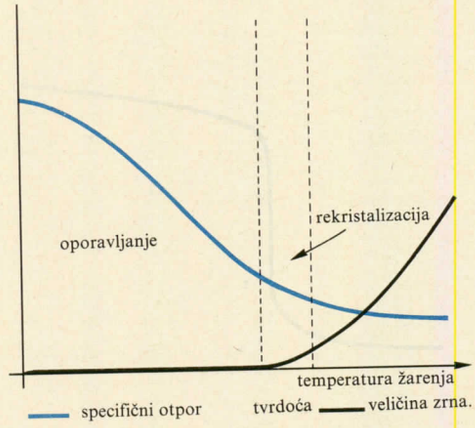
Fizičke osobine hladno deformisanog metala ne razlikuju se mnogo od osobina metala u užarenom stanju, njegova gustina i električna provodljivost su malo manje, dok su mu koeficijent dilatacije i stišljivost nešto veći; to su vrlo mali efekti. Uticaj hladne deformacije na sklonost prema koroziji izraženiji je: ona se povećava. Ali se najveće promene događaju u mehaničkim osobinama: tvrdoća, granica elastičnosti i napon pri prekidu rastu, dok, nasuprot tome, izduženje pri prekidu opada. Uopšte uzev, sklonost prema deformaciji se jako smanjuje usled hladne deformacije, tako da se metali mogu obrađivati hladnom deformacijom samo do izvesnih granica.

Kada se hladno deformisani metal zagreva, njemu se malo-pomalo vraćaju početne osobine, a najizrazitija pojava pri tome je omekšavanje; ono je rezultat oporavljanja i rekristalizacije. Posle ova dva fenomena nastaje rast zrna. Ovi procesi zavise od vremena, oni nisu trenutni. Oni su utoliko brži ukoliko je temperatura viša, tako da se može steći utisak da su na visokoj temperaturi trenutni. Obično se ne može ustanoviti jasna granica između ove tri pojave koje se pokrivaju. Njihova brzina isto tako zavisi, na datoj temperaturi, od prirode metala i njegove čistoće. Približno se može reći da metali koji imaju nisku tačku topljenja rekristališu na niskoj temperaturi. Prisustvo nečistoća povećava temperaturu rekristalizacije. Najzad, ne menjaju se sve osobine jednako, neke se menjaju brže od drugih.

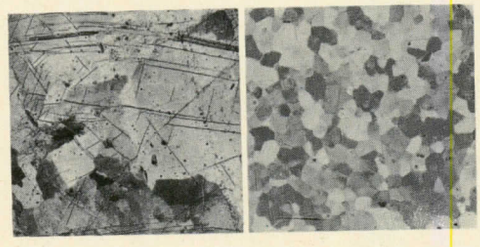
U toku oporavljanja događa se ravnomeran pad specifičnog otpora. Ali ni tvrdoća ni mikrografska struktura ne podležu promenama (*sl.* 63). Najvažnija posledica oporavljanja je nastajanje unutrašnjih naprezanja. Ona imaju vrlo štetan uticaj na otpornost prema koroziji; ako su to površinski naponi, onda utiče na otpornost prema zamoru. Osim toga, ukoliko posle hladne deformacije treba komad obrađivati rezanjem, unutrašnji naponi mogu prouzrokovati velike deformacije, što čini iluzornim zahtev za tačnošću. Kaže se da metal radi. Zbog toga je često vrlo važno da se on podvrgne postupku otpuštanja napona. U tu svrhu ga treba zagrevati na umerenoj temperaturi (oko 650°C za čelik, oko 200°C za mesing) za vreme oko jednog časa. Ovo vreme, svakako, zavisi od veličine komada koji se obrađuje, koji sav treba da bude na istoj temperaturi. Ako to nije, onda ostaju naponi termičkog porekla, koji mogu da budu bar isto toliko ozbiljni kao naponi koje treba odstraniti. Iz istog razloga zagrevanje, a naročito hlađenje, treba da bude polagano.

U trenutku kada počinje rekristalizacija primećuje se dosta brzi pad tvrdoće uz istovremenu pojavu novih zrna; kraj rekristalizacije označen je potpunom zamenom starih zrna novim (*sl.* 64a i b). Ako su ova nova zrna suviše velika, to predstavlja ozbiljne nedostatke u industrijskoj praksi; zaista, kada se deformiše metal krupnozrne strukture, njegova površina poprima grub i neprijatan izgled, sličan izgledu pomorandžine kore. Da bi se izbegla ova pojava, treba žariti metal koji je prethodno bio hladno deformisan u velikom stepenu; temperatura rekristalizacije manje je važan činilac, ali metal bolje rekristališe na visokoj temperaturi. Ona je utoliko niža, ukoliko je metal bio jače deformisan. U svakom slučaju, da bi se dogodila rekristalizacija, mora se prekoračiti određeni stepen deformacije, koji se naziva *kritičnom deformacijom*. Isto tako utiče veličina zrna polaznog metala; ukoliko je ono manje, utoliko je niža temperatura rekristalizacije.

Ako se posle rekristalizacije nastavi zagrevanje ili, u opštijem slučaju, ako se zagreva na visokoj temperaturi, nastaje rast zrna, što treba izbegavati. To je, npr., štetna pojava pri pregrevanju čelika, koje može nastati u toku suviše dugog postupka austenizacije. To se, isto tako, događa u volframskim vlaknima sijalica ili u otpornim grejačima od molibdena vakuumskih peći, što ove proizvode čini krajnje krtim. Rast zrna može se ograničiti dodatkom nerastvornih nečistoća, kao što je oksid torijuma u volframu, ali ako su ovi dodaci mali, može se dogoditi da dejstvuju samo na nižim temperaturama, dok, nasuprot tome, na višim temperaturama izazivaju prekomeran rast zrna.



Sl. 63 Promena specifičnog otpora, tvrdoće i veličine zrna u toku oporavljanja i rekristalizacije.



Sl. 64a. Mikrografija čistog krupnozrnog uranijuma.
Sl. 64b. Mikrografija čistog sitnozrnog uranijuma posle rekristalizacije.

NORMALIZOVANJE

Od važnosti je da zrna budu sitna ne samo na kraju obrade već i pre oblikovanja metala. Postupak normalizovanja treba da usitni strukturu i poveća tvrdoću metala bez primene kaljenja. On se može koristiti u slučajevima kada metal ili legura podležu alotropskoj transformaciji na visokoj temperaturi. Prelaz iz visokotemperaturne faze u onu koja je postojana na sobnoj temperaturi dešava se na temperaturi koja je utoliko niža od ravnotežne, ukoliko je veća brzina hlađenja. Što je temperatura transformacije niža, novonastalo zrno je sitnije. Dakle, postupak normalizovanja sastoji se u tome da se metal dovede u područje postojanosti visokotemperaturne faze i da se zatim hladi na vazduhu. Primenjuje se, pre svega, na čelike, ali se isto tako može navesti postupak normalizovanja legura uranijuma.

TALOŽENJE; STARENJE

Ovaj postupak, koji se primenjuje na sve vrste legura, otkriven je prvo na duraluminijumima. Legura aluminijuma sa 4 % bakra (*sl.* 65) na sobnoj temperaturi obično se sastoji od smeše gotovo tvrdog aluminijuma i jednog tvrdog intermetalnog jedinjenja formule Al_2Cu u malom odnosu. Na 540°C sav bakar u leguri prelazi u čvrsti rastvor. Ako se zatim ovaj

čvrsti rastvor kali u hladnoj vodi, hlađenje je tako brzo da atomi bakra ne mogu da difunduju, te se dobija metastabilan rastvor na sobnoj temperaturi. Ako se ovaj čvrsti rastvor žari na umerenoj temperaturi, npr., na 100°C, on počinje da se menja, atomi bakra počinju da se okupljaju pomoću spore difuzije u nakupine koje su istovremeno otkrili Ginije (Guinier) i Preston (Preston), te se nazivaju *Ginije-Prestonovim zonama* ili *GP zonama*. One izazivaju veliko otvrdnjavanje legure. Ova promena može u nekim legurama da se odvija na sobnoj temperaturi: zato se naziva *starenjem*. Kada se žarenje produži nakupine se talože u čestice intermetalnog jedinjenja Al_2Cu, koje imaju određenu orijentaciju u odnosu na kristalnu rešetku aluminijuma. Ova pojava se koristi pri izradi mnogobrojnih predmeta, npr., zakivaka. Neposredno posle kaljenja zakivci od duraluminijuma su duktilni i mogu se lako ukivati pneumatičkim čekićem. Zatim podležu procesu starenja i njihova mehanička otpornost znatno poraste. Da bi se posle kaljenja sačuvala duktilnost, mogu se držati u ledu: na toj temperaturi starenje se ne događa.

Sl. 66. prikazuje čestice taloga u leguri aluminijum-srebro, kaljenoj i otpuštenoj 30 min na 280°C. Vide se usmerene pločice taloga faze Ag_2Al.

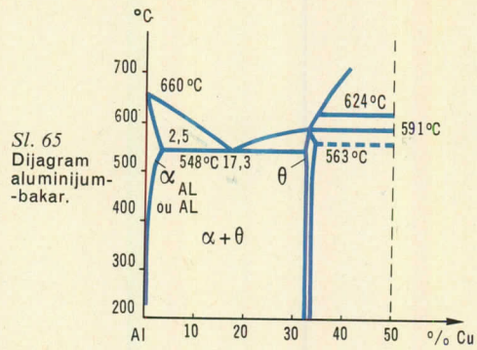
KALJENJE I OTPUŠTANJE

KRIVA T.T.T. Ako se čelična epruveta drži u području austenita (kaže se da ona podleže austenizaciji) i ako se naglo unese u sredinu niže temperature od temperature transformacije austenita u permit prema dijagramu stanja, nastaje transformacija. Ali to se ne događa odmah. Postoji inkubacioni period, a kada on počne, ne završava se trenutno. Dakle na svakoj temperaturi postoji vreme početka i kraja transformacije. Dobijeni dijagram (*sl.* 67) naziva se »kriva V.T.T.« (vreme, temperatura, transformacija). Ako se ohladi na temperaturu koja je niža od veličine naznačene sa Ms (od engleskog *martensite start* — početak, pojava martenzita), reakcija potpuno menja svoj karakter. Trenutno nastaje izvesna količina jedne nove, vrlo tvrde faze, koja se naziva *martenzit*. Ova količina je jednoznačno funkcija temperature, a ne vremena, i dostiže 100 % kad se ohladi ispod temperature, nazvane Mf. Dijagram T.T.T. daje korisne podatke o temperaturama koje treba primeniti na termičku obradu. Pošto u stvarnosti, u industriji, nije moguće trenutno hlađenje velikih predmeta iz austenitnog područja, načinjeni su slični dijagrami koji se nazivaju *dijagramima kontinuiranog hladenja* (ili KH-dijagrami), koji zavise od brzine hlađenja.

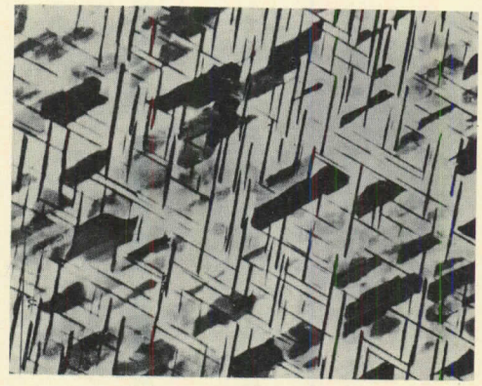
KALJENJE. Ova operacija termičke obrade sastoji se u brzom hlađenju metalurškog proizvoda da bi se na sobnoj temperaturi održala struktura koja je stabilna na visokoj temperaturi ili struktura koja iz nje nastaje.

Princip. Da bi se metal (ili legura) podvrgao obradi kaljenjem, potrebno je da se podizanjem temperature promeni njegova struktura u smislu promene prirode ili srazmere njegovih metalografskih komponenti. Zato metal treba da se zagreje iznad temperature ili tačke koja odgovara toj strukturnoj promeni. Kad se željena temperatura dostigne u svim tačkama komada koji se obrađuje, kaljenje se obavlja naglim hlađenjem u pogodnoj sredini. Na taj način se na sobnoj temperaturi zadrži struktura koja je stabilna jedino na visokoj temperaturi, te se zbog toga javljaju različite osobine. U drugim slučajevima nije moguće, ma kako hlađenje bilo brzo, da se na sobnoj temperaturi zadrži visokotemperaturna struktura, nego se dobijaju intermedijarne strukture, kao kod čelika. Najčešće se zahteva da se kaljenjem promeni tvrdoća; dok ono dovodi do značajnog povećanja tvrdoće čelika, pokazuje se da su tvrdoće nekih bakarnih i nekih lakih legura manje u kaljenom nego u žarenom stanju.

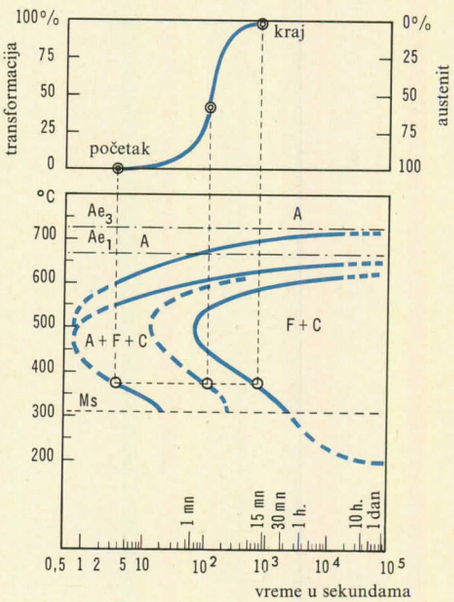
Činioci kaljenja. Najvažniji su:



Sl. 65 Dijagram aluminijum-bakar.



Sl. 66



A = austenit F = ferit C = ugljenik

Sl. 67

• *Temperatura kaljenja,* maksimalna temperatura na koju se dovodi predmet, koja je oko 50°C viša od temperature transformacije legure.

• *Brzina hladenja,* koja zavisi od temperature sredine u kojoj se vrši kaljenje (topla voda, voda na sobnoj temperaturi ili slana voda sa ledom) i od njene prirode. Najčešće sredine ili *kupatila za kaljenje* su: voda, ulje, petrolej, slana kupatila, stopljeno olovo, miran vazduh ili struja vazduha. Sredina za kaljenje vrši hlađenje, koje je utoliko energičnije, ukoliko ima veću toplotnu provodljivost, dovoljnu zapreminu i ako se neprekidno meša.

• *Hemijski sastav* legure koja se kali, koji utiče na kritičnu brzinu kaljenja i omogućuje da se dobiju sastojci koji imaju najbolje mehaničke osobine zahvaljujući kaljenju umerene brzine. Legirajući dodaci u čelicima isto tako poboljšavaju *prokaljivost,* što je naročito važno za predmete velikih dimenzija, jer ujednačuju dejstvo kaljenja po dubini, čime se dobija ujednačena struktura na površini i u jezgru. U tom pogledu posebno su delotvorni nikl, hrom, mangan ili molibden.

Postupci kaljenja. Zavisno od načina zagrevanja, položaja i načina hlađenja razlikuje se:

• *Obično kaljenje,* po kome se predmet prethodno zagreje u peći sa loncem, koja se greje električno ili na gas, sa ili bez zaštitne atmosfere, i zatim brzo unese u sud za kaljenje i neprekidno pokreće za vreme hlađenja.

• *Izotermalno kaljenje* naziva se i *stepenastim* ili *kaljenjem s prekidom* a primenjuje se na čelik tako što se predmet prvo dovede na njegovu normalnu temperaturu kaljenja, pa se zatim ohladi u kupatilu čija je temperatura između 200 i 700°C i tu drži određeno vreme (od jednog minuta do više časova, zavisno od temperature i sastava). Zatim se predmet podvrgava konačnom hlađenju u vodi ili na vazduhu. Ova izotermalna obrada primenjuje se zato da bi predmet dobio strukturu koja se odlikuje boljim mehaničkim osobinama nego strukture koje se postižu običnim kaljenjem (povećanje tvrdoće i smanjenje krtosti); osim toga, kaljenje sa prekidom smanjuje greške kaljenja usled unutrašnjih napona, prskotine, deformacije.

• *Kaljenje zagrevanjem pomoću plamenika,* koje je ograničeno na jedan deo predmeta koji se obrađuje, tako da se samo taj deo zagreva plamenikom i zatim naglo hladi mlazom vode; na taj način se kale zupci zupčanika, vođice na osovinama, klizne površine mašina alatljika.

• *Kaljenje sa indukcionim grejanjem* ili *površinsko kaljenje* primenjuje se za male predmete, uglavnom okruglog profila. Predmet se unosi u indukcioni kalem kroz koji prolazi struja visoke učestanosti, koja zagreva njegove površinske slojeve. Kad se dostigne željena temperatura, struja se isključi i predmet podvrgne kaljenju mlazevima vode iz otvora postavljenih duž kalema ili potapanjem u sud ispod kalema.

OTPUŠTANJE je termička obrada koja se sastoji u ravnomernom zagrevanju, ispod temperature transformacije, metalnog predmeta koji je prethodno bio podvrgnut kaljenju, i u njegovom naknadnom hlađenju umerenom brzinom. Cilj ovog postupka je da se razori stanje lažne ravnoteže usled kaljenja. S jedne strane, uklanjaju se unutrašnji naponi usled kaljenja, a s druge strane ublažavaju se i poboljšavaju neke osobine kaljenog proizvoda. Posle kaljenja čelik postaje tvrd i izuzetno krt. Pogodnim izborom temperature, koja je obično između 300 i 700°C, kao i vremena otpuštanja, uspeva se da se tako povežu različite karakteristike, koje čeliku daju optimalne osobine u primeni. Na taj način se smanjuje tvrdoća, zatezna čvrstoća i granica elastičnosti, ali se povećava žilavost.

Termička obrada otpuštanjem primenjuje se obično na sve kaljene legure, da bi se dobile optimalne karakteristike, npr., legure bakra i aluminijuma, bakra i berilijuma, lake legure tipa duraluminijuma. U slučaju legure duraluminijum, suprotno čelicima, kaljeno stanje odgovara relativno maloj tvrdoći, tako da se pri otpuštanju dešava taloženje sastojaka koji povećavaju tvrdoću legure. Da bi se obavilo otpuštanje, zavisno od željenih temperatura, predmeti se uranjuju u uljno kupatilo, u kupatilo rastopljenih soli, u kupatilo rastopljenog metala (olovo) ili se stavljaju u peć za termičku obradu — u slučaju najviših temperatura.

Termohemijska obrada

Termohemijska obrada je postupak združenog dejstva grejanja, hlađenja i promene hemijskog sastava radi izmene strukture, pa i osobina metala. Ona uglavnom utiče na površinu predmeta koji se obrađuju i ima veliki značaj, jer omogućuje da se dobije vrlo tvrdi površinski sloj, otporan na habanje, sa duktilnim jezgrom, koristeći pri svemu tome jeftin čelik.

CEMENTACIJA

Princip. Cementacija se sastoji u zagrevanju metalnog predmeta u dodiru sa jednim materijalom, koji se naziva cement. Njena je svrha da se tom predmetu daju posebna svojstva bilo difuzijom jednog ili više elemenata iz cementa u celoj masi tog predmeta *(cementacija u jezgru)*, bilo difuzijom ograničenom na površinske slojeve, pri čemu se dobija proizvod različitih osobina na površini i u jezgru *(površinska cementacija)*. Najčešće se obavlja površinska cementacija čelika ugljenikom, da bi se otvrdnula površina raznih mehaničkih delova: zupčanika, osovina, vođica, vretena itd. Ona se industrijski obavlja na mekim čelicima da bi se dobila legura koja je meka i žilava u jezgru, dok je cementirana površina obogaćena ugljenikom, te je zato tvrda i otporna na habanje. To se postiže zagrevanjem mekog čelika na oko 900°C u prisustvu cementa. Na toj temperaturi austenit posebno dobro rastvara ugljenik te se površina predmeta obogaćuje ugljenikom dok se, posle više časova, ne dostigne sadržaj od 0,8 % ugljenika. Zatim se vrši kaljenje, čime se na površini dobija vrlo tvrda struktura martenzita.

Način rada. Zavisno od prirode cementa postoji više vrsta cementacije.

Čvrsta cementacija, čija je industrijska primena u opadanju, vrši se tako što se predmeti koje treba obraditi dovedu u dodir sa cementom u čvrstom stanju na bazi ugljenika koji se nalazi u hermetičkom sudu, koji se stavlja u peć. Na ovaj način se dobijaju velike cementirane debljine do 3 mm, pri zagrevanju na 850°C za dvadeset pet časova, ali se predmeti zatim moraju ponovo zagrevati radi prostog ili dvostepenog kaljenja.

U *tečnoj cementaciji,* ili cijanizaciji, kao cement se koriste rastopljene soli na bazi alkalnih cijanida; pošto se obavlja brže nego čvrsta cementacija, ona se upotrebljava za male predmete kojima su potrebne male debljine cementacije (najviše 0,3 mm).

Gasna cementacija, za koju je potreban gas za naugljenisavanje (ugljen-monoksid, ugljovodonici), pogodna je posebno za velike serije (automobilska industrija); predmeti se zagrevaju u jednoj peći pri neprekidnom ili pri prekidnom prolazu, u atmosferi svetlećeg ili nekog drugog pogodnog gasa.

Elektrolitička cementacija omogućuje da se cementiraju predmeti pri katodnom naponu u kupatilu rastopljenih soli na oko 950°C (smeša alkalnih ili zemno-alkalnih karbonata).

Ako nije potrebno da se svi delovi predmeta cementiraju, onda se radi zaštite vrši elektrolitičko prevlačenje odgovarajućih delova (bakar) ili njihovo bojenje naročito bojama.

KARBONITRIRANJE

Ova termohemijska obrada predstavlja usavršeni postupak cementacije ugljenikom i sastoji se u unošenju u materijal pomoću difuzije ne samo ugljenika već i azota koji ima isto dejstvo. Ova obrada omogućuje površinsko otvrdnjavanje mekog čelika, ali njena prednost u poređenju sa klasičnim postupkom posebno se ogleda u načinu rada: obrada na nižim temperaturama, brža difuzija ugljenika u prisustvu azota, lakša naknadna termička obrada, manji stepen deformacija, korišćenje običnih čelika. Ova gasna cementacija vrši se između 700 i 850°C u atmosferi ugljen-monoksida, ugljovodonika i amonijaka, koji se obično dobija »krakovanjem« gradskog gasa kome se dodaje propan i amonijak u srazmeri. Upotrebljavaju ga i druga organska jedinjenja koja sadrže ugljenik i azot. Karbonitridni sloj, koji može da dostigne 0,8 mm dubine, sadrži posle termičke obrade azotni martenzit, koji je nešto tvrđi od sastojka koji se dobija običnom cementacijom.

NITRIRANJE

Princip nitriranja ili termohemijske obrade površinskog otvrdnjavanja železnih legura pomoću azota je različit. Azot, koji se unosi u površinski sloj hemijskom reakcijom, difunduje u ferit. Otvrdnjavanje nastaje već u toku cementacije.

Pošto je predmet prethodno bio podvrgnut kaljenju i otpuštanju na 550°C, da bi njegovo jezgro dobilo željene osobine, on se stavi u sud od vatrostalnog čelika u atmosferi amonijaka i zagreva električno na 500 do 525°C; na toj temperaturi i u dodiru sa železnim predmetima amonijak se razlaže na azot i vodonik, pri čemu azot u nascentnom stanju difunduje u železo. Zavisno od potrebne debljine nitriranog sloja i od prirode čelika, vreme nitriranja kreće se od sedamdeset časova za sloj od 0,3 do 0,4 mm do sto dvadeset časova za 0,8 mm. Ponekad se površina podvrgava završnoj obradi brušenjem ili poliranjem vodeći računa da se ne ukloni tvrdi sloj. Sve legure železa, naročito obični čelici, mogu se nitrirati. Nitriranje je isto tako praktično za gvožđa i za specijalne čelike sa velikim sadržajem nikla i hroma. Njegovo preimućstvo u odnosu na druge postupke cementacije ogleda se naročito u velikoj površinskoj tvrdoći, u gotovo nikakvim ili vrlo malim deformacijama zbog obrade na relativno niskim temperaturama, i u otpornosti prema zamoru i koroziji nitriranog sloja, pri čemu ova otpornost ostaje i pri korišćenju na višim temperaturama.

INHROMIRANJE ILI TERMIČKO HROMIRANJE

Ovaj postupak cementacije pomoću hroma daje legurama železa, naročito čelicima, površinske osobine velike otpornosti (otpornost na habanje, na koroziju, kako na sobnoj, tako i na visokim temperaturama u oksidacionoj atmosferi). Postoje različiti postupci koji se razlikuju prema temperaturi cementacije (koja se kreće između 900 i 1 100°C) prema vrsti cementa, koji je mešavina prahova hroma, ferohroma i halogenida (fluoridi, hloridi, jodidi amonijaka).

Zavisno od prirode čelika koji se obrađuje, može se obaviti ili duboko hromiranje (od nekoliko desetih do 1 mm) ili tvrdo hromiranje (tvrdoća oko 1 500 Vikersa). Pošto ugljenik pruža otpor difuziji hroma obrazovanjem karbida hroma, čelici sa većim sadržajem ugljenika ne mogu se hromatizirati do veće dubine. Ovaj postupak, koji je sada u punom industrijskom razvoju, primenjuje se za avionske delove (lopatice, komore za sagorevanje), delove peći, alate, cevi, sinterovane predmete od železa, limove itd.

KALORIZIRANJE ILI ALUMINIZIRANJE

Ovaj postupak cementacije sastoji se u uvođenju aluminijuma pomoću difuzije u površinu legure železa, čime ona stiče vanredno veliku otpornost prema oksidaciji na visokoj temperaturi (850°C).

Kaloriziranje se izvodi zagrevanjem predmeta od mekog čelika u dodiru sa čvrstim cementom koji se sastoji od smeše prahova feroaluminijuma ili aluminijuma, aluminijum oksida i amonijum-hlorida. Na oko 900°C događa se površinska difuzija aluminijuma u železu, uz obrazovanje čvrstog rastvora i određenog jedinjenja bogatog aluminijumom do dubine koja može dostići 1 mm. Pošto ugljenik otežava difuziju aluminijuma, kaloriziranje se teško ostvaruje sa tvrdim čelicima, a naročito sa gvožđem, dok se sa mekim čelikom ostvaruje lako.

ŠERARDIZIRANJE

Ovaj metod zaštite čelika cinkom termičkim postupkom difuzije obavlja se dovođenjem predmeta koje treba zaštititi u dodir sa finim prahom cinka i smešom inertnih i redukcionih materijala, da bi se stvorila neoksidirajuća atmosfera, i grejanjem na temperaturi između 330 i 400°C. Tako dobijena zaštita protiv običnih korozija bolja je od one koju obezbeđuje galvanizacija, naročito na povišenim temperaturama; ona se naročito primenjuje za zavrtnje i zakivke.

Primedba. Isto je tako moguće uvođenje difuzijom u površinu železnih legura drugih metala kao berilijuma, cirkonijuma, volframa itd., da bi se dobile posebne mehaničke osobine ili da bi se te legure zaštitile od korozije. Isto se tako mogu cementirati bakarne legure cinkom, kadmijumom ili volframom.

Metalne prevlake

Prevlačenje metalnih površina služi za zaštite površine od promena usled korozije ili bilo kakvog hemijskog nagrizanja, zatim, da bi se površini predmeta dao neki poseban izgled ili da bi se dobila površina koja ima određene osobine, kao što su visoka električna provodljivost ili izolacija, podmazujuće osobine sa niskim koeficijentom trenja, velika tvrdoća itd. Zavisno od cilja, prevlake imaju vrlo različite karakteristike (debljina, poroznost, sjaj itd.). Bilo koji postupak da je u pitanju, površina se mora brižljivo pripremati da bi naneseni sloj prianjao za osnovni metal. Svaki postupak ima posebnu pripremu, ali ona najčešće sadrži odmašćivanje, čišćenje, ispiranje i sušenje. Prevlake mogu biti od vrlo različitih metala, a postupci koji se primenjuju za prevlačenje su mnogobrojni.

ELEKTROLITIČKO TALOŽENJE

Galvanoplastikom se taloži većina metala i nekih legura na predmete koji sačinjavaju katodu u elektrolitičkom kupatilu, sa rastvornim ili nerastvornim anodama; postoji velika raznolikost elektrolitičkih kupatila koja daju različite kvalitete taloga: sjajne, matirane, porozne, kristalne. Mnogobrojni činioci, kao što su prethodna priprema površine odmašćivanjem, gustina struje elektrolize, napon između elektroda, vreme uranjanja predmeta, priroda, položaj i oblik anoda, koncentracija, temperatura i mešanje kupatila itd., utiču na određen način: debljina i tvrdoća prevlake, čvrstina njene

veze sa podlogom itd. Na ovaj način se danas obavlja niklovanje, hromiranje, bakarisanje, kalaisanje, prevlačenje olovom. Uobičajene debljine prevlaka su manje od 10 mikrona kada su namenjene za zaštitu površine.

HEMIJSKO TALOŽENJE

Predmet koji treba obložiti nalazi se u dodiru sa gasovitim ili tečnim jedinjenjem metala za oblaganje. Taj metal se taloži usled hemijske reakcije koja je prouzrokovana zagrevanjem predmeta. Metal se iz gasovitog jedinjenja taloži usled disocijacije (karbonil nikla) ili usled redukcije (titan-bromid). Iz tečnih jedinjenja metal se taloži procesom oksidoredukcije (niklovanje po postupku Kanigen; pozlaćivanje, posrebrivanje, niklovanje i kalaisanje kalenjem).

PREVLAČENJE STAPANJEM

Metal za oblaganje nanosi se u stopljenom stanju. Usled toga on vrlo dobro prianja, jer bolje difunduje u osnovni metal. U praksi, prevlačenja stapanjem obavljaju se na više načina.

PREVLAČENJE URANJANJEM. Oblaganje uranjanjem u tečni metal koristi se za kalaisanje, pocinkovanje ili galvaniziranje limova (beli lim). Pošto se brižljivo očisti i odmasti, predmet koji treba obložiti uranja se u kupatilo stopljenog metala ili legure u prisustvu pogodnih zaštitnih topitelja. Pri proizvodnji velikih količina belog lima koji služi za izradu kutija za konzerve, kalaisanje ili galvaniziranje se obavlja na velikim uređajima koji obrađuju lim neprekidnom operacijom.

OBLAGANJE LIVENJEM. Obloga se može nanositi direktnim livenjem. Jedan antifrikcioni metal može se postaviti u bronzano ležište centrifugalnim livenjem. Metal za oblaganje može se, isto tako, direktno stopiti u luku ili plamenikom na predmetu koji se oblaže. Na ovaj način se može naneti sloj metala koji ima posebne osobine ili čak ponovo naneti na istrošene predmete.

OBLAGANJE RASPRAŠIVANJEM. Metal za oblaganje (aluminijum, kadmijum, kalaj, olovo, cink) u obliku žice ili praha prolazi kroz plamen naročitog plamenika. On se stapa i odmah biva usitnjen u fine čestice pomoću gasa pod pritiskom, koji ga nanosi na površinu za oblaganje, gde se metalne čestice međusobno sinteruju.

OBLAGANJE NAPRAŠIVANJEM I STAPANJEM. Predmet se pokrije metalnim prahom, npr., nanošenjem suspenzije praha. Tako naneseni talog se stapa, pri čemu postaje gladak i ujednačen i dobro prianja.

OBLAGANJE SINTEROVANJEM

Sloj praha se nanosi na površinu predmeta, zatim se presuje i sinteruje. Sloj praha se može obrazovati nanošenjem suspenzije ili elektroforezom (kretanje čvrstih čestica u izolatorskoj tečnosti pod dejstvom električnog polja). Presovanje se obavlja u hidrostatičkoj sredini. U slučaju ravnih obloga (oblaganje limova) prah se može presovati valjanjem.

OBLAGANJE METALIZACIJOM U VAKUUMU

Ovaj postupak omogućuje da se nanesu vrlo tanki ravnomerno raspoređeni slojevi. Metal koji se nanosi isparava u blizini predmeta i kondenzuje se na njemu. Ceo sistem je u vakuumu. U nedostatku atmosfere gasoviti metal se ne može hladiti i kondenzovati pre nego što stigne na površinu predmeta. Na svom putu on ne nailazi na materiju prema kojoj bi imao veliki afinitet (kiseonik, vlaga) i s kojom bi gradio jedinjenja. Ova tehnika se primenjuje za delove optičke ili elektronske opreme i štiti metalne ili nemetalne površine (plastični materijali).

OBLAGANJE PLATIRANJEM

List metala stavlja se na predmet koji treba obložiti. Spajanje se postiže hladnim kovanjem (platiranje ili umetanje inkrustacija zlata) ili toplim valjanjem (platiranje običnog čelika nerđajućim čelikom).

Nemetalne prevlake

Sve ove prevlake se koriste radi zaštite površina metalnih predmeta. Glavni postupci su fosfatiziranje i emajliranje.

FOSFATIZIRANJE

Ovaj hemijski postupak zaštite metalnih predmeta sastoji se u obrazovanju postojanih metalnih soli (fosfata) na površini metala koji treba zaštititi delovanjem rastvora na bazi fosforne kiseline. On se poglavito koristi za zaštitu čelika od atmosferske korozije.

PRINCIP. Rastvori za fosfatiziranje najčešće sadrže tri komponente:

— fosfornu kiselinu;

— fosfate dvovalentnih metala (cink, mangan);

— oksidacione soli (nitrati), koje skraćuju vreme operacije.

Pošto se prethodno odmaste, predmeti se urone u ključalo kupatilo za fosfatiziranje. Proces fosfatizacije ima tri faze.

1. Fosforna kiselina nagriza metal i na površini predmeta se obrazuje porozan zaštitni sloj kompleksnog fosfata železa. Vodonik koji se oslobađa na površini predmeta teži da uspori reakciju. Njegovo uklanjanje se pospešuje pokretanjem predmeta i delovanjem oksidacionih soli, koje se zbog toga nazivaju *ubrzivačima*.

2. Sa gubitkom vodonika šmanjuje se i kiselost kupatila. Oslobađanje vodonika se zaustavlja.

3. Metali (cink ili mangan), koji su prisutni u kupatilu, istiskuju železo iz fosfata i talože se na površini predmeta.

Sastav kupatila se održava postupnim dodavanjem fosforne kiseline i fosfata cinka ili mangana, kao i taloženjem obrazovanog ferofosfata u obliku ferifosfita. Ovaj postupak vodi obrazovanju jednog kristalnog sloja fosfata, čija je debljina obično reda 50 mikrona. To je prava fosfatizacija. Posle obilnog ispiranja i sušenja predmeti se uranjaju u toplo ulje, koje natopi površinske pore.

Ali postoji jedna varijanta koja se sastoji u obrazovanju mnogo tanjeg sloja (manje od 1 mikrona) amorfnih fosfata železa, npr., posredstvom jednog alkalnog rastvora fosfata. To je *pasiviranje*. Ponekad pasivirajući rastvori sadrže sredstva za odmašćivanje. Na taj način se može samo jednom operacijom obaviti priprema površine i hemijska obrada.

PRIMENA. Amorfni i vrlo tanki pasivirajući filmovi vrlo dobro prianjaju i mogu se deformisati u velikom stepenu. Oni obrazuju izvrsnu osnovu za prianjanje pri bojenju, lakiranju i emajliranju predmeta. Kristalno fosfatiziranje predstavlja izvanrednu završnu obradu predmeta koji su izloženi koroziji. Osim toga, ono olakšava deformaciju metala dubokim izvlačenjem, pri izvlačenju šipki i žica uz manje abanje alata. Najzad, ulje ima osobinu da prodire u porozni sloj kristalnog fosfata. Ova osobenost ima tri vrlo važne primene.

• *Uskladištenje.* Fosfatizirani i nauljeni predmeti sačuvaju ovaj dvostruki zaštitni sloj, dok nauljeni predmeti koji nisu fosfatizirani brzo korodiraju po svim delovima gde je ulje skinuto usled trenja i udara.

• *Oblikovanje plastičnom deformacijom.* Kada se nefosfatizirani metal deformiše u hladnom stanju pritisak alata isteruje podmazujuće sredstvo na mestima gde se javljaju veliki naponi. Zbog toga trenje izaziva zagrevanje koje onemogućuje rad pri velikim brzinama i skraćuje radni vek alata. Nasuprot tome sloj fosfata zbog sopstvenih osobina, kao i zbog sposobnosti da zadržava mazivo, potpuno sprečava direktno trenje alata o metal i omogućuje na taj način visok ritam proizvodnje i visok stepen deformacije predmeta.

• *Obrada pokretnih mehaničkih delova.* Neprekidan sloj ulja između delova koji se kreću obezbeđuje dobar rad i trajnost (ili sprečava abanje) mehaničkog sklopa. Kristalna fosfatna obloga obezbeđuje ovu neprekidnost sloja ulja od trenutka završetka izrade tih delova, koji zato mogu pravo sa skladišta da se ugrade u sklop i odmah koriste u odličnim uslovima zaštite i podmazivanja. Isto tako se vrši fosfatizacija legura aluminijuma i cinka, ali u ne tako velikom obimu, u alkalnim fosfatnim kupatilima uz dodatak oksidacionih sredstava tipa hromata.

EMAJLIRANJE

Cilj je ove operacije da se na metal nanese mineralna prevlaka ili emajl, koji se na visokoj temperaturi prevede u staklasto stanje.

EMAJL. Svi emajli se pripremaju na isti način. Njihove osobine zavise od njihovog sastava.

Sastav. Glavna komponenta emajla je silicijum-dioksid, koji se koristi u čistom stanju (pesak iz Fontenbloa) ili u obliku aluminijum-silikata (glina, kaolin). Silicijum-dioksid je vatrostalni sastavni deo emajla. Da bi se tačka topljenja emajla snizila ispod metala koji se oblaže, treba da se dodaju topitelji (boraks, natrijum-karbonat, kalijum-karbonat). Najzad, razni drugi dodaci omogućuju da se utiče na izvesne osobine emajla, kao što su boja, neprozirnost, prianjanje.

Osobine. Emajli imaju vrlo veliku čvrstoću na pritisak (100 kg/mm²), ali vrlo malu zateznu čvrstoću (5 kg/mm²). Zbog toga je neophodno da koeficijent širenja emajla bude manji od metalne podloge. Ako to nije slučaj, onda emajl prilikom hlađenja podnosi zatezna naprezanja i puca. Dobrim izborom srazmere sastavnih delova topitelja i dodataka omogućuje se podešavanje koeficijenta širenja emajla prema metalnoj podlozi.

Ponekad se posebno zahteva otpornost prema hemikalijama. To se postiže čvrstim emajlima, sa velikom sadržinom silicijum-dioksida.

Otpornost na udar i termičko cikliranje običnih emajla zadovoljava. U nekim izuzetnim slučajevima ona se može poboljšati dodatkom oksida aluminijuma i oksida hroma.

Priprema. Sastavni delovi u izabranoj srazmeri melju se i mešaju u uređaju sa Arhimedovim pužem. Dobijeni sprašeni proizvod se stapa u topilišnim ili rotacionim pećima koje se zagrevaju gasom ili mazutom. Različite reakcije između sastavnih delova, koje se događaju u tečnom stanju na oko 1300°C,

daju emajlu konačni hemijski sastav. On se u stopljenom stanju sipa u tekuću vodu, gde očvršćava u obliku sitnih zrna. Zrna se melju nasuvo ili u tečnoj sredini, zavisno od predviđene upotrebe. Emajli se nalaze u trgovini u obliku sitnih zrna i u obliku prahova mlevenih nasuvo.

OPERACIJA EMAJLIRANJA. Površina koja treba da primi emajl mora se prethodno pripremiti na poseban način, zatim se na nju nanese emajl i podvrgne dejstvu temperature.

Priprema metalne površine. Masnoća svake vrste koja šteti prianjanju emajla mora se ukloniti bilo rastvaranjem (trihlor-etilen), bilo saponifikacijom i emulgovanjem (soda). Oksidi se uklanjaju hemijskim čišćenjem u sonoj ili sumpornoj kiselini. Zatim se predmeti ispiraju i suše u toplom vazduhu.

Nanošenje emajla na metal. Emajl se nanosi »u prahu« ili »u tečnom stanju«.

Postupak »u prahu«. Emajl se posipa pomoću sita po predmetu koji se prethodno zagreje na pogodnu temperaturu (850°C) u komornoj peći, te se stapa u dodiru s njim. Predmet se ponovo stavlja u peć za kratko vreme, gde se dobija konačno stanje njegove površine (dobijanje sjaja). U izvesnim slučajevima (majolika) vrše se dva uzastopna nanošenja. Ukupna debljina može da dostigne 1 mm. Postupak »u prahu« se naročito primenjuje za emajliranje gvožđa.

Postupak »u tečnom stanju«. Polazna materija je žitka kaša, fina vodena suspenzija mlevenih zrna emajla pomešanih sa nekim materijama koje obezbeđuju postojanost suspenzije. Emajl se nanosi uranjanjem predmeta u suspenziju ili raspršivanjem te suspenzije pomoću pištolja. Zatim se sadržana voda ukloni sušenjem u toplom vazduhu ili toplotnim zračenjem. Emajl koji je nanesen u tečnom stanju posle sušenja dobija ime *biskvit*. On se peče u oksidacionoj atmosferi na tačno određenoj temperaturi u komornim ili u kontinuiranim »tunelskim« pećima.

Postupak »u tečnom stanju« najčešće uključuje dva nanošenja: prvi sloj osnovnog emajla na bazi oksida nikla i oksida kobalta obezbeđuje prianjanje emajla na metal; drugi sloj, emajl za pokrivanje, koji se nanosi posle sušenja i pečenja prvog sloja, daje predmetu željeni spoljni izgled. Ovaj postupak se naročito primenjuje za emajliranje limova, ali i za emajliranje gvozdenih predmeta.

PRIMENA EMAJLIRANJA. Emajli su najpre služili za izradu umetničkih predmeta, čija je osnova najčešće zlato, srebro, bakar; čak se i danas ti dosta primitivni postupci primenjuju za relativno velike serije (nakit, značke).

Emajliranje livenog gvožđa i lima obavlja se radi zaštite i dekoracije, u izradi mnogobrojnih uređaja za domaćinstvo (posuđe), elektrouređaja (frižideri), sanitarnih uređaja (kade, umivaonici). Emajl služi za unutrašnje oblaganje mnogobrojnih uređaja u hemijskoj industriji. Najzad, u najnovije vreme omogućeno je prevlačenje aluminijuma emajlima niske tačke topljenja i velikog koeficijenta dilatacije.

Preveo Đorđe Lazarević

OBRADA METALA REZANJEM

UVOD

ISTORIJAT. Glavno mesto u ekonomici velikih svetskih sila zauzima elektromašinska industrija. To se naročito odnosi na Francusku, u kojoj se ova oblast nalazi na prvom mestu, a tek daleko iza nje dolaze tekstilna i hemijska industrija. Dohodak ove industrijske grane 1965. godine iznosio je više od 45 milijardi franaka, dok je bruto-proizvod dostizao do 125 milijardi franaka. To je više od jedne petine ukupne francuske proizvodnje, uključujući i poljoprivredu, građevinarstvo, javne radove i elektroprivredu.

Ova nadmoćnost elektromašinske industrije karakteriše već nekoliko decenija ekonomiku razvijenih zemalja, za razliku od tzv. zemalja u razvoju, gde je poljoprivreda, obično, osnovni izvor prihoda.

Arheološka otkrića pokazuju da su se alati i mašine pojavili sa prvim civilizacijama. Sve ljudske skupine koje su se našle na putu ka civilizaciji morale su obezbeđivati sredstva za podmirenje svojih potreba, za odbranu od prirodnih nepogoda i zaštitu proizvedenih dobara i stečene imovine od mogućih neprijatelja. Egipćani su se koristili dolapima; Rimljani su pravili koturače za dizanje stubova za svoje hramove, dok su im vojnici bili naoružani čeličnim mačevima, lukovima i strelama i mehaničkim praćkama.

Međutim, razvitak je bio spor sve do XIX veka, tako da se elektromašinska industrija stvarno javlja kao grana tek sa upotrebom pogonske snage vodene pare, gasa i struje. Od tada je ona prošla kroz tri razvojna perioda koji su sledili jedan za drugim.

Prvi period pripada mašinama čiji su pokreti jednostavni i dostupni posmatranju. Pogonsku snagu celoj radionici daje jedan motor (parna mašina, gasni motor, vodena turbina itd), preko kaišnog prenosa. To je period izvanrednih majstora i radnika koji su u stanju da istovremeno koriste, održavaju i popravljaju svoje mašine. Ovi pioniri nisu nastojali da izmene ustaljene proizvodne postupke; oni su, pre svega, nastojali da rad mišića zamene energijom dobijenom iz prirodnih izvora. Slabo poznavanje metalurgije u to vreme ograničavalo je njihove ambicije, tako da se kao materijal najčešće i dalje koristilo drvo.

Drugi period, u kome dolazi do izražaja povećanje potreba, počinje krajem XIX veka. Za taj period karakteristično je poboljšanje proizvodnih postupaka, usavršavanje mašina i sve češća zamena drveta metalom. Mašine su složenije i postaju *univerzalnije,* tj. sposobne da obavljaju veći broj različitih operacija. Parnu mašinu i gasne motore postepeno zamenjuju električni motori, koji zauzimaju manje prostora i lakše se prilagođavaju radnim uslovima; broj motora koji se koriste u istoj radionici raste, a pokretni delovi (zupčanici, ručice, poluge) zatvaraju se u kućišta pa se više ne vide. Usled rasta potreba naglo se povećava i broj ljudi zaposlenih u fabrikama. Pored inžinjera i majstora pojavljuje se nova kategorija radnika: *kvalifikovani radnik* (KR).

Treći period nastupa posle 1914. godine. To je period specijalizovanih mašina kakve zahteva masovna proizvodnja. Iako veliko ostvarenje, univerzalna mašina ima slabu stranu da zahteva kvalifikovanu radnu snagu, što se sve jače ispoljava kao njen nedostatak i sve više košta. Ovo je, takođe, era velikoserijske proizvodnje (lančana proizvodnja), gde se najvažniji zadaci rukovodilaca preduzeća više ne ogledaju samo u porastu obima proizvodnje, nego i u traženju puta da se snizi proizvodna cena. Da bi se snizili proizvodni troškovi, pribegava se upotrebi specijalizovanih mašina, napravljenih od jednostavnih elemenata koji se mogu izraditi unapred i zamenjivati, zatim, primeni automatskih mašina i transfer-mašina kojima može da rukuje i nekvalifikovana radna snaga: *priučeni radnik* (PR), obučen za nekoliko časova za obavljanje određenog rada na posebnoj mašini. Suprotno mašinama alatkama prvobitne konstrukcije, ove nove mašine obično imaju jedan motor za svaki pokret (električni, hidraulični ili pneumatski motor, ili zavojno vreteno).

Mi još pripadamo ovom periodu, ali se javljaju i tri nova momenta:

— velika raznolikost mašina, koje se sve više prilagođavaju određenoj nameni;

— pojačana težnja ka automatizaciji; pojava automatskih mašina kojima upravljaju elektronski računari sa bušenim karticama i trakama ili magnetnim trakama i diskovima itd.;

— razvoj elektromašinske industrije u pravcu jedne nove strukture, karakteristične po velikom broju preduzeća koja rade kao kooperanti za druge ili takvih čija je osnovna delatnost pozajmljivanje osoblja, mašina ili materijala *(leasing,* engl.).

Sa jedne strane stvaraju se velika udruženja, »industrijske grupe«, koja pokreću i koordiniraju velikoserijsku proizvodnju i obezbeđuju prodaju u celom svetu, a sa druge se pojavljuje mnogo malih proizvodnih jedinica, visokospecijalizovanih za određeni posao, koji se najčešće obavlja za velika udruženja. Industrijske grupe igraju ulogu *investitora* i obično imaju komercijalnu službu i službu za veze sa inostranstvom na svetskom nivou. Glomazna struktura ovih udruženja — kojima najčešće upravlja kolegijum — neizbežno dovodi do visokih opštih troškova koji mahom opterećuju knjigovodstvenu proizvodnu cenu, sa izuzetkom proizvodnje u vrlo velikim serijama. *Preduzeća-kooperanti* imaju najčešće ulogu proizvođača. U njima je administrativno osoblje uvek svedeno na minimum, zbog čega imaju relativno niske troškove čak i pri pojedinačnoj proizvodnji. Struktura im je elastična, a eventualna preorijentacija laka i brza. Možda ih jedino pogađa nedostatak kredita koji bi im obezbedili bržu ekspanziju, budući da se ovakve male organizacije najčešće finansiraju samostalno. Prema tome, izgleda da budućnost pripada krupnim industrijskim grupama, čije su proizvodne jedinice uveliko decentralizovane.

PROBLEMI OBRADE. Kada se zna šta treba uraditi na nekom predmetu, problemi obrade sastoje se, u prvom redu, u izboru mašine na kojoj će se raditi, a zatim u određivanju radnih uslova mašine.

Pri izboru mašine razmatraju se tehnički i ekonomski činioci, kao i zahtevi naručioca.

Sa čisto tehničkog gledišta treba izostaviti sve mašine koje nisu pogodne za izvršenje datog posla s obzirom na dimenzije radnog predmeta, granice otpornosti mašine, radnog predmeta i alata, traženu tačnost itd. Zatim se određuju troškovi postupka obrade na različitim mašinama koje su uzete u obzir, vodeći računa o utrošku vremena, amortizaciji mašine (amortizacija glodalice je skuplja od amortizacije rendisaljke) i o ceni odgovarajućeg alata (nabavna cena, složenost i učestanost oštrenja, itd.). Na kraju, ne uzima se obavezno mašina na kojoj su troškovi obrade najniži. Potrebno je voditi računa o iskorišćenju svih mašina u radionici, jer se može dogoditi da predviđena mašina ne bude slobodna u periodu koji obezbeđuje izradu predmeta u određenom roku. U ovom slučaju može da bude korisno da se upotrebi i mašina na kojoj je obrada nešto skuplja.

Zavisno od primljenih uputstava može se odabrati ili mašina savršenija od one koja je potrebna, znači, sa skupljom amortizacijom, ili neka starija mašina na kojoj će posao teći sporije, ali će zato biti maksimalno iskorišćena pre nego što se zameni modernijom. Ovaj izbor vrše tehničari iz odeljenja tehničke pripreme. Koristeći se grafikonima sa podacima o stepenu iskorišćenja mašina, zatim planom rada i sređenim podacima (najčešće na bušenim karticama), oni na osnovu svoga iskustva donose odgovarajuću odluku. Međutim, retko su ovi izvori podataka dovoljni da se nedvosmisleno odabere mašina s kojom će se prići određenom poslu. Praksa pokazuje da se prilikom izbora ne sme isključiti elemenat ljudskog rasuđivanja osoblja koje radi u odeljenju tehničke pripreme. Naviknuti da se svakodnevno bave ovim problemima, ti ljudi mogu često po osećanju da odrede najbolje radno mesto za izvršenje određenog posla. Takođe je veoma važno da kancelarije odeljenja tehničke pripreme budu smeštene u neposrednoj blizini radionica čije poslove koordiniraju. Tako se obezbeđuje stalni kontakt osoblja ove službe sa rukovodiocima i neposrednim izvršiocima posla u radionicama.

Klasični postupci obrade

OPŠTI POJMOVI

DELOVANJE ALATA. Mašine alatke su mehanički sklopovi za obradu predmeta skidanjem suvišnog materijala uz pomoć alata za rezanje različitih oblika, koji mogu da se zamene. Energiju potrebnu za rad najčešće daju električni motori, a koristi se i hidraulični i pneumatski pogon. Alati montirani na ovim mašinama daju sirovim predmetima, livenim ili kovanim, konačan oblik. Oni skidaju višak materijala, odvajajući strugotinu. Pošto su predviđeni za rezanje i smicanje materijala, aktivni delovi alata obično imaju oblik sekućih ivica, dobijenih na preseku dveju površina: *grudne površine*, po kojoj klizi odvojena strugotina, i *leđne površine*, okrenute obrađivanoj površini predmeta. Mašina primorava alat da prodire u materijal, sprečavajući ga istovremeno da se zarije.

Izgleda da je prvi metalni alat za rezanje metala bio *sekač*, po kome se udara da bi se pomerao po svojoj osi. Posle toga su se pojavili ručni strugarski alati i, konačno, alati koji mogu da se učvrste na oslonce, tzv. nosače alata, i da se na odgovarajućim mašinama koriste za rendisanje, provlačenje, struganje, glodanje, bušenje, razvrtanje, narezivanje, urezivanje itd.

Delovanje sekača. Napadna površina OB *(sl. 1)* ili *grudna površina* potiskuje strugotinu. Druga površina, OA, klizi po predmetu oslanjajući se na njega. Na taj način sekač može da ide napred, a da se ne zarije u dubinu predmeta niti da se od njega odvoji. Delovanje čekića na sekač odgovara sili upravljenoj po osi alata. Ova osa se nalazi u ravni koja preseca na dva dela diedar obrazovan od površina koje oivičavaju sekuću ivicu. Međutim, uzled reakcije kojom se predmet i strugotina suprotstavljaju alatu, sekač se kreće u sopstvenoj ravni OA. U stvari, otpor koji sekač pri kretanju treba da savlada predstavlja rezultantu sledeće četiri sile *(sl. 1)*:

— reakcije strugotine F_1 normalne na grudnu ravan;

— trenja strugotine F_2 u ovoj istoj ravni;

— otpora prodiranja F_3 koji deluje na ravan oslonca sekača;

— otpora prodiranja (trenja) F_4 između ravni oslonca sekača i radnog predmeta.

Rezultanta R svih ovih sila je u ravnoteži sa dejstvom čekića. Pošto su koeficijenti trenja približno isti na dvema ravnima sekača, kao i sile trenja, i komponente sile rezanja F_1 i F_3 u ovim ravnima su praktično jednake. Sekač se prilagođava uglu između predmeta i strugotine. Izgled obrađene površine potvrđuje ovo gledište. Površina predmeta obrađivanog sekačem trpi veliki pritisak, čiji se trag može videti na njenoj ivici.

Delovanje mašinskog alata. Svaki mašinski alat ima *aktivni deo* na završetku *tela alata*.

Shematski alat. Posmatrajmo alat *(sl. 2)* koji je prikazan diedrom AOB, čija je ivica upravna na smer pomeranja alata: nazvaćemo ga *shematskim alatom*. Svaki proizvoljno uzeti (bilo koji) alat može uvek da se predstavi kao jedan iz skupa alata ove vrste.

Kod mašina sa pravolinijskim kretanjem alat se najčešće kreće upravno na svoju osu, brzinom V, pri čemu sa ravne površine predmeta skida materijal debljine *h*.

Aktivna površina OB, ili *grudna površina*, odbija i odvaja strugotinu. Sekuća ivica O, koja se naziva *sečivo*, postavlja površinu radnog predmeta u ravninu O*x*, u kojoj se i sama kreće.

Površina žleba koji nastaje prolaženjem alata naziva se *opisana površina*. Pošto se posle svakog prolaza alat malo pomera u smeru poprečnom na predmet, obrađena površina se samo delimično poklapa sa opisanom površinom. Razlika između opisane i obrađene površine pojavljuje se naročito kod mašina sa obrtnim kretanjem, npr. kod glodalica.

Površina OA alata, koja se naziva *leđna površina*, učestvuje jedino u davanju čvrstoće alatu. Ona je pod takvim nagibom da dodiruje opisanu površinu samo sečivom O; svaki dodir iza sekuće ivice prouzrokovao bi trenje koje bi dovelo do brzog trošenja alata i obrađivanog predmeta usled zagrevanja i prianjanja. Ugao nagiba ove ravni prema obrađenoj površini naziva se *leđni ugao*, $\delta = \widehat{xOA}$. Ravan OB zatvara sa OA *ugao klina*, $\alpha = \widehat{AOB}$. *Napadni ugao*, $\gamma = \widehat{xOB}$, je zbir ugla klina i leđnog ugla. Njegov komplementarni ugao, $\beta = \widehat{yOB}$, naziva se *grudni ugao*. Što je ugao klina oštriji, rezanje je lakše, ali je postojanost alata ovim umanjena. U principu, ugao klina raste sa otporom koji treba savladati (tvrdoća obrađivanog materijala i debljina sloja koji se skida). Međutim, ako se skida vrlo fina strugotina, da bi se izbeglo razdvajanje između materijala i alata usled elastičnosti, potrebno je znatno povećati ugao klina, kao, npr. u slučaju ljuštenja. Ovako mogu da se skidaju vrlo tanki slojevi materijala, pri čemu, u stvari, ivica obavlja celokupan posao.

Proizvoljni alat. Svaki alat ima jednu ili više sekućih ivica čije površine* mogu da budu profilisane. Vrlo često je i sama sekuća ivica profilisana.

Moguće je, međutim, svesti i ovaj slučaj na prethodni, ako se grudna površina, leđna površina i opisana površina zamene po celoj dužini sekuće ivice svojim tangentnim površinama, pošto na malom rastojanju od sečiva alat više ne dodiruje ni strugotinu ni radni predmet, tako da ne postoji uzajamno dejstvo između alata i predmeta. Proizvoljni alat može da se razloži na veliki broj elementarnih shematskih alata, beskonačno tankih i orijentisanih tako da prolaze kroz ravni normalne na sekuću ivicu u svakoj njenoj tački. Sekuće ivice ovakvih elementarnih alata tada predstavljaju tangente na ivicu posmatranog alata.

»U svakoj tački sečiva proizvoljnog alata stvarni grudni i leđni uglovi moraju se kretati u granicama koje zavise od operacije koju treba izvršiti i od metala koji se obrađuje.«

Pored ovog osnovnog pravila, treba uzeti u obzir i sledeće činioce:

1. nagib grudne površine unazad (u odnosu na sečivo) utiče na uvrtanje strugotine i može da ometa njeno odvajanje;

2. oblik sekuće ivice utiče:

— na uvrtanje strugotine, čija središna linija teži da se postavi u ravan upravnu na tangentu sečiva;

— na smer otpora koje trpi alat;

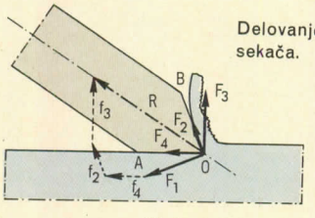
— na raspored duž sečiva materijala koji se odvaja;

3. alat treba da ima oblik koji omogućava laku izradu, oštrenje i postavljanje u radni položaj.

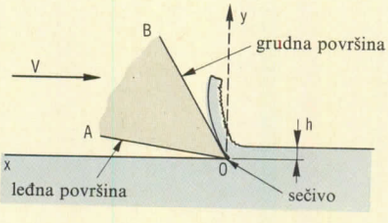
VRSTE ALATA. Oblik alata uglavnom zavisi od obrade za koju je predviđen. Neke vrste alata imaju pravolinijsko sečivo, druge su sa profilisanim sečivom, npr., alat Tejlorovog (Taylor) tipa ili alati za površinsku obradu, koji se koriste na kratkohodnoj rendisaljci. Neki alati imaju dva sečiva koja su uvek u radu; to je slučaj burgija za bušenje. Na kraju, postoje alati sa velikim brojem sečiva koja rade uzastopno; to su glodači.

STVARANJE STRUGOTINE. Posmatrajmo cilindar od polutvrdog čelika koji se obrađuje na strugu pomoću alata sa pravolinijskim sečivom *(sl. 3)*. U blizini sekuće ivice, levo od T_1, materijal

* Misli se na površine u čijem se preseku nalazi sečivo.

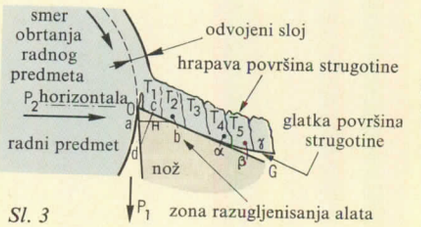


Sl. 1



Delovanje mašinskog alata (shematski alat).

Sl. 2



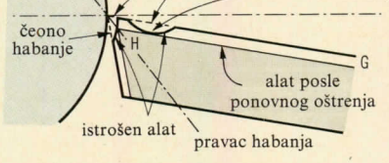
Stvaranje strugotine.

Sl. 3

se odvaja pod dejstvom sekuće površine GH i sile koja potiče od odvojenog dela desno od T_1. Ovaj deo teče pod pritiskom alata, pošto strugotina postaje plastična usled porasta temperature. Ovo tečenje dovodi do osetnog povećanja preseka i deformacija je utoliko veća ukoliko je metal plastičniji a sloj koji se skida deblji. Kada je granica loma dostignuta na dodirnoj površini GH, smicanje počinje kod T_1. kao što se uzastopno događalo kod T_4, T_3, T_2, kada su se ovi preseci nalazili u položaju preseka T_1. Kako se strugotina odvaja, tako se deformacija i smicanje nastavljaju, sve dok presek T_1 ne zauzme položaj T_4, gde naglo dolazi do loma, uz klizanje lamele α I naglo opadanje opterećenja. Tada se prekida dodir lamele α sa alatom i strugotina se uvrće u spiralu, slobodno, usled nagomilavanja lamela α, β, γ, koje su prethodno odsečene i manje-više ponovo povezane. Kada se presek T_1 bude našao u položaju T_2, doći će do novog smicanja, stvoriće se nova lamela itd.

Unutrašnja površina strugotine je glatka zbog ugla nagiba i trenja po grudnoj površini; spoljnja površina je hrapava i njeni glavni grebeni se nalaze na presecima po kojima je došlo do loma. Ako je plastičnost metala slaba (npr. liv ili tvrdi čelik), dolazi do potpunog prekida između lamela α, β, γ...., strugotina je izlomljena. U suprotnom slučaju (meki ili polutvrdi čelik), lamele se samo delimično lome, ostajući povezane usled sabijanja materijala i njegovog zagrevanja, koje može da dostigne i 600°C. Strugotina materijala visoke plastičnosti (olovo, bakar) deformiše se bez lomljenja i odvajanje može da bude u vidu neprekidne trake.

Zagrevanje je posledica trenja na grudnoj površini i pretvaranja u toplotu energije utrošene za deformaciju strugotine. Ovo zagrevanje omekšava i troši sečivo alata stvaranjem udubljenja na površini GH *(sl.* 3. i 4) na rastojanju od sečiva, koje je utoliko veće ukoliko je metal plastičniji i više se odvaja po grudnoj površini; ovo je tzv. kratersko habanje alata *(sl.* 4). Deo alata u blizini H obično ostaje hladniji usled dodira sa radnim predmetom koji se slabo zagreva zbog svoje velike mase i velike površine hlađenja. Ivica H skida grebene koji ostaju posle odvajanja strugotine. Ovi delići materijala se nagomilavaju, spajaju i lepe na kraju noža, stvarajući tvrdu naslagu, čija prava priroda još nije utvrđena. To se naziva stvaranjem naslage na grudnoj površini alata.



Sl. 4. Habanje i ponovno oštrenje strugarskog alata.

Čim se ova naslaga stvori, ona se delimično otkida, kvareći sečivo alata i površinu radnog predmeta *(sl.* 4). Pod ovom naslagom, koja u nekim slučajevima može dostići i debljinu od više milimetara, sečivo ugljeničnog alata se brzo zaobljuje. Naslaga na grudnoj površini alata od ugljeničnog čelika deluje kao nepravilno sečivo; grebeni koje on ostavlja na radnom predmetu nemaju značaja pri gruboj obradi, ali u završnoj obradi njeno stvaranje treba sprečiti obilnim hlađenjem.

Još jedan uzrok habanja sečiva je erozija, do koje dolazi zbog dodira sa telima visoke tvrdoće, kao što je, npr., kora livenih ili kovanih predmeta, plastično deformisani ili kaljeni delovi i sl.; u ovom slučaju, spoljni sloj treba odvojiti zadirući dovoljno u dubinu, tako da do obrade dođe u zdravom delu predmeta.

Na kraju usled naprezanja koje trpi, alat može da se iskrza u pravcu ab ili cd *(sl.* 3), zavisno od toga da li otpor potiče od reakcije P_2 radnog predmeta ili reakcije P_1 strugotine.

MATERIJALI ZA IZRADU ALATA. Zavisno od prirode obrade i od materijala radnog predmeta, koriste se alati od čelika, od tzv. stelita, tvrdih metala, keramike, a ponekad i od dijamanta.

Alati od alatnog čelika. Ranije se najviše koristio ovaj čelik, koji sadrži hrom, mangan i volfram. On ne podleže praktično nikakvom skupljanju i neosetljiv je na napregnutost usled kaljenja, pa je naročito pogodan za izradu alata složenih oblika i krajnje preciznih, koji moraju obavezno da zadrže iste dimenzije i posle kaljenja.

Alati od brzoreznog čelika. Za izradu alata za rezanje koriste se gotovo isključivo *brzorezni čelici* koje su otkrili Tejlor (Taylor) i Vajt (White) početkom ovog stoleća. Ove vrste čelika imaju osobinu da režu i na dosta visokoj temperaturi reda 500°C, što dopušta da se znatno poveća brzina rezanja mašina alatki.

Postoje tri kategorije brzoreznih čelika:

1. *obični brzorezni čelici,* koji sadrže 13 — 16% volframa i 3 — 4% hroma;

2. *kvalitetni brzorezni čelici,* koji sadrže 18 — 22% volframa, 4 — 6% hroma i 0,5 — 1,5% vanadijuma;

3. *ultrabrzi čelici,* koji sadrže 20 — 25% volframa i 5 — 15% vanadijuma.

Hrom je elemenat koji čeliku daje tvrdoću; volfram i kobalt povećavaju otpornost metala prema visokim temperaturama i postojanost tvrdoće na toploti, vanadijum poboljšava uslove rezanja, a uz to prečišćava leguru.

Alati od stelita. Dvadeset pet godina posle otkrića brzoreznih čelika, otkriće legura poznatih pod imenom *steliti* ponovo je omogućilo veliki napredak u brzini obrade. Steliti su legure na bazi hroma, kobalta i volframa, dobijene u električnim pećima. One su mnogo tvrđe i postojanije prema visokim temperaturama nego brzorezni čelik, a zadržavaju tvrdoću i na temperaturi na kojoj brzorezni čelici gube sposobnost rezanja. Oblikovanje ovih alata može da se izvede samo na tocilu, polazeći od sirovog proizvoda dobijenog livenjem, a cena im je visoka.

Tvrdi metali. Hemijska kombinacija ugljenika sa izvesnim metalima, npr. volframom, vanadijumom, titanom, tantalom itd., daje jedinjenja čija je tvrdoća gotovo jednaka tvrdoći dijamanta. Međutim, ovi materijali su veoma krti. Da bi mogli da se koriste, moraju se isitniti u prah koji se zatim sinteruje uz dodatak kobalta ili nikla kao vezivnog sredstva. Ovako dobijene pločice su veoma tvrde i postojane prema visokim temperaturama, a manje su krte od stelita; lemljenjem se mogu pričvrstiti za glavu alata, koja je obično od konstruktivnog čelika. Ovi karbidi su poznati pod imenom »vidia« (od nemačkog *wie Diamant,* »kao dijamant«). Oni zadržavaju svoju čvrstoću i izuzetnu otpornost prema habanju i pri povišenim pritiscima, čak i na vrlo visokoj temperaturi, reda veličine 800°C. Sa ovakvim alatima postiže se rekordno vreme proizvodnje zbog korišćenja vrlo velikih brzina rezanja. Pored toga, dobijaju se neuporedivo bolje obrađene površine. Jedini nedostatak ovih alata je velika krtost i slaba otpornost na udare i vibracije. Stoga se mogu koristiti samo kod mašina alatki koje su u odličnom stanju, koje imaju celu skalu visokih brzina rezanja i mogu bez vibracija da izdrže otpore između alata i radnog predmeta.

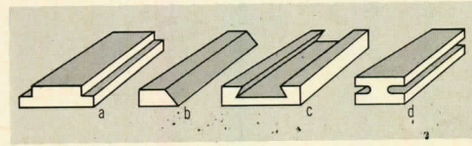
Dijamantski alati. Paralelno sa upotrebom alata od tvrdih metala, alati sa dijamantom su našli važnu primenu u obradi izvesnih metala i plastičnih masa na bazi sintetičkih smola. Zbog svoje velike tvrdoće, dijamantski alati mogu da sačuvaju veoma dugo finoću svoga sečiva. Međutim, jako su krti i njihova upotreba se ne preporučuje kod mašina koje nisu dovoljno krute. Vibracije i tvrda zrna koja se mogu naći u nekim predmetima (npr. livenim u pesku), mogu da slome dijamant. Isto tako, u obradi metala veoma retko se koristi alat sa dijamantskim vrhom; u svakom slučaju neophodno je obilno podmazivanje.

HLAĐENJE I PODMAZIVANJE ALATA ZA REZANJE. Skidanje materijala prati veliko oslobađanje toplote. Ako se toplota ne odvodi, metal se zagreva i struktura mu se menja zavisno od termičkih naprezanja kojima je bio izložen. Ovo zagrevanje dovodi i do prevremenog habanja alata. Gotovo pri svim operacijama obrade alat i radni predmet se neprekidno hlade (vodenim rastvorom saponificiranih proizvoda, mineralnim, biljnim ili životinjskim uljem itd.). Ova tečnost odvodi toplotu koja nastaje pri procesu rezanja i istovremeno podmazuje alat; usled smanjenih sila trenja dolazi do manjeg habanja alata i do smanjenog oslobađanja toplote. Racionalno podmazivanje alata pri radu sa metalima igra značajnu ulogu, i u pogledu veka alata, kao i savršenije obrade. Mlaz treba da dolazi malom brzinom direktno na strugotinu, u trenutku njenog stvaranja. Strugotina se istovremeno hladi i smanjuje joj se kovkost, a i zagrevanje koje potiče od rada utrošenog pri njenom stvaranju. Pri radu na strugu, gde je jedini cilj ove tečnosti hlađenje, može da se koristi voda. Obično joj se dodaju sastojci koji sprečavaju oksidaciju delova mašine u periodima kada je van pogona. Najčešće se koriste više ili manje saponificirana sredstva, poznata kao *uljne emulzije,* a dobijaju se mešanjem ulja sa vodom koja nije krečna, u svim razmerama, što daje tečnost beličaste boje.

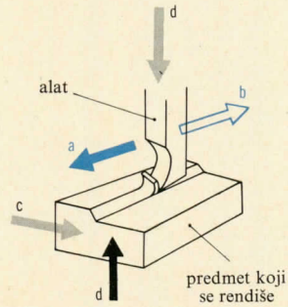
U nekim posebnim slučajevima moraju se za podmazivanje koristiti *nepodmazujuća sredstva,* kao što su benzin, terpentinsko ulje itd. To je slučaj pri skidanju veoma tanke strugotine kod izvesnih metala visoke tvrdoće. Ova sredstva hlade alat, sprečavajući istovremeno sečivo da klizi po metalu i pomažući mu da ga zaseče.

RENDISANJE

PRINCIP. Rendisanje je jedan od osnovnih postupaka obrade metala koji se koristi za izradu ravnih i profilisanih površina *(sl.* 5). Obrađene površine



Sl. 5 — Primeri obrade rendisanjem: *a* i *b*, vođice: *c*, vođice u obliku lastinog repa; *d*, profilisani uložak.



Sl. 6 – Horizontalno rendisanje na kratkohodnoj rendisaljci: *a*, radni hod; *b*, povratni hod; *c*, pomoćno poprečno kretanje radnog predmeta posle svakog radnog hoda; *d*, pomoćno kretanje primicanja radnog predmeta; *d'*, pomoćno kretanje primicanja alata. (Kretanja *a*, *b*, *c* vrše se automatski; *d* i *d'* su kretanja sa ručnim upravljanjem.)

se dobijaju uzastopnim prolazima alata sa jednim sečivom. U toku obrade, u odnosu na radni predmet, alat se kreće horizontalno, pravolinijski, približno istom brzinom (radni hod). Zatim se velikom brzinom vraća u polazni položaj (povratni hod). Između radnog i povratnog hoda predmet se pomera bočno *(sl.* 6) ili vertikalno *(sl.* 7) u odnosu na alat, dok ovaj ponovo kreće napred i počinje sledeći hod. Ako se ovako naizmenično kreće alat, mašina se naziva *kratkohodnom rendisaljkom.* U obrnutom slučaju, kada se radni predmet kreće tamo-amo, mašina se naziva *dugohodnom rendisaljkom.* Ove dve mašine vrše istu vrstu rada, ali im je konstrukcija različita.

KRATKOHODNA RENDISALJKA. Kratkohodna rendisaljka je gotovo uvek mala mašina i njen hod retko prelazi 800 mm; ovo ograničava dužinu predmeta koje ona može da obrađuje.

Opis. Kratkohodna rendisaljka sastoji se *(sl.* 8) od jednog teškog i krutog *tela mašine* na koje se oslanja *pokretno rame mašine sa nosačem alata,* zatim od *stola* koji prihvata radni predmet i *pogonskog mehanizma.* Pokretno rame, spojeno s telom mašine posredstvom horizontalnih vođica, kreće se tamo-amo pomoću mehanizma krivaje sa klatnom Vitvortovog (Whitworth) tipa, za čiji pogon služi električni motor. Ekscentričnost ovog sistema može se podešavati. Za svaki predmet koji se obrađuje ona se tako odabira da ukupan hod mašine bude samo nešto duži od dužine obrađivanog predmeta. Brzina rezanja može da ide do 100 m/min; ova vrednost se preporučuje pri upotrebi karbidnih alata. Srednja brzina povratnog hoda kreće se od 150 do 200 m/min. Alat je učvršćen na prednjem delu ovog pokretnog ramena pomoću glave koja može da se usmerava i podešava.

Prednji deo tela mašine ima vertikalne vođice po kojima se pomera jedan intermedijarni deo između tela mašine i stola, tzv. *klizni sklop stola.* Dva sistema vođica ovog sklopa pod pravim uglom omogućavaju horizontalno i vertikalno pomeranje stola. Ova kretanja se dobijaju automatski, pomoću dva sklopa zavojnog vretena sa navrtkom, preko posebnog zupčastog mehanizma koji se pokreće pomoću sistema krivaje sa klatnom. Sistem sa zaporom omogućava da se odabere željeno kretanje (horizontalno ili vertikalno). Sinhronizacija pokreta mašine postiže se pokretanjem krivaje pomoću osovine Vitvortovog klatna. Do bočnog kretanja predmeta u odnosu na alat dolazi odmah posle povratnog hoda alata.

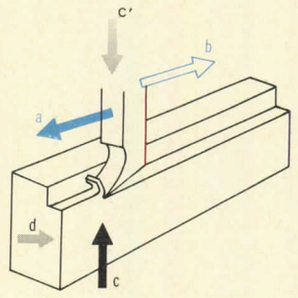
Sto može da bude od jednog bloka ili obrtan (univerzalni sto). *Sto od jednog bloka* predstavlja paralelopiped sa ravnom gornjom i bočnim površinama, koje imaju žlebove ili udubljenja za stezanje. *Obrtni sto,* koji se naziva i *univerzalnim stolom,* sastoji se od jednog oslonca sa rukavcem čija je osa paralelna sa smerom pomeranja nosača alata. Obrtanjem ovog stola moguće je rendisati cilindrične površine bilo koje direktrise, a naginjanjem ose rukavca mogu čak da se obrađuju i konusne površine.

Vrste kratkohodnih rendisaljki. Razlikuju se dve osnovne vrste kratkohodnih rendisaljki: sa nepokretnom glavom i sa pokretnom glavom.

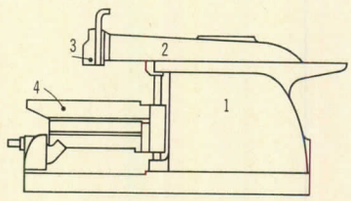
Kratkohodna rendisaljka sa nepokretnom glavom koristi se pri obradi lakih predmeta koji nisu suviše kabasti. Pomoćno kretanje radnog predmeta ostvaruje se pomeranjem stola.

Kratkohodna rendisaljka sa pokretnom glavom namenjena je posebno obradi velikih, teških i kabastih predmeta. Njeno pokretno rame oslanja se na jedan prelazni sistem koji se kreće u poprečnom smeru po telu mašine. Pomoćno kretanje se dobija poprečnim pomeranjem pokretnog ramena i njegovih uzdužnih vođica.

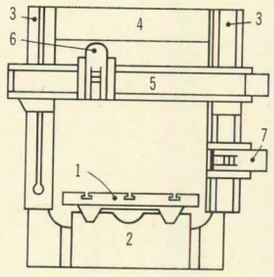
Prednosti kratkohodnih rendisaljki. Sve donedavno upotreba kratkohodne rendisaljke ograničavala se na alatnice, radionice za popravku i za održavanje. Lakoća kojom se ova mašina podešava, brzo stavljanje u pogon, relativno niska cena korišćenja u poređenju sa glodalicom, mogućnost korišćenja karbidnih alata i postizanja velikih brzina rezanja, kao i tačnost koju ona postiže u radu (0,01 mm), uslovili su da se sve više koristi i u radionicama za serijsku proizvodnju. Njena cena korišćenja u odnosu na zapreminu skinute strugotine je najniža od svih mašina alatki.



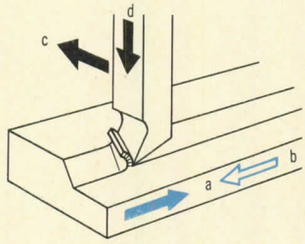
Sl. 7 — Vertikalno rendisanje na kratkohodnoj rendisaljci: *a*, radni hod; *b*, povratni hod; *c*, pomoćno vertikalno kretanje radnog predmeta posle svakog radnog hoda; *c'*, pomoćno kretanje alata; *d*, pomoćno bočno kretanje radnog predmeta. (Kretanja *a*, *b*, *c* vrše se automatski; *c'* i *d* su kretanja sa ručnim upravljanjem.)



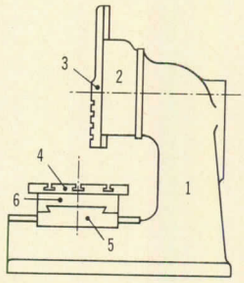
Sl. 8
Kratkohodna rendisaljka:
1. telo mašine;
2. pokretno rame mašine;
3 nosač alata;
4. sto.



Sl. 9 — Dugohodna rendisaljka:
1. sto;
2. postolje;
3. stubovi;
4. horizontalna greda;
5. traverza;
6. nosač alata traverze;
7. nosač alata stuba.



Sl. 10 — Kretanja pri rendisanju:
a, radni hod;
b, povratni hod radnog predmeta;
c, pomoćno bočno kretanje alata;
d, pomoćno kretanje primicanja alata.



Sl. 11 — Vertikalna rendisaljka:
1. telo mašine;
2. nepokretna ili nagibna glava;
3. pokretno rame mašine;
4. sto;
5. uzdužna vođica;
6. klizač stola.

DUGOHODNA RENDISALJKA sastoji se uglavnom od velikog *stola (sl.* 9) sa naizmeničnim pravolinijskim kretanjem, koji je preko vođica spojen sa *postoljem* u obliku korita. Na postolje se nastavljaju dva vertikalna *stuba,* spojena *horizontalnom gredom,* i *poprečni* nosač, ili *traverza,* na koju je postavljen *nosač alata.* Ova traverza ima dva sklopa vođica, od kojih jedan omogućava horizontalno pomeranje nosača alata po njoj, a drugi vertikalno pomeranje poprečnog nosača po stubovima. Kod velikih mašina dva nosača alata istovremeno se kreću po traverzi; vrlo često ove mašine imaju i dva *bočna nosača alata* koji služe za obradu vertikalnih površina i učvršćeni su direktno na stubovima.

Pomoćno bočno kretanje alata i primicanje *(sl.* 10) ostvaruje se pomoću dva sistema zavojnog vretena s navrtkom: prvi za poprečno kretanje nosača alata po traverzi, drugi za vertikalno kretanje sklopa traverze sa nosačem alata. Glavno kretanje u procesu obrade (radni i povratni hod) ostvaruje se pomeranjem stola na kome leži radni predmet. Ovaj sto može da se pomera na razne načine. Sistem zavojnog vretena i zupčaste poluge sa navrtkom, koji se nekada mnogo koristio, danas se upotrebljava samo kod mašina koje rade sa malim brzinama rezanja. Pri velikim brzinama zavojno vreteno se zagreva usled niskog koeficijenta prenosa. Sistem zupčaste poluge i zupčanika se češće koristi, ali ni ovaj prenos nije bez nedostataka. Ako je zahvatanje zupčanicima ravno, prenos je bučan i dovodi do vibracija čak i pri malom modulu i velikom broju zubaca. Savršenije mašine imaju obrnuto zavojno zahvatanje koje deluje na dvojnu zupčastu polugu ili imaju zahvatanje na gredicu. Najzad, postoje i dugohodne rendisaljke na hidraulični pogon.

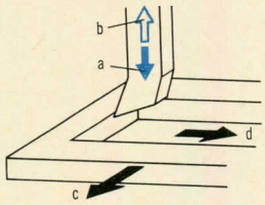
Posebni slučaj obrade. Da bi se obradili jako široki komadi, koji ne mogu da prođu između dva stuba, konstruisane su dugohodne rendisaljke koje imaju samo jedan stub. Traverza na kojoj se nalazi nosač alata je u tom slučaju bez oslonca.

Da bi se obradili veliki radni predmeti (npr. ploče za blindiranje ratnih brodova), koriste se dugohodne rendisaljke sa jamom. U tom slučaju radni predmet se postavlja u jednu veliku jamu iskopanu u podu radionice, i tu se dobro učvršćuje. Na gornjem delu ove jame nalazi se dugohodna rendisaljka, čije se telo sastoji od dva dela, sa uzdužnim vođicama. Na njih se oslanja jedna horizontalna greda sa traverzom, na koju je postavljen nosač alata pomoću jednog oslonca sa dva sistema za vođenje pod pravim uglom: jedan za horizontalno, a drugi za vertikalno pomoćno kretanje alata. Na ovim mašinama glavno kretanje u procesu obrade dobija se pomeranjem horizontalne grede na kojoj je učvršćen nosač alata.

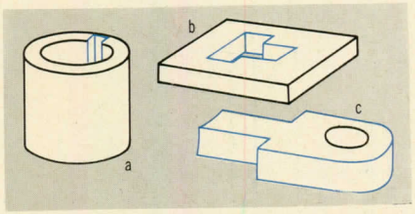
VERTIKALNA RENDISALJKA. Kada rendisanje treba da se vrši u vertikalnom smeru, koristi se vertikalna rendisaljka *(sl.* 11), koja podseća na kratkohodnu rendisaljku okrenutu za 90°.

Telo mašine služi, sa jedne strane, kao oslonac za glavu, nepokretnu ili nagibnu, po kojoj se kreće *pokretno rame mašine,* a sa druge strane, kao oslonac za horizontalni sto. Telo ove mašine je obično u obliku labudovog vrata. Kao i kod kratkohodne rendisaljke, postolje mora da bude teško i čvrsto. Pokretno rame se naizmenično kreće u vertikalnom smeru. Na njegovom donjem delu učvršćen je alat za rendisanje. Ovaj vrši vertikalno kretanje *(sl.* 12), a radni predmet vrši pomoćno bočno kretanje i primicanje. Često se pokretno rame može postaviti pod nagibom, tako da je moguće rendisati ne samo vertikalne već i kose površine, kao što su, npr. matrice za probojce.

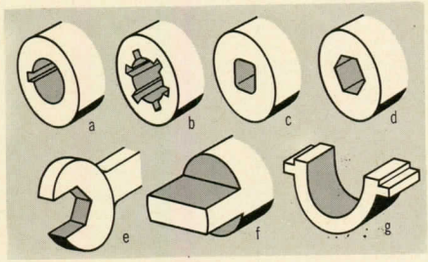
Sl.12. — Kretanja pri vertikalnom rendisanju:



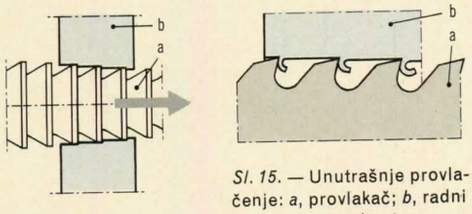
a, radni hod alata;
b, povratni hod alata;
c, pomoćno bočno kretanje radnog predmeta;
d, kretanje primicanja radnog predmeta.



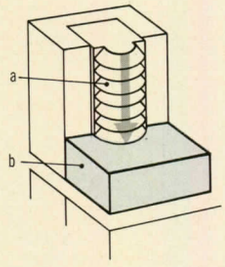
Sl. 13. — Primeri izrade žlebova rendisanjem: *a*, otvor sa žlebom; *b*, matrica probojca; *c*, glava prenosne poluge.



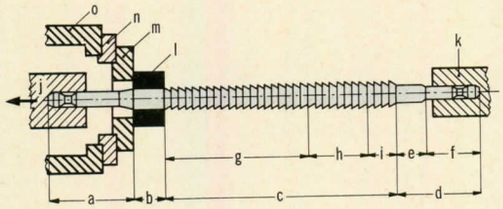
S.. 14. — Primeri obrade provlačenjem: *a*, *b*, *c*, *d*, unutrašnje provlačenje; *e*, *f*, *g*, spoljašnje provlačenje.



Sl. 15. — Unutrašnje provlačenje: *a*, provlakač; *b*, radni predmet.



Sl. 16. — Spoljašnje provlačenje: *a*, provlakač sa nosačem; *b*, radni predmet.



Sl. 17. — Zatezni provlakač u radnom položaju: *a*, vrat provlakača; *b*, prednja vođica provlakača; *c*, ozubljenje; *d*, rep; *e*, zadnja vođica provlakača; *f*, završni deo; *g*, zona grube obrade; *h*, zona poluzavršne obrade; *i*, zona završne obrade; *j*, nosač provlakača; *k*, prateći oslonac; *l*, radni predmet; *m*, oslonac; *n*, pričvrsna ploča; *o*, telo mašine.

Kao i kod kratkohodne rendisaljke, kretanje pokretnog ramena vertikalne rendisaljke malih dimenzija (800 mm) ostvaruje se pomoću složenog mehanizma krivaje. Vertikalne rendisaljke koje imaju hod duži od 800 mm — slično dugohodnim rendisaljkama — koriste kao pogonski mehanizam sistem sa zupčastom polugom ili zavojno vreteno sa navrtkom. Neke vertikalne rendisaljke rade i na hidraulični pogon.

Sto je izveden u vidu obrtnog stola na klizaču sa mogućnošću pravolinijskog pomeranja. Prema tome, radni predmet može da se pomera uzdužno, poprečno i kružno. Ova kretanja se vrše pomoću dva sklopa zavojnih vretena sa navrtkom i jednog sklopa zavojnog vretena i nazubljenog točka. Vertikalna rendisaljka koristi se pri obradi unutrašnjih žlebova, za izradu profila u rupama, pri obradi površina sa krivolinijskim profilom itd. *(sl.* 13). Njena raznovrsna primena podseća nas na kratkohodnu rendisaljku.

PROVLAČENJE

PRINCIP. Provlačenje je postupak obrade zasnovan na pravolinijskom, ponekad i zavojnom kretanju višesečnog alata koji se naziva *provlakač*. Ovaj postupak se primenjuje pri serijskoj izradi malih i srednjih metalnih predmeta na kojima se obrađuju unutrašnje ili spoljašnje površine *(sl.* 14).

Unutrašnjim provlačenjem izrađuju se uglavnom rupe različitih profila. Da bi se to postiglo, alat, koji se sastoji od niza uzastopno poređanih režućih zuba, vuče se ili potiskuje kroz prvobitni otvor, izrađen u livnici ili dobijen bušenjem *(sl.* 15).

Spoljašnjim provlačenjem izvode se serijski radovi slični radovima na glodalici. Obrađuju se spoljašnje površine sirovih ili grubo obrađenih predmeta, kojima treba dati određen geometrijski profil sa velikom preciznošću i dobrom površinskom obradom *(sl.* 16). Ovaj postupak može uspešno da zameni glodanje: vreme obrade je znatno kraće, a stanje površine bolje. Mogućnosti ovog postupka su široke, ali zbog visoke cene alata (potrebno je imati posebne provlakače za različite oblike predmeta) ova tehnika se obično koristi samo za velike serije.

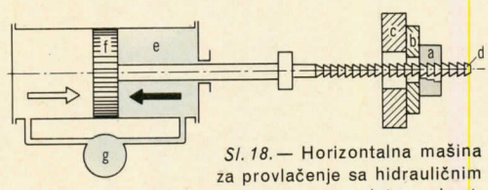
ALAT ZA PROVLAČENJE. Provlakači su obično izrađeni od brzoreznog visokokvalitetnog čelika. To je alat duguljastog oblika, po čijoj su površini narezani profilisani režući zupci, čiji razmak i prečnik zavise od profila koji treba da se izradi. Raspored zubaca je takav da svaki od njih zarezuje radni predmet dublje od zupca koji mu neposredno prethodi.

Ovi alati se pokreću ili potiskivanjem ili vučenjem, pri čemu provlakač na zatezanje omogućava da se skine prilično velika zapremina strugotine, dok provlakač na potiskivanje, koji je kraći da bi se izbeglo krivudanje, može da služi samo za kalibrisanje ili skidanje male zapremine strugotine.

Zatezni provlakač *(sl.* 17) sastoji se od četiri osnovna dela:

— *vrata,* koja služe da se provlakač učvrsti na nosač alata;

— *prednje vođice,* koja se sastoji od cilindričnog dela, čiji prečnik odgovara otvoru na radnom predmetu kroz koji se alat provlači pre rezanja;



Sl. 18. — Horizontalna mašina za provlačenje sa hidrauličnim pogonom: *a*, radni predmet; *b*, oslonac; *c*, pričvrsna ploča; *d*, provlakač; *e*, cilindar; *f*, klip; *g*, uljna pumpa.

— *ozubljenja* ili *režućeg dela* alata;

— *repa,* koji obuhvata *zadnju vođicu* i, ponekad, završni deo koji se učvršćuje na *prateći oslonac* da bi se izbeglo lebdenje alata.

Radni deo provlakača ima tri različite zone:

— *zonu grube obrade,* koja obuhvata zupce čija je dubina rezanja po jednom zubu (ili progresija) od 0,1 do 0,2 mm i čiji broj mora biti dovoljan da bi se skinula glavnina materijala;

— *zonu poluzavršene obrade,* sa malim brojem zubaca i smanjenom progresijom (približno 0,02 mm), čija je uloga da površinu materijala pripremi za dalju obradu;

— *zonu završne obrade* (deo za kalibrisanje), koja obuhvata najmanje četiri zupca iste visine i profila.

MAŠINE ZA PROVLAČENJE dele se na mašine za unutrašnje i spoljašnje provlačenje i na vertikalne i horizontalne mašine. Sve one su uglavnom tako projektovane da radni predmet miruje, a alat se u odnosu na njega kreće.

Pri unutrašnjem provlačenju radni predmet se oslanja na sto pod dejstvom opterećenja pri samoj obradi, tako da nije potrebno da se učvršćuje.

Pri spoljašnjem provlačenju radni predmet je dobro učvršćen u stezač. Provlakač se pomera pomoću sistema sa zupčastom polugom ili na hidraulični pogon *(sl.* 18).

Izbor horizontalne ili vertikalne mašine vrši se zavisno od oblika radnog predmeta ili od prirode obrade koja se izvodi. Horizontalne mašine za provlačenje su jeftinije i mogu se koristiti za veoma različite radove. Međutim, njihov koeficijent iskorišćenja je niži nego kod vertikalnih mašina, ritam obrade je sporiji a zauzimaju veću površinu tla u radionici.

STRUGANJE

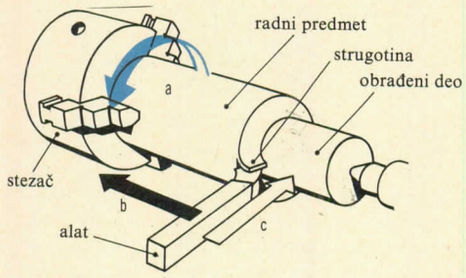
PRINCIP. Na strugu se uglavnom obrađuju obrtna tela, a ponekad i ravne površine. Postupak može da se koristi i za grubu i za završnu obradu. Tačnost i kvalitet površinske obrade dobijenih predmeta menjaju se zavisno od uslova: u najboljem slučaju, ova tačnost je reda veličine 5μ (5/1000 mm).

Radni predmet se učvršćuje pomoću *stezača* na mašini koja se zove *strug.* Stezač je povezan sa *glavnim vretenom;* to je jedna kruta osovina, velikog preseka, koja se oslanja na dva precizna ležišta, tzv. *nosač glavnog vretena.* Ovo vreteno dobija pogon od elektromotora, posredstvom prenosnika za glavno kretanje, tako da se radni predmet obrće određenom brzinom oko strogo nepomične, najčešće horizontalne ose. Alat se učvršćuje na osloncu, tzv. *nosaču alata* koji je povezan sa telom mašine pomoću dva sklopa vođica koji se ponekad nazivaju *saonice.*

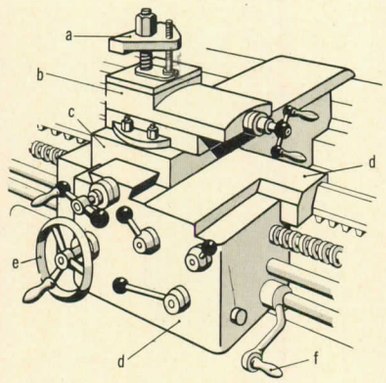
Pri obradi cilindričnih predmeta na strugu, jedan sklop vođica je strogo paralelan sa obrtnom osom radnog predmeta, dok je drugi strogo upravan na ovu osu. U izvesnim slučajevima, kada se na strugu obrađuju konusni predmeti, jedan sklop vođica sa obrtnom osom stvara ugao jednak polovini ugla konusa koji se obrađuje.

Obrada se obično izvodi obrtanjem radnog predmeta i kretanjem alata duž njega, u horizontalnoj ravni koja prolazi kroz obrtnu osu *(sl.* 19).

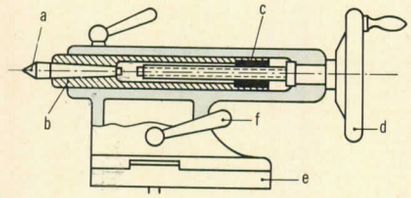
Suprotno tehnikama rendisanja, žlebljenja i provlačenja, strugarski alat neprestano radi, tako da je skidanje materijala neprekidno. Zato alat ne trpi udare, što dopušta upotrebu tvrdih i krtih materijala (keramika, dijamant, itd) i vrlo velike brzine rezanja. Pored toga, odsustvo mrtvog hoda omogućava bržu obradu, a pošto je kretanje neprekidno, bez povratnog hoda i zastoja, koeficijent iskorišćenja pogonske energije je maksimalan.



Sl. 19. — Kretanja pri obradi na strugu: *a*, obrtno kretanje radnog predmeta, koje se naziva *glavno kretanje; b, pomoćno bočno kretanje* alata duž radnog predmeta (aksijalno pomoćno kretanje); *c, pomoćno kretanje primicanja* ili podešavanja alata (radijalno pomoćno kretanje).

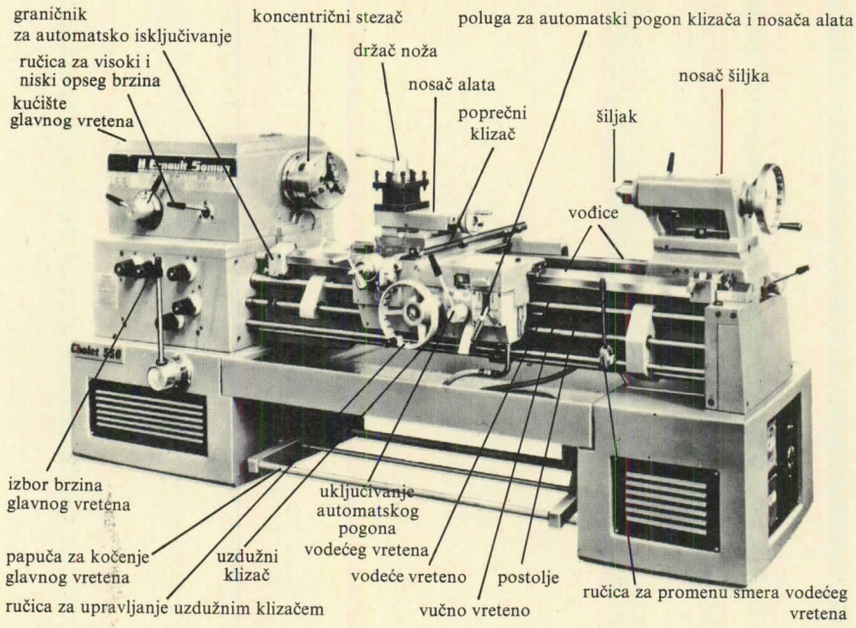


Sl. 21 — Nosač alata: *a*, držač noža (na koji se učvršćuje alat); *b*, nosač alata sa uzdužnim kretanjem; *c*, poprečni (pomoćni) klizač; *d*. uzdužni (glavni) klizač; *e*, ručica za ručno pomeranje uzdužnog klizača; *f*, ručica za uključivanje vučnog vretena.



Sl. 22 — Nosač šiljka: *a*, pomični šiljak; *b*, čaura; *c*, sistem zavrtanj-navrtka za pomeranje čaure; *d*, ručica za pokretanje čaure; *e*, klizne vođice; *f*, ručica za blokiranje.

Desno, sl. 23 — Vertikalni strug: 1. ploča za stezanje radnog predmeta ili sto; 2. stubovi; 3. horizontalna greda; 4. traverza; 5. nosači alata traverze; 6. nosač alata stuba; 7. telo mašine.



Sl. 20 — Glavni delovi paralelnog struga. *Fot. Henri Favroult.*

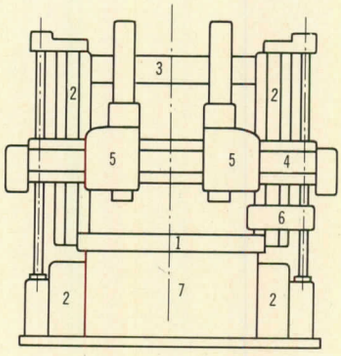
Neprekidnost rada postiže se putanjom koju opisuje alat po predmetu: kod ravnih površina pomoćno kretanje alata je radijalno, a kod obrtnih aksijalno.

VRSTE STRUGOVA. Strug je najrasprostranjenija od svih mašina alatki, a istovremeno i najstarija. Upotrebljava se u radionicama za opravke pri pojedinačnoj izradi predmeta, a i u proizvodnim radionicama preduzeća za mašinske konstrukcije pri velikoserijskoj proizvodnji. Strug je mašina alatka koja se najčešće sreće, tako da je među ostalim mašinama njegov udeo gotovo uvek veći od približno 40 %. Zavisno od rada za koji je predviđen, strug može da ima oblik male, robustne mašine, dugačke jedva jedan metar, a isto tako, da predstavlja ogromnu i složenu mašinu koja sama za sebe čini malu fabriku; takvi su izvesni strugovi od 300 KS koji mogu da obrađuju predmete teže od 100 tona (cilindre za valjaoničke stanove, turbine itd.), pri čemu skidaju po 2 tone strugotine na čas. Svaka vrsta struga je posebno namenjena određenom radu koji treba da se izvede. Za dugačke predmete i one čiji je prečnik manji od približno 800 mm, obično se koristi *paralelni strug*. Ovo je istovremeno najrasprostranjenija vrsta struga u radionicama.

Za predmete vrlo velikog prečnika i za ravne predmete koristi se *vertikalni strug* ili *čeoni strug*.

Mali predmeti prečnika približno do 80 mm obično se obrađuju na *revolverskom strugu*. Na kraju, u serijskoj proizvodnji predmeta koriste se *poluautomatski* i *automatski strugovi*.

Paralelni strug. Glavni delovi paralelnog struga (*sl.* 20) su: *postolje, kućište glavnog vretena, nosač alata* sa svojim *klizačem, pogonski mehanizam za pomoćno kretanje* i *nosač šiljka*.



Postolje se sastoji od jednog oslonca od livenog gvožđa, ponekad zavarene konstrukcije, na kome su učvršćeni svi delovi mašine. Ono ima horizontalne vođice po kojima se kreće *klizač* sa nosačem alata.

Kućište glavnog vretena obuhvata sledeć elemente:

— *prenosnik za glavno kretanje,* koji omogućava da se brzina obrtanja predmeta menja radi odabiranja optimalne brzine rezanja za obradu koju treba izvesti;

— *glavno vreteno,* osovina velikog preseka, napravljeno je tako da može da se učvrsti za stezač i prenese obrtno kretanje na radni predmet, čime, u stvari, materijalizuje obrtnu osu;

— *stezač* koji može da se učvrsti na kraju glavnog vretena.

Oslonac alata sastoji se od *držača noža* (*sl.* 21) na koji se učvršćuje alat, a on sam leži na nosaču alata sa uzdužnim kretanjem. Ovaj nosač alata je postavljen na jedan *pomoćni klizač sa poprečnim vođicama,* koji može da se pokreće u poprečnom smeru, najčešće ručno, a ponekad i automatski — — uključivanjem *vučnog vretena.* Samo usavršeni strugovi imaju sistem za automatsko kretanje poprečnog klizača. Ovaj klizač je sa svoje strane spojen sa velikim *klizačem sa uzdužnim vođicama* koji nosi prethodni klizač sa nosačem alata i naziva se *uzdužni klizač.* On može da se pomera uzdužno celom dužinom postolja struga, ručno ili automatski, uključivanjem *vodećeg vretena* — velike šipke sa preciznom zavojnicom koja se koristi pri operacijama narezivanja na strugu — ili *vučnog vretena* koje se koristi pri uzdužnoj obradi cilindričnih predmeta koja se naziva *kotrljanjem.*

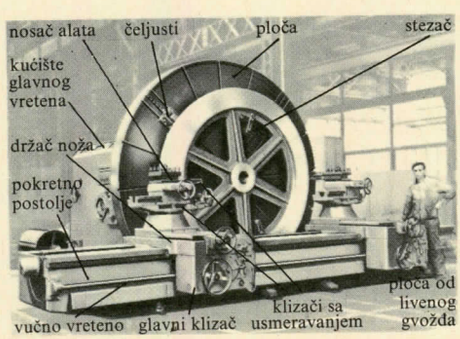
Mehanizam za pomoćno kretanje, koji služi za pogon vučnog i vodećeg vretena, sastoji se od prenosnika za pomoćno kretanje, smeštenog ispod prenosnika za glavno kretanje s kojim je spojen preko zupčanika. Na taj način se može menjati brzina obrtanja vučnog vretena u odnosu na brzinu obrtanja glavnog vretena. Kod paralelnih strugova, koji imaju vodeće vreteno i nazivaju se *strugovi za rezanje zavojnica,* ovaj mehanizam omogućava da se menja relativna brzina obrtanja vodećeg vretena tako da bude strogo proporcionalna brzini obrtanja radnog predmeta da bi se mogla narezati zavojnica datog koraka.

U većini slučajeva prenosnik za pomoćno kretanje ima sve prenose koji su potrebni da bi se izvršila uobičejena standardna narezivanja. Strugovi za narezivanje nazivaju se i *univerzalni strugovi*.

Nosač šiljka, koji se naziva još i *konjic (sl.* 22), služi da se učvrste vrlo dugački predmeti. Ponekad se koristi i kao oslonac za nosač alata i uvek je postavljen nasuprot nosaču glavnog vretena. Dugački predmeti postavljeni između krajeva struga učvršćuju se na jednoj strani pomoću stezača, a na drugoj pomoću nosača šiljka. Usled toga nosač šiljka mora da bude čvrste konstrukcije, kako bi se mogao čvrsto povezati sa postoljem preko efikasnog sistema za stezanje. Ovaj sistem je, obično, tipa zavojnog vretena sa navrtkom. Na prednjem delu nosača šiljka nalazi se *pomični šiljak*, sa uglom od 60°; ovaj je često smešten u *čauru* sa kugličnim ležajevima, što omogućava velike brzine obrtanja (4000 o/min). Pomični šiljak može da se pomera i uzdužno, omogućavajući postavljanje radnog predmeta na mesto. Ovo kretanje se dobija pomoću sistema zavrtnja sa navrtkom. Navrtka se pokreće pomoću ručice na zadnjem delu nosača šiljka. Pored zahteva da nosač šiljka bude čvrst, postavlja se i zahtev da sam šiljak leži strogo u produžetku obrtne ose glavnog vretena. U nekim slučajevima nosač šiljka može da se pomera i bočno, u horizontalnoj ravni. Ovo kretanje se koristi pri obradi konusnih predmeta.

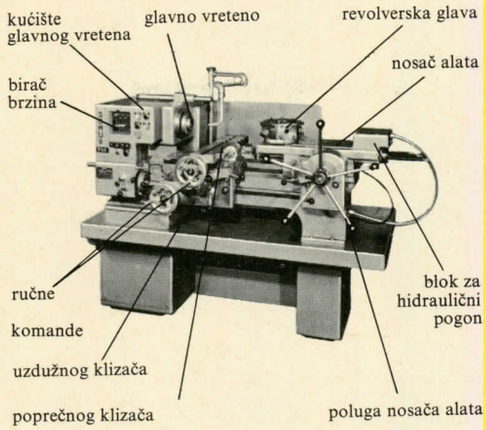
Vertikalni strug. Za njega je karakteristična *(sl.* 23) horizontalna ploča za stezanje koja se obrće oko vertikalne osovine, suprotno drugim vrstama strugova kod kojih se predmet obrće oko horizontalne osovine. Glavno vreteno sa svoja dva ležišta zamenjeno je jednim aksijalnim ležištem velikog prečnika, na koje se oslanja ploča. Postavljanje radnog predmeta na mesto i njegovo učvršćivanje olakšani su, tako da se na ploču mogu namestiti i teški predmeti velike dužine. Pored horizontalne ploče struga postavljen je jedan ili dva vertikalna *stuba,* spojena *horizontalnom gredom.* Ovi stubovi služe kao oslonac za horizontalnu *traverzu* sa *nosačem alata,* slično kao kod dugohodne rendisaljke. Osnovna razlika je u kretanju ploče: dok kod dugohodne rendisaljke ploča ima naizmenično pravolinijsko kretanje, kod vertikalnog struga ploča ima kontinuirano obrtno kretanje. Postoje vertikalni strugovi za obradu predmeta čiji je prečnik veći od 20 m.

Čeoni strug ili *strug za poprečnu obradu (sl.* 24) namenjen je uglavnom obradi predmeta vrlo velikog prečnika. Za njegovo postolje se kaže da je »podeljeno«, što znači da je rastojanje od horizontalne ravni vođica do ose vretena manje od prečnika predmeta koji se mogu obrađivati na strugu. Jedan deo ploče za stezanje predmeta leži niže od ravni u kojoj su vođice. U vrlo velikih strugova nosač šiljka sa vretenom i osloncem radnog predmeta može da se učvrsti na jednom kraju velikog betonskog bloka. U tome slučaju postolje, sa svojim vođicama na kojima leži nosač alata, učvršćeno je na drugoj strani ovog betonskog bloka, tako da između dva dela mašine nema metalne veze. Postolje mašine na taj način je zamenjeno betonskim blokom sa jamom u koju ulazi donji deo predmeta. Čeoni strug je jef-



Sl. 24 — Čeoni strug ili strug za poprečnu obradu.

Fot. Bazaine-Photo. (Doc. Ernault-Somua, Henri Favroult.



Sl. 25 — Revolverski poluautomatski strug.

tiniji od vertikalnog, ali je njegovo postavljanje na mesto i učvršćivanje radnog predmeta složenije, a dugački predmeti se teško učvršćuju.

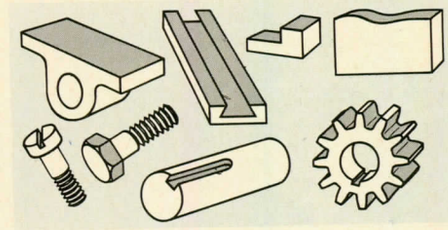
Revolverski strug. Ova vrsta struga često se koristi u proizvodnim radionicama *(sl.* 25). Revolverski strug je namenjen serijskoj proizvodnji malih predmeta od šipke okruglog ili višeugaonog preseka koja prolazi kroz osu glavnog vretena i sa desne strane alata drži se pomoću stezača, okruglog ležišta ili cevi. U ovom slučaju postiže se znatna ušteda vremena na postavljanju radnog predmeta, pošto se ovaj pravi direktno od šipke. Alati su poređani u tzv. revolverskoj glavi koja se po postolju kreće poluautomatski, posredstvom točka sa ručnim upravljanjem. Posle svakog prolaza, u toku vraćanja nazad, nosač alata se automatski obrće i novi alat dolazi u radni položaj. Pri poslednjoj operaciji odseca se gotov predmet, a šipka se ručno ili automatski pomera napred onoliko koliko je potrebno da bi se obradio novi predmet. Ove vrste strugova postale su poluatomatske ili su potpuno automatizovane.

GLODANJE

PRINCIP. Glodanje se sastoji od obrade metalnih predmeta pomoću kružnog višesečnog alata koji se obrće oko svoje ose. Predmeti koji se dobijaju glodanjem mogu da budu raznovrsni: ravni, udubljeni, ispupčeni, višestranični itd. *(sl.* 26). Alat koji se naziva *glodač* je višesečni alat u obliku obrtnog tela od čelika sa velikim brojem pravilno raspoređenih zuba na periferiji obrtnog cilindra *(sl.* 27). Svaki zub istog glodača naoštren je pod istim grudnim i leđnim uglom, a sečiva svih zuba su na potpuno jednakom rastojanju od obrtne ose glodača. Na taj način svi zubi rade pod istim uslovima kao i jednostavan alat. Za vreme obrade glodač se neprekidno obrće oko svoje ose; to je *glavno kretanje; pomoćno kretanje* se obično dobija pomeranjem stola na kome je učvršćen predmet; ovo pomeranje je gotovo uvek upravno na obrtnu osu glodača. Na taj način zubi glodača uzastopno dolaze u dodir sa radnim predmetom, postupno skidajući materijal u obliku strugotine. Za vreme glodanja svaki zub alata učestvuje u skidanju strugotine samo u toku jednog dela ukupnog broja obrtaja glodača. Ostatak vremena svaki zub se obrće, naprazno, tako da može da se ohladi. Prema tome, ukupno zagrevanje sečiva je slabije kod alata glodalice nego kod strugarskog alata, gde je sečivo u neprekidnom dodiru sa materijalom radnog predmeta u toku faze rezanja.

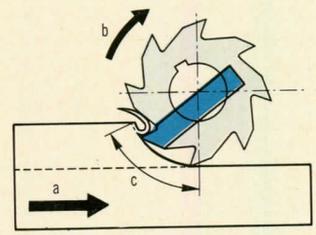
POSTUPCI GLODANJA. Postoje dve metode glodanja: obimno glodanje i čeono glodanje.

Obimno glodanje. Pri ovom postupku, koji se naziva i *profilno glodanje (sl.* 28) glodač ima oblik



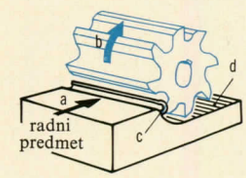
Sl. 26 — Primeri obrade glodanjem.

Sl. 27 — Način obrade glodanjem:

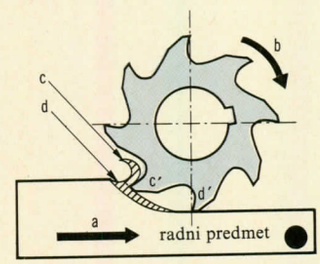


a, pomoćno kretanje radnog predmeta;
b, glavno kretanje alata;
c, delovanje zuba glodača.

Sl. 28. — Obimno glodanje:



a, pomoćno kretanje radnog predmeta;
b, glavno kretanje glodača;
c, izgled strugotine;
d, obrađena površina sa grebenima stvorenim glodanjem.



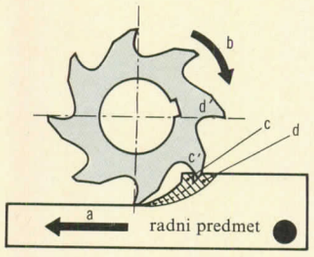
Sl. 29 — Suprotnosmerno glodanje:
a, pomoćno kretanje radnog predmeta;
b, glavno kretanje glodača;
c, strugotina odvojena zubom c';
d, strugotina odvojena zubom d'.

cilindričnog valjka čija je obrtna osa paralelna sa osom predmeta čija se površina obrađuje. Pomoćno kretanje je upravno na obrtnu osu glodača, a paralelno sa površinom radnog predmeta. Obrćući se, glodač skida materijal svojim obimnim sečivima. Teorijski trebalo bi da se dobije ravna površina, paralelna onoj koju opisuje osa glodača. Međutim, usled razmaka između zuba i tolerancije u njihovoj visini, ne može se izbeći stvaranje talasaste površine radnog predmeta. Ove neravnine odgovaraju pomoćnom kretanju u toku jednog obrtaja glodača i relativnom kretanju svakog zuba glodača.

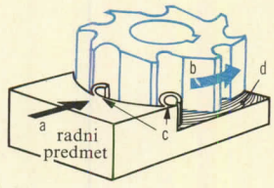
Isto tako, debljina skinute strugotine menja se u toku faze rezanja svakog sečiva. Opterećenje zuba je nejednako i ma koliko bila inercija i krutost mašine, ne mogu se izbeći laki trzaji u obrtnom kretanju glodača.

Zavisno od smera obrtanja glodača u odnosu na pomoćno kretanje radnog predmeta razlikuju se dve metode glodanja: *suprotnosmerno glodanje* i *istosmerno glodanje.*

Suprotnosmerno glodanje. U toku obimnog glodanja pomoćno kretanje radnog predmeta je suprotno smeru obrtanja glodača *(sl.* 29). To je *suprotnosmerno* glodanje, koje se naziva još i *klasično* glodanje. Zubi glodača idu u susret radnom predmetu koji za to vreme ide napred, prema zubima. Glodač teži da odigne radni predmet i da ga odgurne, dok ga

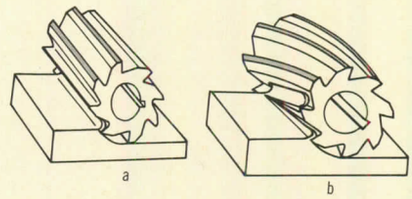


Sl. 30 — Istosmerno glodanje: *a*, pomoćno kretanje radnog predmeta; *b*, glavno kretanje glodača; *c*, strugotina odvojena zubom *c'*; *d*, strugotina odvojena zubom *d'*.

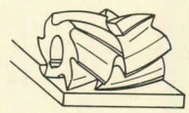


Sl. 31 — Čeono glodanje: *a*, pomoćno kretanje radnog predmeta; *b*, glavno kretanje glodača; *c*, izgled strugotine; *d*, obrađena površina.

Sl. 32 — Izgled sečiva:



a, pravi zubi (prava sečiva zahvataju strugotinu po celoj dužini i glodač radi u trzajima);
b, zavojno uvijeni zubi (kada jedan zub napušta obrađivani materijal, drugi je već u zahvatu).



Sl. 33 — Sprezanje dvaju glodača sa zavojno uvijenim zubima suprotnog smera da bi se poništio akcioni otpor.

pomoćno kretanje primorava da prođe ispod alata. Svaki zub stupa u dodir sa površinom koja se obrađuje tangencijalno, tako da je debljina strugotine u početku ravna nuli. Zub ne zaseca materijal sve dok sile savijanja radnog predmeta i celog sklopa ne postanu veće od otpora prodiranja. Zazori stola poništavaju se u toku operacije glodanja. Za vreme odvajanja strugotine jednim zubom leđni ugao opada, a grudni ugao raste.

Prednosti ove metode su mnogobrojne:

— odsustvo udara zbog postupnog prodiranja zuba u metal radnog predmeta;

— smanjeno naprezanje glodača zbog toga što alat ne ulazi u koru radnog predmeta, koja je obično otvrdnuta termičkom obradom;

— ograničene vibracije i neravnomernosti u radu usled pojave dvaju suprotnih naprezanja: sile rezanja i dejstva mehanizma za pomoćno kretanje stola.

Istosmerno glodanje. Pri ovom metodu zubi glodača i radni predmet *(sl.* 30) imaju isti smer kretanja i glodač ima tendenciju da povlači predmet; metod može da se koristi samo na modernim mašinama jake konstrukcije, koje imaju ili uređaj za kompenzaciju zazora na zavojnom vretenu stola ili pomoćno hidraulično kretanje sa zaporom. Nasuprot postupku pri suprotnosmernom glodanju, strugotina u ovom slučaju ima najveću debljinu u momentu ulaska zuba u materijal; zatim se smanjuje i opada na nulu pri izlasku zuba iz materijala. Leđni ugao svakog zuba raste u toku faze rezanja, a nagib rezanja opada.

Ova metoda glodanja ima sledeće prednosti:

— bolje korišćenje opterećenja zbog uklanjanja suprotnosti između sile rezanja i pomoćnog kretanja stola, koji sada imaju isti smer;

— bolji kvalitet obrađene površine i manje habanje sečiva zuba glodača, pošto se ne javlja klizanje zuba po radnom predmetu a završna obrada se izvodi pri minimalnoj debljini strugotine;

— bolja završna obrada jer ne postoji odizanje radnog predmeta, što se ponekad događa pri suprotnosmernom glodanju izazivajući zadiranje alata.

Istosmerno glodanje se naročito preporučuje za moderne mašine koje imaju dovoljnu snagu i koje su krute, tako da dopuštaju korišćenje glodača sa negativnim uglom rezanja. Kvalitet površinske obrade je visok, naročito pri obradi mekih čelika.

Čeono glodanje. Osa glodača je postavljena upravno na obrađivanu površinu *(sl.* 31), pri čemu je pomoćno kretanje glodača upravno na osu glodača, a paralelno sa obrađivanom površinom. Glodač ne radi samo svojim obimnim sečivom nego i svojim zubima na čeonoj površini. Ovakvi alati se nazivaju *čeoni glodači*. Budući da je dubina prodiranja jednog zuba konstantna, i opterećenje svakog zuba je isto. Pored toga, broj zuba koji su u dodiru sa materijalom je veći: glodač se okreće ravnomernije, sa manje trzaja. Dobijene površine takođe pokazuju bolji kvalitet, a u odnosu na obimno glodanje, kapacitet skidanja strugotine je obično veći za približno 20%.

VRSTE GLODAČA. Bilo da se radi suprotnosmerno ili istosmerno, naprezanje koje trpi glodač je promenljivo. Da bi se smanjili ovi trzaji, najpre se pokušalo sa povećanjem broja zuba koji su u dodiru sa materijalom — upotrebom glodača sa manjim razmakom između zuba. Međutim, kada broj zuba raste, sečiva se približavaju, tako da je oštrenje otežano. Pored toga, razmak između zuba se suviše smanjuje i više ne može da primi strugotinu. Dakle, mora se smanjiti pomoćno kretanje, tako da se na kraju dolazi do debljina manjih od minimalne debljine strugotine, što isključuje mogućnost glodanja.

Drugi metod se zasniva na upotrebi glodača sa zavojno uvijenim zubima *(sl.* 32). Alat je skuplji, ali je rezanje kontinuirano. Upotreba ovih glodača ipak ima i svoje nedostatke. Pre svega, glodači ove vrste izazivaju aksijalnu reakciju na glavnom vretenu mašine. Ona se poništava povezivanjem dvaju glodača sa suprotnim nagibom zavojnih zuba *(sl.* 33). Sa druge strane javlja se dodatno trenje strugotine na radnoj površini, što ubrzava habanje zuba na alatu. Postoje raznovrsni glodači, od kojih je svaki namenjen posebnoj obradi. Glavne vrste su sledeće:

— valjkasti glodači sa jednom reznom površinom, za obimno suprotnosmerno ili istosmerno glodanje; njihovi zubi su pravi ili u obliku zavojnice;

— valjkasti glodači sa dve rezne površine, za čeono glodanje (površinski glodači);

— valjkasti glodači sa tri rezne površine za obradu žlebova;

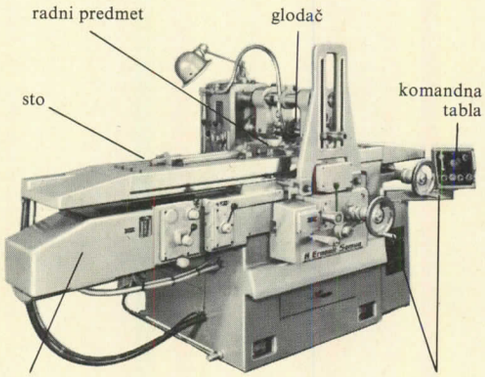
— kolutasti glodači u obliku diska, za veoma fino usecanje i odsecanje;

— profilni glodači za specijalna profilisanja;

— čeoni vretenasti glodači za obradu žlebova i za klasično usecanje.

— Postoji veoma veliki broj glodača različitih vrsta; stoga cena glodača neophodnih da bi se na jednoj mašini izvršio najveći broj operacija obrade ima važan udeo u ceni te mašine.

GLODALICE. U koncepciji, kao i u ostvarenju različitih mašina za glodanje, tzv. *glodalica*, čija je nabavna cena relativno viša od cene drugih mašina, nastojalo se da vek mašine bude duži, proizvodni kapacitet veći, mrtvo vreme manje i način upotrebe jednostavniji; dalje, težilo se ka poboljšanju kvaliteta rada u pogledu preciznosti i kvaliteta površinske obrade uklanjanjem bilo kakvih vibracija.



Sl. 34 — Horizontalna glodalica.

Horizontalna glodalica. Horizontalna glodalica *(sl.* 34) sastoji se uglavnom od *tela mašine, konzole* promenljive visine, koja služi kao oslonac za *sto, glavnog vretena* sa njegovim *pogonskim mehanizmom* sa različitim brzinama, i *glodača*.

Telo mašine od stabilizovanog liva iznutra je jako ižlebljeno, kako bi mu se pojačala otpornost prema deformaciji. Ono sadrži *elektromotor*, povezan sa *prenosnikom*, koji sa jedne strane pokreće *glavno vreteno*, a sa druge mehanizam za pomoćna kretanja *stola*. *Postolje* mašine izvedeno je kao dvostruko korito: jedno služi za tečnost za hlađenje glodača (obično smeša vode i rastvorenog ulja), a drugo sadrži tečnost za podmazivanje pokretnih delova mašine: ležišta glavnog vretena, prenosnika glavnog kretanja i pomoćnih kretanja stola.

Konzola se pomera vertikalno, po bočnoj ravni *tela mašine*. Ona leži na *osloncu konzole* u kome se nalazi zavojno vreteno koje omogućava vertikalno pomeranje. Za vreme glodanja konzola je učvršćena sa dvostrukim zaporom: sa jedne strane na vertikalnom oslancu, a sa druge nasuprot *vertikalnoj vođici* tela mašine. Ovo dvostruko učvršćivanje veoma je značajno kako bi se izbegle vibracije. Na konzoli se nalazi *klizač*, koji se kreće poprečno, zajedno sa stolom s kojim je povezan preko jednog prelaznog dela, *umetka*, koji može da se usmerava različito.

Sto, na kome je učvršćen radni predmet, pomera se uzdužno. On je težak i čvrst kako bi se izbegla deformacija pod većim opterećenjima. Na donjem delu sto ima vođice koje mu služe za kretanje po *poprečnom klizaču*. Gornji deo stola, usečen u obliku T, omogućava učvršćivanje radnog predmeta i pomoćnih delova koji se koriste pri obradi (podeoni aparat, kružna ploča, stezač itd.). Njegov prednji deo takođe ima žlebove u obliku T, u koje se postavljaju uporišta koja automatski kontrolišu pomoćno kretanje stola. Različita kretanja stola (vertikalno, poprečno ili uzdužno) ostvaruju se pomoću zavojnog vretena sa navrtkom. Ona mogu da se izvode ručno, za brzo postavljanje radnog predmeta u odnosu na glodač, ili automatski, za pomoćna kretanja u toku obrade. Ova automatska kretanja stola izvode se pomoću *prenosnika za pomoćna kretanja*, koji se, obično, nalazi u telu mašine, ispod prenosnika za glavno kretanje. Kretanje se prenosi preko *ožlebljenog vratila* sa kardanom ili konusnim zupčanikom koji klizi po tom vratilu.

Fot. Bazaine-Photo. (Doc. Ernault-Somua.).

Horizontalno vreteno, koje se nalazi na gornjem delu postolja, oslanja se na specijalna ležišta, vrlo precizne izrade. Njegovo kretanje se ostvaruje preko prenosnika i spojnice. Kao i kod strugova, glavno vreteno je šuplje, a kraj mu je proširen u Morzeov konus.

Glodač se najčešće oslanja na trn, *»osovinu za nošenje glodača«,* čiji se jedan kraj pokreće preko glavnog vretena; drugi kraj ove osovine oslanja se na jedno ili više ležišta koja su povezana sa tzv. *podupiračem glavnog vretena,* koji je učvršćen za gornji deo tela mašine. Ako se želi poboljšati krutost ovog sklopa, treba ga dopuniti jednim drugim podupiračem, tzv. *upornikom;* to omogućava da se podupirač glavnog vretena na koji se oslanjaju okrugla ležišta spoji sa konzolom i tako izbegnu vibracije usled savijanja ovog podupirača. Na nekim mašinama ovaj cilindrični stub je zamenjen traverzom od livenog gvožđa, sa vođicama na donjem delu, na koje su učvršćena ležišta.

Vertikalna glodalica je konstruisana kao i horizontalna glodalica, sa izuzetkom glavnog vretena koje je postavljeno vertikalno na gornjem delu tela mašine *(sl.* 35). U stvari, nosač glavnog vretena obično se okreće pomoću velikog kružnog klizača, tako da osa glavnog vretena može da se obrće u vertikalnoj ravni i da se naginje na jednu ili drugu stranu u odnosu na vertikalni položaj.

Kombinovana glodalica ima jedno horizontalno i jedno vertikalno glavno vreteno.

Univerzalna glodalica podseća umnogome na vertikalnu glodalicu, od koje je i postala, ali, pored ostalog, ima i jednu glavu koja je pokretna u svim pravcima, ili klizač koji je različito usmerljiv i pokretan. Ova glodalica olakšava glodanje krivolinijskih površina i najsloženijih predmeta.

Glodalica sa nepomičnim postoljem. Ova vrsta mašine, impozantnih razmera, po svom spoljnjem obliku podseća na dugohodnu rendisaljku. Sto može da se pomera samo uzdužno, dok se poprečno i vertikalno kretanje ostvaruje pomeranjem nosača alata.

Dosta nova po svojoj koncepciji, ova mašina odgovara potrebama velikoserijske proizvodnje. Utvrđeno je da 85 do 90% radnog vremena glodalice odlazi na uzdužno kretanje. Pored toga, serijski rad koji traži velike brzine rezanja i velike hodove zahteva od mašine da bude dobro učvršćena. Kod klasičnih glodalica, posebno, ova krutost je dovedena u pitanje zbog konzole; upravo zbog ublažavanja ovog nedostatka izrađuju se mašine sa nepomičnim postoljem.

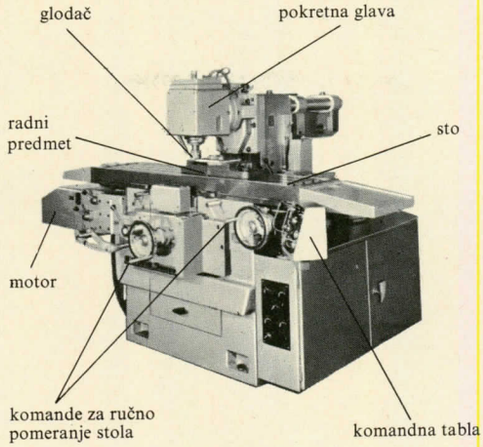
Glodalica sa pokretnim stubom služi za glodanje suviše kabastih ili teških predmeta koji ne mogu da se postave na sto klasične glodalice. U ovom slučaju, radni predmet se steže na ploču učvršćenu na betonskom bloku koji je ukopan u pod radionice. Vreteno sa nosačem alata, spojeno sa traverzom učvršćenom na jednom ili na dva stuba, pomera se u svim pravcima, omogućavajući da se glodač dovede do radnog predmeta. Dakle, alat ovih mašina vrši istovremeno i glavno i sporedno kretanje.

Glodalica sa planetarnom glavom je vertikalna glodalica sa specijalnom glavom koja omogućava da se alat pomera poprečno, vertikalno i kružno. Ova različita kretanja su sinhronizovana tako da omogućavaju da glodalica opiše površinu bilo kojeg geometrijskog oblika.

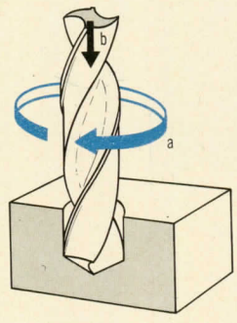
Vreteno mašine je postavljeno na klizač koji je, sa svoje strane, učvršćen za obrtnu glavu. Različiti pomoćni delovi omogućavaju i kružno kretanje u vertikalnoj ravni, što obezbeđuje izradu svih okruglih ili konusnih oblika.

Kopirna glodalica. Ova specijalna mašina omogućava obradu površina složenog oblika bez prethodnog obeležavanja i bez specijalnih alata, sa eventualnim izuzetkom modela, obično od drveta, plastične mase ili lake legure, po kome se pomera kopirni šiljak.

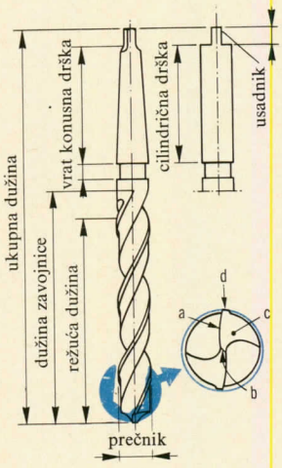
Specijalne glodalice. Postoji takođe veliki broj specijalnih glodalica, od kojih je svaka namenjena tačno određenom poslu: mašine za izradu zavojnica, zupčanika, unutrašnjeg ozubljenja, žlebova za zapore itd.



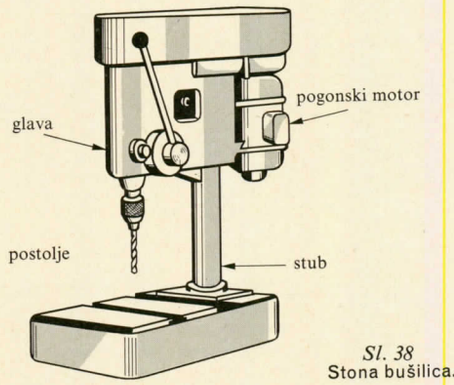
Sl. 35 — Vertikalna glodalica.



Sl. 36 — Kretanje pri bušenju na bušilici: *a,* glavno kretanje; *b,* pomoćno kretanje.



Sl. 37
Burgija za bušenje:
a, glavno sečivo;
b, poprečno sečivo (jezgro);
c, slobodna površina,
d, zavojnica.



Sl. 38
Stona bušilica.

BUŠENJE

PRINCIP. Bušenje je operacija obrade kojom se izrađuju cilindrične rupe i otvori.

Mašine alatke posebno namenjene ovoj vrsti obrade nazivaju se *bušilice,* ali se veoma često operacije bušenja izvode i na strugovima ili glodalicama.

Alat koji se koristi, tzv. *burgija* ili *svrdlo,* ima dva žleba i podseća na vretenast glodač sa dve rezne površine — dva zavojna sečiva. On se učvršćuje na vreteno bušilice tako da mu se osa strogo poklapa sa osom obrtanja vretena. Kada se ovo vreteno obrće *(sl.* 36), i alat se obrće oko svoje ose (glavno kretanje) i pomera se aksijalno u predmetu koji se buši (pomoćno kretanje). Da bi se probušila rupa određenog prečnika, koristi se burgija odgovarajućeg prečnika, a brzina obrtanja burgije podešava se tako da linearna brzina u najudaljenijoj tački sečiva (u odnosu na osu) bude usklađena sa brzinom rezanja obrađivanog materijala. Ovako se buše okrugle rupe sa prečnikom do nekoliko santimetara. Bušenje rupa većeg prečnika izvodi se gotovo uvek u nekoliko operacija, upotrebom burgija povećanog prečnika. Rupe dobijene u toku ovih operacija nazivaju se *prethodne rupe.*

Što je prečnik burgije veći, njeno jezgro je veće i ona teže prodire u puni materijal bez prethodne rupe.

Operaciju bušenja prati veliko oslobađanje toplote i potrebno je obilato hlađenje, obično smešom rastvorljivog ulja i vode. Neke burgije, naročito one za bušenje dubokih rupa, šuplje su, što dopušta da se emulzija šalje u zonu rezanja.

ALAT ZA BUŠENJE. Postoje različite vrste burgija prema obliku, broju žlebova, uglu zavojnice i smeru rezanja (desna i leva burgija). Najčešće se koristi burgija sa dva simetrična žleba *(sl.* 37), ali postoje i burgije sa jednim, tri ili četiri žleba.

Burgije do približno 20 mm prečnika su potpuno cilindrične i učvršćuju se na bušilicu pomoću stezača. Burgije većeg prečnika imaju konusni završetak i učvršćene su pomoću konusnog stezača (Morzeov konus).

Burgije se razlikuju i prema uglu zavojnice, čija vrednost zavisi od obrađivanog materijala. Burgije sa normalnom zavojnicom koriste se za bušenje liva i običnih čelika, a burgije sa dugačkom zavojnicom za bušenje veoma tvrdih čelika i metala visoke tvrdoće koji daju isprekidanu strugotinu (npr. bronza).

Da bi se obrađivali meki metali, kao što su olovo i aluminijum, koji daju neprekidnu strugotinu, bolje je koristiti burgije sa kratkom zavojnicom.

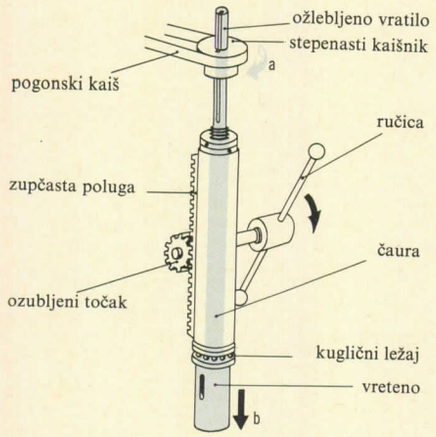
Kao i kod glodača, sečiva burgija moraju da budu pažljivo naoštrena, poštujući grudni i leđni ugao, istu dužinu svakog sečiva i ugao vrha.

MAŠINE ZA BUŠENJE. Mašine za bušenje, koje se nazivaju *bušilice,* imaju zadatak da burgiji predaju: glavno kretanje koje se sastoji u njenom obrtanju oko sopstvene ose i pomoćno kretanje, koje se sastoji u pomeranju burgije duž svoje ose. Sklop vretena i burgije najčešće je vertikalan. Na većini ovih mašina mogu se izvoditi i operacije razvrtanja, upuštanja i urezivanja.

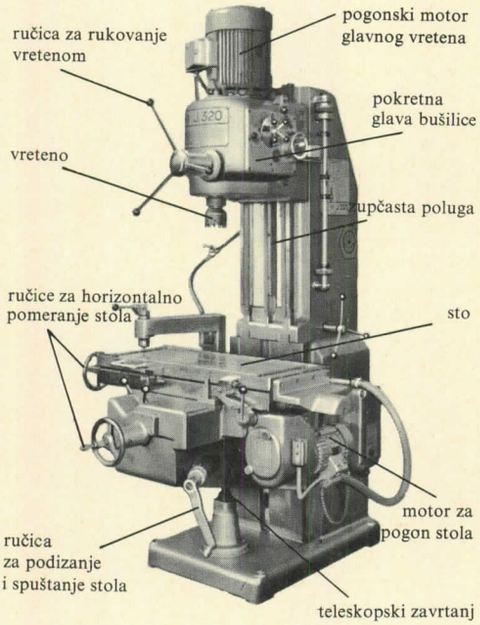
Stona bušilica. Ova mašina je malena i veoma jednostavna, namenjena bušenju rupa prečnika manjeg od 10 mm.

Sastoji se *(sl.* 38) od postolja sa vrlo kratkim *stubom,* po kome može da se pomera *glava vretena* sa svojim *pogonskim motorom.* Jedan sistem za brzo blokiranje učvršćuje nosač vretena na stubu za vreme operacije bušenja. *Vreteno (sl.* 39), postavljeno na kuglični ležaj, smešteno je u *čauru,* spojenu sa *zupčastom polugom.* Pomoćno kretanje alata izvodi se

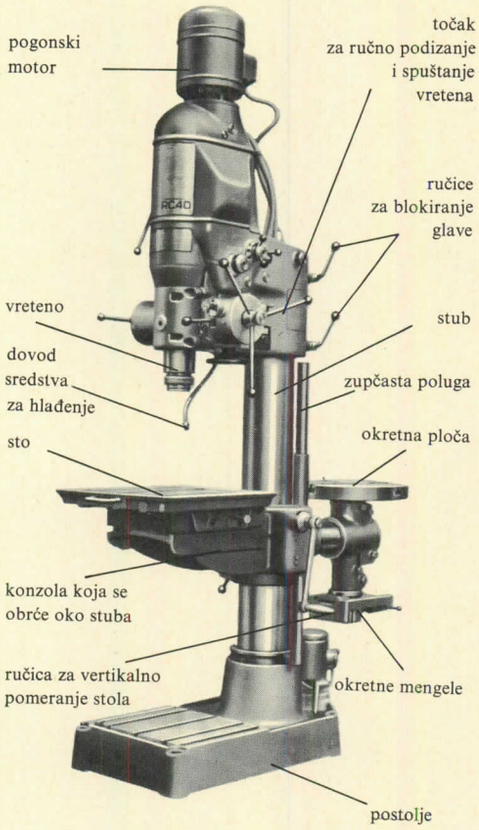
Fot. Bazaine-Photo. (Doc. Ernault-Somua).



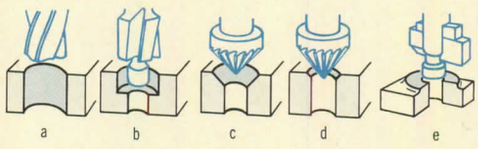
Sl. 39
Vođenje vretena za bušenje:
a, glavno kretanje; *b*, pomoćno kretanje.



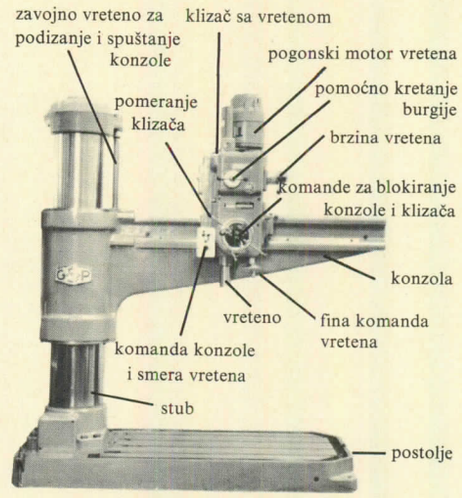
Sl. 42 — Bušilica sa postoljem.



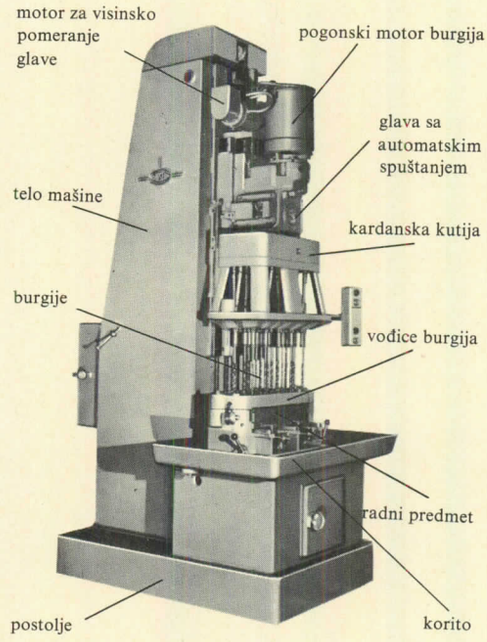
Sl. 40 — Stubna bušilica.



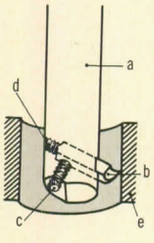
Sl. 44 — Primeri radova proširivanja: *a*, proširivanje prethodno probušenih rupa; *b*, vertikalno upuštanje; *c*, konusno upuštanje; *d*, obrezivanje otvora; *e*, usecanje površina oslonca.



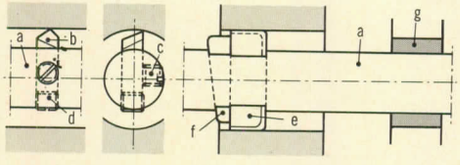
Sl. 41 — Radijalna bušilica.



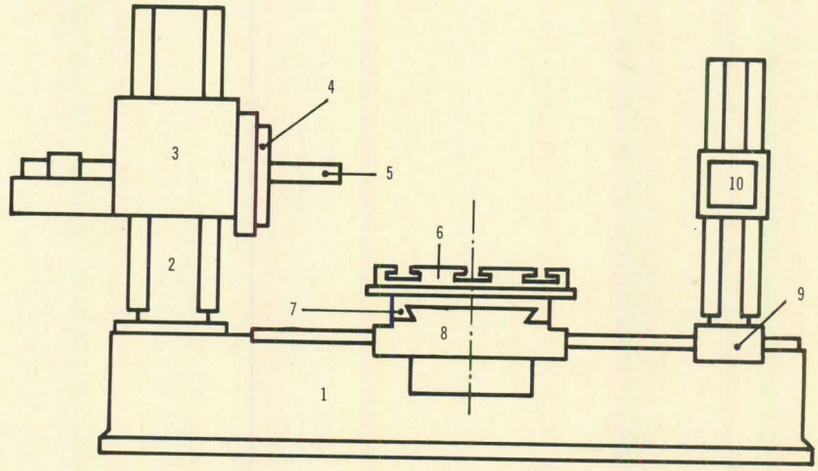
Sl. 43 — Viševretena bušilica.



Sl. 45 — Nasađeni proširivač bez oslonca za kratku obradu: *a*, nasađeni proširivač; *b*, nož za bušenje (alat); *c*, zavrtanj za blokiranje; *d*, zavrtanj za podešavanje; *e*, radni predmet.



Sl. 46 — Proširivač sa vođenjem za dugačku obradu: *a*, nasađeni proširivač sa vođenjem; *b*, nož za bušenje; *c*, zavrtanj za blokiranje; *d*, zavrtanj za podešavanje; *e*, nož sa dvostrukim sečivom; *f*, klin za blokiranje; *g*, ležište vođice.



Sl. 47 — Princip horizontalne mašine za proširivanje sa nepomičnim stubom:
1. postolje; 2. stub; 3. klizač sa vretenom; 4. ploča; 5. vreteno; 6. sto; 7. poprečni klizač; 8. uzdužni klizač; 9. oslonac ležišta; 10. ležište.

Fot. Forges et Aciéries du Saut-du-Tarn (2), G. S. P., Constant.

ručno, spuštanjem vretena pomoću *ručice* učvršćene na ozubljenom točku ili zupčaniku koji pokreće zupčastu polugu. Kazaljka koja se pomera po skali ili bubnju sa podeocima pokazuje dubinu bušenja. Glavno kretanje se dobija obrtanjem vretena pomoću *višestepenog klinastog prenosa* sa trapeznim kaišem koji se pomera po vretenu posredstvom *ožlebljenog vratila*. Brzina obrtanja veoma je velika: kod nekih mašina može da dostigne 18.000 o/min.

Stubna bušilica naziva se i *bušilica sa nepomičnom glavom (sl. 40)* i sastoji se uglavnom od *postolja* učvršćenog za pod radionice, na kome se nalazi vertikalni *stub* visok oko 2 m. Na gornjem delu stuba je *glava bušilice*, slična onoj kod stone bušilice, ali veća i teža. Ova glava sadrži ranije opisane elemente, obično dopunjene *prenosnikom* i *mehanizmom za automatsko pomoćno kretanje*, koji se stavlja u pogon pomoću spojnice. Ovaj prenosnik omogućava da se unapred odabere najpogodnija brzina pomoćnog kretanja s obzirom na rad koji treba da se izvrši. Pomoćno kretanje može da se izvodi i ručno, delovanjem na jednu ručicu, kao kod stone mašine.

Ako je radni predmet malih dimenzija, on se stavlja na *sto bušilice* koji se pomera po stubu. Kada se sistem za brzo blokiranje oslobodi, ovaj sto može da se pomera duž stuba i da se okreće oko njega. Ako je radni predmet jako velik, sto se okreće za pola kruga i dolazi u položaj iza stuba, tako da radni predmet može da se učvrsti direktno na postolje. Ove mašine mogu da se koriste za bušenje rupa prečnika do 30-40 mm.

Mašine čiji su stolovi pomerljivi samo po visini koriste se jedino za obradu predmeta koji se lako premeštaju. Radnik pomera predmet po stolu mašine dok pod burgiju ne dovede upravo ono mesto koje želi bušiti. Ponekad je ova operacija olakšana upotrebom vođice za bušenje.

Radijalna bušilica. Radijalne bušilice posebno su namenjene bušenju teških i kabastih predmeta. Predmet se dobro učvršćuje za sto, a alat se dovodi u položaj za bušenje kružnim, poprečnim i vertikalnim pomeranjem. Osnovni delovi radijalne bušilice *(sl. 41)* su postolje na kome je učvršćen *stub* velikog poprečnog preseka, koji nosi veoma snažnu horizontalnu ruku — *konzolu*. *Klizač sa glavnim vretenom* (nosač alata) pomera se duž ove radijalne konzole, koja može da pravi potpuni krug oko stuba. Tako burgija može da se dovede u bilo koji položaj u zamišljenom cilindru čiju bi osu predstavljao stub, a poluprečnik bi mu bio jednak dužini konzole.

Izvesne radijalne bušilice, tzv. *univerzalne bušilice*, tako su konstruisane da glava bušilice može da se okreće oko horizontalne ose, bilo obrtanjem ove glave u odnosu na konzolu, bilo obrtanjem same konzole.

Kada su predmeti koji se buše relativno mali, učvršćuju se na stolu mašine; sto je pričvršćen za stub bušilice i može se okretati oko njega, a kod nekih bušilica može i da se nagne obrtanjem oko horizontalne osovine.

Kada su predmeti koji se obrađuju jako veliki, učvršćuju se ili direktno na postolje mašine ili se stežu na stolu usađenom u betonski blok koji je ukopan u pod radionice, a nalazi se pored mašine.

Kod radijalne bušilice vreteno se spušta automatski, pomoću mehanizma koji se pokreće elektromotorom posredstvom prenosnika. Na velikim radijalnim bušilicama i druga kretanja su automatska, naročito pravolinijsko pomeranje klizača sa burgijom po horizontalnoj konzoli, kao i vertikalno kretanje ove konzole.

Bušilica sa postoljem. Bušilica sa postoljem *(sl. 42)* predstavlja jedno robustno rešenje stubne bušilice. Stub je ovde zamenjen jednim postoljem u obliku suda, ižlebljenog sa unutrašnje strane, od liva ili zavarene konstrukcije. Ovo postolje ima napred dve *vodice* koje omogućavaju vertikalno pomeranje *konzole* koja nosi sto.

Mašina je slična vertikalnoj glodalici, sa izuzetkom mehanizma za pomoćno kretanje, koje se ovde vrši aksijalnim pomeranjem vretena, a ne pomeranjem stola kao kod glodalice. Kao i glodalica, ova mašina ima prenosnik koji omogućava da se dobije široki opseg različitih brzina obrtanja i pomoćnih kretanja. Sto se uvek može pomerati po visini, a kod usavršenih tipova stolovi su takođe pokretni u uzdužnom i poprečnom smeru.

Vertikalna bušilica sa više vretena namenjena je uglavnom serijskoj proizvodnji predmeta sa više rupa.

Redna bušilica ima oblik jednog *postolja* sa velikim, izduženim *stolom*, iznad koga je učvršćen na zajedničkom, horizontalnom *osloncu* veći broj *glava*. Pomeranjem radnog predmeta od vretena do vretena mogu u istom predmetu da se buše rupe različitih prečnika bez menjanja burgije.

Viševretena bušilica (sl. 43) ima *glavu* sa velikim brojem paralelnih vretena koja se obrću istovremeno. Ova glava je učvršćena za postolje posredstvom dveju vođica, a pomoćno kretanje se dobija pomeranjem čitave glave. Sve rupe se buše istovremeno.

Pokretna bušilica. Ova mašina se koristi za radne predmete koji nisu pokretni. Ona uvek ima veoma ograničen kapacitet i pogodna je skoro isključivo za opravke. Njen pogon može da bude električni ili pneumatski.

PROŠIRIVANJE

PRINCIP. Proširivanje je operacija završne obrade čiji je zadatak da obezbedi potreban kvalitet i tačno propisanu unutrašnju dimenziju obrtnih površina prethodno dobijenih bušenjem, probijanjem, kovanjem ili livenjem *(sl. 44)*. Ovako obrađene površine najčešće su cilindrične, ali mogu da budu i konusne ili bilo kakvog drugog oblika.

NAČIN RADA. Proširivanje može da se izvede:

— strugarskim alatom, pri čemu se radni predmet stavlja u stezač;

— proširivačem nasađenim na vreteno;

— razvrtačem, ručno ili mašinski.

Ovi metodi koriste suštinski različite alate. Međutim, gotovo u svim slučajevima alat se obrće oko ose koja se strogo poklapa sa osom proširivanja koje treba izvršiti i kreće se po ovoj osi, suprotno alatu glodalice koji se gotovo uvek kreće upravno na pravac sopstvene ose.

PROŠIRIVANJE NA STRUGU. Ovaj metod se preporučuje za radove u malim serijama, zbog niske nabavne cene alata. Međutim, on se može koristiti samo ako je prečnik predmeta koji se proširuje dovoljno velik i ako je odnos L/D mali (L je dužina na kojoj se izvodi proširivanje).

Tačnost zavisi, naravno, od kvaliteta struga koji se koristi. Vertikalni strugovi su pogodni za operacije proširivanja pošto je deo alata koji nema oslonca manji.

PROŠIRIVANJE POMOĆU NASAĐENOG PROŠIRIVAČA. Nasađeni proširivač je čelično vreteno na kome je učvršćen jedan ili više alata koji se nazivaju *noževi za bušenje;* njihov položaj može da se podesi *(sl. 45. i 46)*. Ovo vreteno se ravnomerno obrće oko svoje ose takvom brzinom da linearna brzina alata bude jednaka optimalnoj brzini rezanja. Zavisno od mašine koja je povezana sa nasađenim vretenom, pomoćno kretanje se dobija pomeranjem radnog predmeta ili alata. Nasađeni proširivač može da se postavi na strug, bušilicu, glodalicu ili mašinu za razvrtanje.

Postavljanje na paralelni strug. Nasađeni proširivač postavlja se u stezač struga, a radni predmet se učvršćuje na klizač, umesto nosača alata. Pomoćno kretanje se dobija uzdužnim pomeranjem radnog predmeta. Nasađeni proširivač može da bude bez oslonca, ali njegov prednji kraj obično se oslanja na šiljak ili vođicu.

Postavljanje na bušilicu ili glodalicu. Nasađeni proširivač se učvršćuje u nosač alata — stezač; u slučaju bušilice, pomoćno kretanje se dobija aksijalnim pomeranjem proširivača.

Postavljanje na mašinu za proširivanje. Izvesne mašine su specijalno konstruisane za obradu sa nasađenim proširivačem. Iako se nazivaju *mašine za proširivanje*, one mogu podjednako da se koriste kao glodalice i bušilice, otuda i njihov komercijalni naziv *glodalice-bušilice-mašine za proširivanje*. To su veoma precizne mašine koje mogu da se klasiraju na sledeći način:

Mašina za proširivanje sa nepomičnim stubom i pokretnim stolom. Klizač sa nosačem vretena pomera se po vertikalnom stubu, pri čemu sto na kome je učvršćen radni predmet može da se okreće samo u uzdužnom i poprečnom smeru *(sl. 47)*.

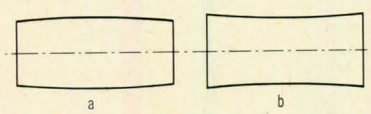
Za mašine ove vrste sa vertikalnim vretenom pomoćno kretanje se ostvaruje spuštanjem vretena.

Za mašine sa horizontalnim vretenom pomoćno kretanje može da se ostvari bilo pomoću vretena bilo pomoću stola.

Mašina sa nepomičnim stolom i pokretnim stubom. Ove mašine podsećaju na glodalice istog tipa, i to su veoma često kombinovane mašine za *proširivanje-glodanje*. Obično se koriste za obradu veoma teških ili kabastih predmeta. Radni predmet se steže na nepomični sto koji je kod jako velikih mašina usađen u betonski blok izliven u podu radionice, pored same mašine. Kretanja se dobijaju aksijalnim pomeranjem vretena, vertikalnim pomeranjem klizača sa vretenom i poprečnim pomeranjem stuba.

Mašina sa pokretnim stolom i pokretnim stubom. Ovo je univerzalna mašina, konstruisana tako da omogućava sva kretanja koja su opisana kod dveju prethodnih mašina.

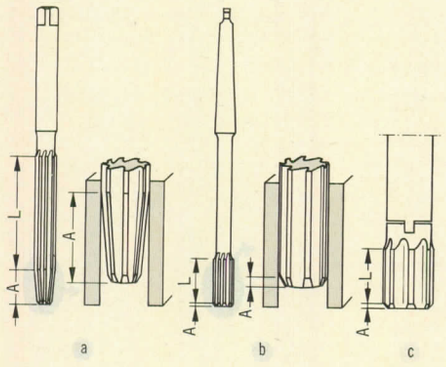
Specijalna mašina za proširivanje. Postoje i druge vrste mašina za proširivanje, koje su specijalno prilagođene serijskoj obradi određenih predmeta (cilindričnih blokova motora, motorskih osovina itd), ili proizvodnji izuzetno složenih i kompleksnih predmeta. U poslednjem slučaju koristi se mašina za proširivanje — univerzalna glodalica, sa pokretnim i obrtnim stubom i vretenom koje može da se različito usmerava. Na svim ovim mašinama najčešće se upotrebljava pomoćno kretanje alata; to su ujedno i najpreciznije mašine. Postignuta tačnost zavisi od čvrstoće nasađenog proširivača, čije savijanje treba po svaku cenu izbeći, jer izaziva greške — ispupčenja i udubljenja *(sl. 48)*. Treba izbeći vibriranje vretena i pored njegove velike dužine.



Sl. 48— Greške obrtnih cilindričnih predmeta: *a*, ispupčena površina; *b*, udubljena površina.

PROŠIRIVANJE RAZVRTAČEM. Ova tehnika se koristi samo za završnu obradu, i to za prečnike do približno 50 mm. Alati su neka vrsta glodača ili burgija sa bočnim sečivima, izrađeni od brzoreznog čelika ili od čelika — sa povratnim oštricama od brzoreznog čelika ili karbida *(sl. 49)*. Obrada može da se vrši ručno, i razvrtač je u tome slučaju učvršćen u nosač. Ova tehnika obrade koristi se samo pri završnoj obradi predmeta koji se izrađuju u vrlo malim serijama. Najčešće se razvrtač učvršćuje u stezač mašine alatke tipa bušilice, glodalice ili mašine za razvrtanje.

Zavojni razvrtači *(sl. 50)* podsećaju po spoljnjem izgledu na burgije, ali nemaju vrhova. Pored toga,



Sl. 49 — Razvrtači:
a, ručni, sa dugačkim sečivima (L) i dugačkim konusnim početkom (A); *b*, mašinski, sa dugačkim sečivima (L) i kratkim konusnim početkom (A); *c*, nasadni.

sečiva su bočna, a ne čeona. Zahvaljujući postojanju tri ili četiri bočna sečiva i isto tolikom broju zavojnica za vođenje, odstranjuje se izdužavanje rupa i znatno poboljšava kvalitet obrađene površine.

UREZIVANJE

DEFINICIJA. Urezivanje je operacija koja se sastoji u izradi unutrašnje zavojnice trougaonog preseka u cilindričnoj površini predmeta koji je prethodno izbušen; u ovakvu rupu uvrće se zavrtanj.

IZRADA ZAVOJNICE. Operacija urezivanja može da se izvede na strugu ili ručno, upotrebom odgovarajućeg alata, kao i pomoću jedne mašine alatke koja se naziva *mašina za urezivanje*. Kod rupa velikog prečnika operacija se naziva *unutrašnje narezivanje* — ukoliko se izvodi na strugu, pomoću strugarskog alata ili češljastog noža *(sl.* 51).

Ručno urezivanje. Pri ručnom urezivanju koriste se — jedan za drugim — tri donekle različita alata koji se nazivaju *urezač za grubo, poluzavršno i završno urezivanje* (sl. 52). Sva tri alata predstavljaju zavrtnje od brzoreznog čelika, pomalo konusne na svom prednjem delu; zadnji deo urezača nema zavojnicu i obrađen je kao kvadrat. Ovaj zavrtanj ima tri uzdužna žleba, ravnomerno raspoređena po obimu zavrtnja, koji stvaraju tri sečiva na bočnoj ravni urezača. Ovi žlebovi su najčešće ravni, a ponekad su zavojno uvijeni. U svakoj tački ovih sečiva može se pronaći grudni i leđni ugao kao i kod ostalih alata. U zavisnosti od obrađivanog materijala koriste se urezači čiji su leđni uglovi različiti *(sl.* 53). Da bi se obezbedilo vođenje urezača u prethodnoj rupi, leđni ugao je uvek ravan nuli. Posledica ovoga je jako trenje između grudne površine alata i radnog predmeta. Zato je uvek potrebno podmazivanje uljem i rad sa malim brzinama rezanja.

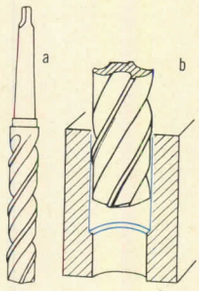
Urezač za grubo urezivanje je dosta izdužen, kako bi mogao da uđe u prethodnu rupu i da obezbedi postupnost urezivanja. Pored toga, trougaoni zubi ovog urezača su zatupljeni na približno 2/3 visine preseka.

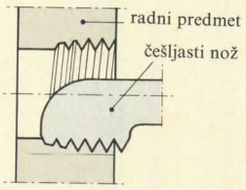
Urezač za poluzavršno urezivanje je analogan prvom, ali je manje izdužen i zubi su mu zatupljeni samo na jednoj trećini visine preseka.

Urezač za završno urezivanje je veoma blago upušten na svome kraju i zubi mu nisu zatupljeni.

Ovi urezači se učvršćuju sukcesivno u centru dvostruke ručice koja se naziva *okretač*. Kada je učvršćen u ovoj ručici, urezač za grubo urezivanje uvodi se u prethodnu rupu i uz naizmenično kretanje desno i levo, postepeno se okreće sve više udesno, dok ne prodre kao zavrtanj u prethodnu rupu. Zatim se postupa na isti način i sa ostala dva urezača.

Sl. 50
Zavojni razvrtač:
a, mašinski;
b, način rada.





Sl. 51 — Unutrašnje narezivanje na strugu sa češljastim nožem.

Urezivanje na mašini. U ovom slučaju koristi se specijalni urezač, učvršćen u glavu za urezivanje. Ova glava omogućava da urezač u fazi obrade ide napred okrećući se udesno, a u fazi rasterećenja da se vraća nazad obrtanjem ulevo. Vraćanje je obično brže od kretanja napred.

Neke glave za urezivanje mogu da se učvrste na osetljive bušilice.

Mašinski urezač je konusan u svome početnom delu, sa jako zatupljenim zubima, dok je zadnji deo potpuno cilindričan, sa zubima koji nisu zatupljeni.

NAREZIVANJE

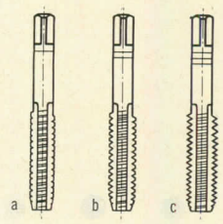
Narezivanje je operacija koja se sastoji u izradi zavojnice na cilindričnoj površini nekog obrtnog predmeta; njen cilj je da se dobije zavrtanj, narezana šipka ili narezani prsten. Narezivanje je *spoljnje (sl.* 54) ili *unutrašnje (sl.* 55) prema tome da li je posredi spoljnja ili unutrašnja cilindrična površina radnog predmeta. Obe operacije se izvode na strugu za narezivanje.

Spoljnje narezivanje može da se vrši i pomoću *narezača (sl.* 56). To je alat koji je komplementaran sa urezačem. On se sastoji od jednog prstena od brzoreznog čelika koji ima rupu sa urezanom zavojnicom, koja je konusna na jednom kraju, čija je unutrašnja površina ispresecana sa tri ili četiri žleba koji obrazuju isto toliko sečiva. Prsten je rasečen u radijalnom pravcu, a na spoljnjem cilinričnom delu ima žleb. Narezač se učvršćuje u tzv. *nosač narezača (sl.* 57), a šiljasti završetak zavrtnja za blokiranje ulazi u pomenuti žleb, sprečavajući obrtanje narezača u njegovom nosaču.

Da bi se narezala cilindrična šipka, postupa se kao i pri urezivanju, pri čemu se narezač navrće na cilindričnu šipku svojim konusnim delom, a sečiva otkidaju strugotinu koja odgovara šupljem prostoru između zuba.

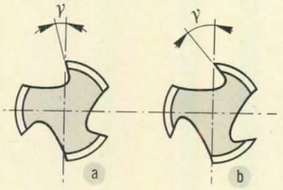
Kada se predmeti narezuju serijski, radi se na mašini za narezivanje. Narezač je učvršćen u stezač mašine, čija je brzina obrtanja mala i može da se podešava. Predmet koji se narezuje učvršćen je u mengele spojene sa klizačem; ovaj se približava narezaču tako da predmet prodire u njega kao zavrtanj u navrtku.

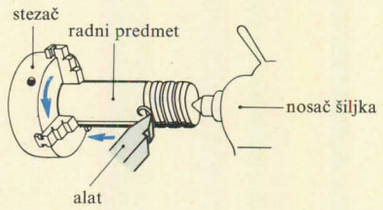
Narezivanja velikih predmeta mogu se izvoditi glodanjem i brušenjem, koristeći se jednoprofilnim ili višeprofilnim glodalicama i tocilima. Na kraju, da bi se izvršila spoljna narezivanja u vrlo velikim serijama, pristupa se narezivanju kotrljanjem ili valjanjem, pomoću *ožlebljenih ploča* ili *valjaka*



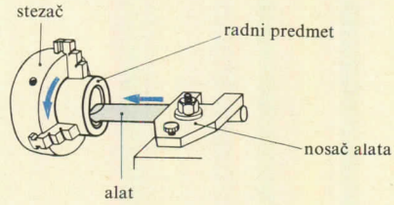
Sl. 52 — Ručni urezači:
a, za grubo urezivanje;
b, za poluzavršno urezivanje;
c, za završno urezivanje.

Sl. 53
Presek urezača:
a, za čelike, sa malim grudnim uglom;
b, za lake legure, sa velikim grudnim uglom odvođenja.

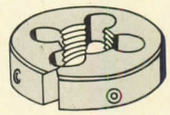




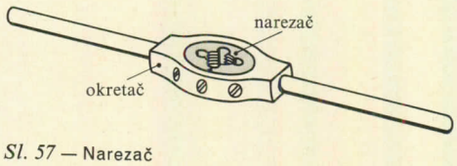
Sl. 54 — Spoljnje narezivanje na strugu sa alatom za narezivanje.



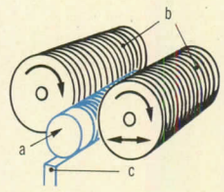
Sl. 55 — Unutrašnje narezivanje na strugu sa alatom za narezivanje.



Sl. 56.
Narezač.



Sl. 57 — Narezač sa okretačem.



Sl. 58
Valjanje zavojnice valjcima:
a, radni predmet;
b, valjci;
c, oslonac.

(sl. 58) koji se postavljaju na odgovarajuće mašine. Ovde je reč o postupku obrade deformacijom materijala, bez skidanja strugotine.

BRUŠENJE

PRINCIP. Brušenje je operacija obrade pomoću tocila koje ima brižljivo poravnate površine; ono je učvršćeno na glavno vreteno mašine alatke sa veoma preciznim glavnim i sporednim kretanjem. Skidanje materijala pri obradi vrši se samo abrazijom.

Nekada je brušenje predstavljalo uglavnom operaciju završne obrade, dok danas u nekim slučajevima zamenjuje obradu na strugu, kratkohodnoj i dugohodnoj rendisaljci ili glodalici.

Brušenje se koristi pri završnoj obradi mašinskih delova, posle termičkih postupaka (kaljenje i otpuštanje ili cementacija i kaljenje), kao i kod onih predmeta koje bi bilo teško ili nemoguće obraditi klasičnim alatima. Brušenje se takođe nameće kao postupak pri obradi vrlo tvrdih predmeta kod kojih višak materijala može da se skine samo upotrebom tocila i da se na taj način predmet dovede do konačnih dimenzija; brušenje se koristi uvek kada je potrebno da se postignu uske tolerancije (0,01 do 0,001 mm) ili da se dobije dobar kvalitet obrađene površine.

Današnje mašine za brušenje ili *brusilice* omogućavaju da se složene obrade izvode serijski, uz gotovo potpunu automatizaciju i da se nekvalifikovanim radnicima povere poslovi koji su donedavno zahtevali visokokvalifikovanu radnu snagu.

METODE BRUŠENJA. Kod svih metoda tocilo se obrće velikom brzinom oko svoje ose, i generatrisa površine koja se brusi dobija se spregnutim kretanjem radnog predmeta i tocila.

BRUŠENJE RAVNIH POVRŠINA. Ono se koristi uglavnom za dobijanje ravnih površina. Obrada može da se izvodi čeonom površinom tocila, saopštavajući stolu ili dovodeći stolu na kome leži radni predmet bilo naizmenično pravolinijsko bilo kružno kretanje. Ovaj način se naziva *ravno brušenje šupljim tocilom (sl.* 59). Najčešće se obrada vrši tangencijalno, upotrebom cilindrične površine tocila, pri čemu se stolu koji nosi radni predmet dovodi naizmenično pravolinijsko ili kružno kretanje. Ovo se naziva *ravno brušenje kolutastim tocilom (sl.* 60).

U oba slučaja tocilo i radni predmet izvode lagano poprečno kretanje u međusobnom odnosu kako bi se materijal skidao postepeno, po celoj obrađivanoj površini. Predmet se učvršćuje na sto mašine obično pomoću magnetne ploče.

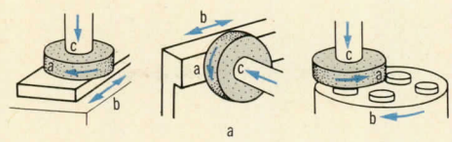
SPOLJNJE KRUŽNO BRUŠENJE. Koriste se dva postupka od kojih je jedan između šiljaka, a drugi bez šiljaka.

Postupak između šiljaka. Ovo je najjednostavniji metod, koji se primenjuje kod svih obrtnih predmeta; on omogućava da se izvede ili ponovi većina operacija spoljnje obrade koje se rade na strugu.

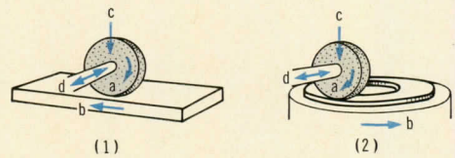
Cilindrični obrtni predmet koji treba da se brusi dobija prethodno na oba kraja jednu konusnu rupu ili centar, čija se osa strogo podudara sa osom cilindra koji se obrađuje. Zatim se predmet učvršćuje *(sl.* 61) između levog i desnog šiljka (kao na strugu) i stavlja u pokret pri smanjenoj brzini obrtanja (nekoliko obrtaja u minuti). Tocilo, koje se okreće veoma velikom brzinom i čija je osa strogo paralelna sa osom predmeta, primiče se tangencijalno predmetu, pri čemu obimne brzine imaju suprotan smer. Pored toga, izaziva se i naizmenično kretanje ili predmeta ili tocila, paralelno sa osom tocila *(sl.* 62), tako da tocilo može da priđe predmetu po celoj dužini. Kretanje koje nastaje između predmeta i tocila naziva se *spregnuto kretanje*.

Posle svakog uzdužnog pomeranja tocila izvodi se pomoćno kretanje primicanja koje predstavlja dubinu rezanja, tako da se uzastopnim prolazima alata na kraju dobija željena dimenzija.

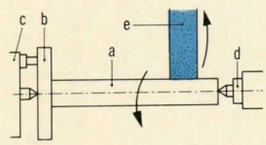
Ako je predmet obrtno čvrsto telo proizvoljnog oblika, primenjuje se radijalno brušenje. Tocilo se onda izrađuje tako da njegov profil tačno odgovara profilu predmeta koji treba brusiti. U tom slučaju kreće se samo tocilo u odnosu na predmet, dok uzdužno kretanje ne postoji.



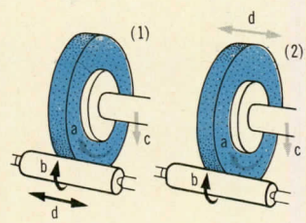
Sl. 59 — Ravno brušenje šupljim tocilom: *a*, glavno kretanje; *b*, pomoćno kretanje radnog predmeta; *c*, pomoćno kretanje primicanja.



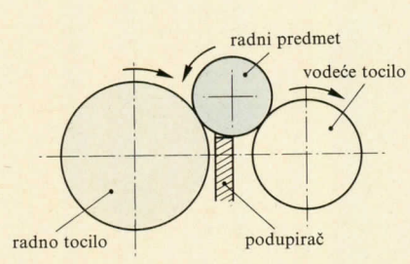
Sl. 60 — Ravno brušenje kolutastim tocilom: 1. naizmenično pravolinijsko kretanje stola; 2. kružno kretanje stola: *a*, glavno kretanje; *b*, pomoćno kretanje; *c*, pomoćno kretanje primicanja; *d*, pomoćno bočno kretanje.



Sl. 61 Spoljnje kružno brušenje između šiljaka: *a*, radni predmet; *b*, ploča za okretanje; *c*, ploča glave brusilice; *d*, nosač šiljka; *e*, tocilo.



Sl. 62 Kretanja pri kružnom brušenju: 1. pomoćno bočno kretanje radnog predmeta; 2. pomoćno bočno kretanje tocila: *a*, glavno kružno kretanje tocila pri kome se vrši obrada; *b*, obrtno kretanje radnog predmeta; *c*, pomoćno kretanje za podešavanje dubine rezanja (dubine primicanja); *d*, pomoćno bočno kretanje.



Sl. 63 — Spoljnje brušenje bez šiljaka.

Postupak bez šiljaka. Ovaj metod, koji se ranije primenjivao samo za predmete u obliku obrtnog cilindra, danas se sve više koristi. On omogućava brušenje predmeta dugačkih više metara, dakle, takvih koji ne mogu da se bruse između šiljaka; dalje, uz veoma nisku cenu koštanja, bruse se sve vrste serijskih predmeta koji ne bi smeli da se obrađuju na običnoj cilindričnoj brusilici jer je vreme pripreme tih mašina često veće od vremena proizvodnje. Ovaj postupak se primenjuje i za spoljnje i za unutrašnje brušenje. Od pre nekoliko godina on se koristi i za brušenje zavojnica i obrtnih predmeta koji imaju upore ili su proizvoljnog profila; tada se primenjuje radijalno brušenje.

Mašina *(sl.* 63) se sastoji od:

— tocila velikog prečnika koje se naziva *radno tocilo;*

— manjeg tocila, tzv. *vodećeg tocila;*

— *podupirača* od tvrde legure, postavljenog između ova dva tocila, na koji se postavlja radni predmet tako da njegova osa bude nešto uzdignuta u odnosu na ose tocila.

Radni predmet se ne drži na svojoj osi; on se jednostavno naslanja na poduparač i okreće u smeru suprotnom od dvaju tocila — radnog i vodećeg — koja se okreću u istom smeru.

Radno tocilo se okreće brzinom koja je podesna za rad (obimna brzina: 25 do 30 m/sec). Vodeće tocilo, koje se okreće malom brzinom (20 do 40 o/min), određuje brzinu obrtanja predmeta. Ono ima sledeću ulogu:

— da održava položaj radnog predmeta prema radnom tocilu;

— da obezbeđuje obrtanje radnog predmeta;

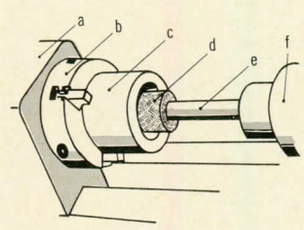
— da pri obradi cilindričnih predmeta nagibom svoje ose u odnosu na osu radnog tocila nametne radnom predmetu uzdužno kretanje, kako bi se brušenje ostvarilo po celoj dužini.

Kada je podešavanje odgovarajućih položaja dvaju tocila i podupirača dobro izvršeno, ovaj metod obezbeđuje preciznost reda veličine mikrona.

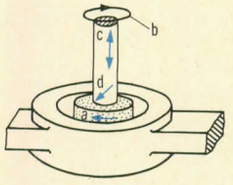
Kada je posredi dugačak cilindričan predmet, jedan od njegovih krajeva treba postaviti između dva tocila. Vodeće tocilo, koje okreće radni predmet, nameće mu uzdužno kretanje, tako da on ravnomerno prolazi celom svojom dužinom ispred radnog tocila.

BRUŠENJE UNUTRAŠNJIH OBRTNIH POVRŠINA. Unutrašnjim kružnim brušenjem obrađuju se cilindrični ili konusni otvori.

Čeono brušenje. Predmet *(sl.* 64) je učvršćen u stezač, čija se obrtna osa strogo podudara sa obrtnom osom predmeta, koji se polako obrće oko ove ose. Tocilo je učvršćeno na jedno veoma precizno vreteno koje se obrće velikom brzinom i čija je osa paralelna sa osom predmeta. Vreteno, koje može da se uzdužno pomera, prodire u otvor predmeta sa strane suprotne stezaču. Tako se glavno kretanje dobija obrtanjem vretena sa tocilom, a pomoćna kretanja obrtanjem predmeta i uzdužnim pomeranjem tocila.

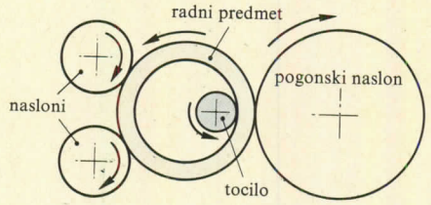


Sl. 64 Čeono brušenje unutrašnje obrtne površine: *a*, nosač radnog predmeta; *b*, stezač; *c*, radni predmet; *d*, tocilo; *e*, vreteno sa tocilom; *f*, nosač vretena.



Sl. 65
Kretanje kod planetarne brusilice:
a, glavno kretanje tocila;
b, obrtno kretanje vretena sa tocilom;
c, bočno pomoćno kretanje vretena sa tocilom;
d, pomoćno kretanje primicanja vretena sa tocilom.

Brušenje na planetarnim brusilicama. Ovaj metod *(sl. 65)* primenjuje se uglavnom kod većih radnih predmeta, kao što su blokovi motora. Predmet se učvršćuje na sto mašine; tocilo se okreće velikom brzinom oko svoje ose i pomera se uzdužno. Pored toga, ono se malom brzinom okreće oko još jedne ose, paralelno sa prvom. Ovim planetarnim kretanjem tocilo opisuje cilindričnu površinu koja se brusi.



Sl. 66 — Unutrašnje brušenje bez šiljaka.

Unutrašnje brušenje bez šiljaka. Princip je analogan onome pri spoljnjem brušenju; mašina je, međutim, različita *(sl. 66)*. Vođenje se ostvaruje preko spoljnje površine predmeta, koja se celo vreme oslanja na pogodno raspoređene naslone. Jedan od ovih naslona služi za pogon. Tocilo je postavljeno na kraj vretena koje se obrće velikom brzinom i brusi unutrašnjost predmeta, sa strane pogonskog naslona. Smerovi obrtanja su takvi da se tocilo i predmet vrte u istom smeru.

Na taj način se bruse udubljenja za kuglične ležaje.

Specijalni postupci obrade

OPŠTI POJMOVI

Kao dopuna tradicionalnim metodima obrade pomoću alata za rezanje koriste se i novi metodi pri kojima se materijal skida sa predmeta koji se oblikuje a da pri tom nije izložen mehaničkim naprezanjima. Osim toga, koeficijent skidanja materijala obično ne zavisi od tvrdoće predmeta koji se obrađuje. Ovi metodi dozvoljavaju da se na ekonomičan način izvedu radovi koje je teško ili nemoguće ostvariti klasičnim postupcima. Oni se naročito koriste pri obradi visokotopivih legura (čelik sa molibdenom, kobaltom itd.), materijala visoke tvrdoće (kaljeni čelici, metalni karbidi itd.), krtih materijala (keramika, grafit, staklo itd.), kao i za neke specijalne precizne obrade (bušenja čije su poprečne dimenzije reda veličine svega 1/100 mm).

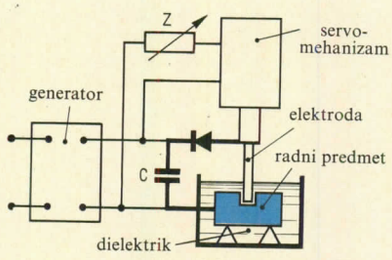
OBRADA ELEKTROEROZIJOM

PRINCIP. Obrada elektroerozijom je postupak zasnovan na varničenju, pri čemu se radni predmet vezuje na pozitivni pol polarizovanog impulsnog strujnog generatora, čiji je maksimalni napon na izlazu obično niži od 60 V *(sl. 67)*. Elektroda-alat, napravljena od materijala koji su dobri toplotni i električni provodnici (bakar, mesing ili sinterovani materijali na bazi volframa-bakra) učvršćena je u jedan servo-mehanizam pomoću koga se održava na konstantnom rastojanju od radnog predmeta. Ovo rastojanje se menja od 0,002 do 0,1 mm zavisno od režima obrade. Sklop elektroda — radni predmet i elektroda — alat potapa se u dielektričnu tečnost, koja se sastoji obično od smeše ugljovodonika sa različitim dodacima, čiji je zadatak da smanje viskoznost i poboljšaju kvašenje. Polarizovana pražnjenja koja stvara impulsni generator odgovaraju nizu uzastopnih, isprekidanih lukova, čije je trajanje reda veličine od 1 — 1000 mikrosekunda; interval koji razdvaja dva uzastopna impulsa menja se u vremenu koje je 10 do 100 puta veće od trajanja impulsa. Ovi lukovi se stvaraju bilo eksplozivnom sublimacijom male dodirne zone, bilo hladnom emisijom elektrona na onom kraju katodne protuberance koji je najbliži površini anode. Ovako dobijeni elektroni padaju na anodu sa kinetičkom energijom jednakom (u elektron-voltima) razlici potencijala između elektroda. Kao rezultat, dolazi do lokalnog isparavanja sa anode i alat postupno prodire u predmet, nezavisno od tvrdoće materijala koji se obrađuje *(sl. 68)*. Oblik anode se reprodukuje kao udubljenje u radnom predmetu koji se oblikuje, a materijal koji se skida nalazi se u obliku malih kuglica kao suspenzija u dielektričnoj tečnosti.

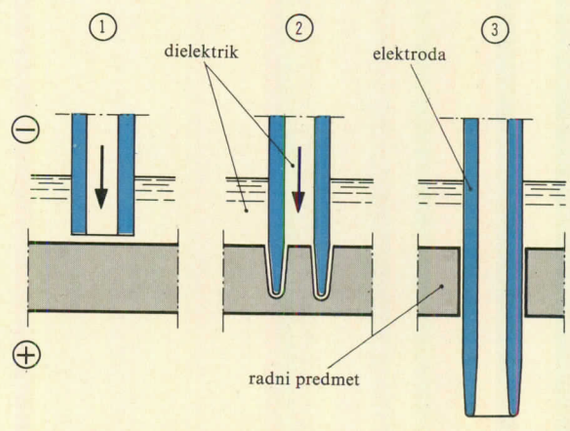
MOGUĆNOSTI. U principu, elektroerozijom mogu se obrađivati svi metalni materijali koji se koriste za izradu alata. Međutim, praktični značaj metoda ograničava se na oblikovanje predmeta od tvrdih metala, kaljenih čelika, superlegura i visokotopljivih čelika, uopšte, svih materijala koji su provodnici, a teško ih je ili nemoguće obrađivati klasičnim postupcima. U početnom režimu rada, pomoćno kretanje elektrode — alata je praktično konstantno i blisko vrednosti približno 1 — 1,5 mm/min. Ova brzina ne zavisi od radne površine sve dok ova ne dostigne neku graničnu vrednost koja je funkcija snage upotrebljenog generatora. Kvalitet površine je osrednji, tačnost takođe. U završnom režimu koeficijent skidanja materijala je 0,2—0,3 cm^3/min. U režimu superfiniša ovaj koeficijent je vrlo nizak, reda veličine svega 1 mm^3/min, ali je kvalitet površine visok. Ako se radi uzastopno sa različitim elektrodama i pri različitim režimima obrade, može se postići tačnost od približno 1/100 milimetra. U izvesnim slučajevima uspeva se upotrebom mašina velike preciznosti raditi sa tolerancijom od nekoliko mikrona.

Mnogi proizvodni problemi, takođe, mogu da se rešavaju elektroerozijom. Obrada je relativno spora, ali mašine rade automatski i obrađuju predmete serijski. Za obradu rupa malog prečnika (do 1/10 milimetra) i velike dubine (nekoliko desetina santimetara), koriste se mašine čija se elektroda sastoji od žice koja se obrće oko svoje ose i održava pomoću vođice na približno 1 mm od gornje površine radnog predmeta.

Na istom principu izrađene su i mašine za glodanje, urezivanje i narezivanje. Moguće je obrađivati i predmete proizvoljnog oblika, pod uslovom da je moguće izraditi elektrodu — alat takvog oblika koji dozvoljava da se ova približi — pomoću bilo kojeg mehanizma — zonama materijala koje treba da se obrade. Ovaj mehanizam se uvek lako izrađuje, pošto elektroda — alat ne prouzrokuje, praktično, nikakvo naprezanje predmeta koji se obrađuje i pošto se alat ne obrće. Na taj način se oblikuju rotori turbina u blokovima visokotopljivog čelika.



Sl. 67 — Princip mašine za obradu elektroerozijom.



Sl. 68 — Bušenje otvora proizvoljnog preseka elektroerozijom: 1. pre obrade; 2. režim grube obrade; 3. režim završne obrade.

PREDNOSTI I NEDOSTACI. Iako ima svega nekoliko godina da je izašla iz laboratorijskih okvira, obrada elektroerozijom našla je mnogobrojne primene u proizvodnim preduzećima i ova tehnika je veoma brzo zauzela značajno mesto, najpre u alatnicama, a zatim i u proizvodnim radionicama.

Njene *prednosti* u odnosu na klasične postupke su mnogobrojne:

— brzina obrade je praktično nezavisna od tvrdoće materijala koji se obrađuje;

— elektroda — alat ne ispoljava nikakvo mehaničko dejstvo na radni predmet i ne izaziva nikakvu njegovu deformaciju;

— prilikom obrade, predmet koji se oblikuje nije izložen toplotnim udarima, tako da nema unutrašnjih napona niti promena kristalne strukture;

— obrada je automatska;

— postiže se odličan kvalitet površinske obrade;

— elektroda — alat napravljena je od materijala koji se lako obrađuje (bakar, mesing itd.), često dobijenog metalizacijom, ponekad livenjem u kalupe.

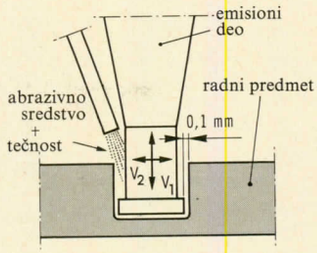
Nedostaci su svojstveni samoj prirodi postupka:

— Osnovni nedostatak je postupno habanje elektrode; ono je veoma veliko u početnom režimu (relativno habanje može da ide do približno 30%), ali je gotovo neprimetno u završnom režimu; za bušenje rupa velike dubine, kružnog ili višeugaonog preseka, ovo rezultira u izvesnoj konusnosti obrađenih šupljina.

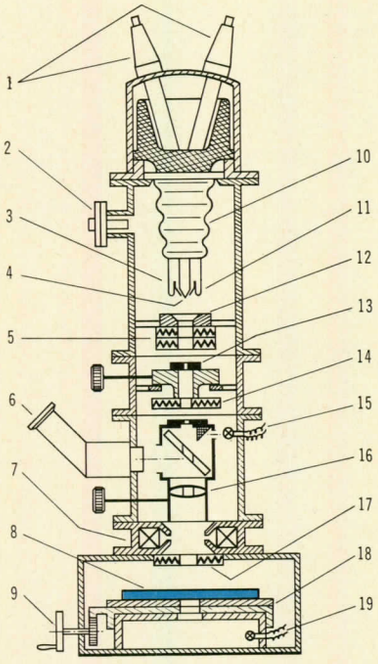
— Postupak je relativno spor; on ne može ni u kom slučaju da se takmiči sa tradicionalnim mašinama za obradu mekih materijala, kao što je, npr., meki čelik, sa izuzetkom nekih slučajeva veoma fine obrade.

OBRADA ULTRAZVUKOM

PRINCIP. Nasuprot obradi elektroerozijom, obrada ultrazvukom je u celini mehanički postupak *(sl.* 69). Alatu koji se oslanja na radni predmet dovode se uzdužne elastične vibracije, sa frekvencijom blizu 20.000 Hz i amplitudom koja se menja od 5/100 do 1/100 milimetra, uz konstantno opterećenje na mestu dodira radnog predmeta i alata; pritisak na mestu dodira je reda veličine 1 kg po kvadratnom milimetru poprečnog preseka alata. Na dodirnu površinu između predmeta i alata stavlja se neko sitnozrno abrazivno sredstvo, npr., karbid bora, silicijum-karbid, dijamantski prašak ili oksid aluminijuma suspendovan u nekoj hemijski čistoj tečnosti. Zrna abrazivnog sredstva deluju direktno na predmet koji se oblikuje, u koji alat postupno prodire. Tako se dobija udubljenje koje ima oblik alata. Kao i kod elektroerozije, brzina obrade raste ukoliko se ostvari proticanje tečnosti u radnoj zoni. Proticanjem tečnosti obezbeđuje se obnavljanje abrazivnih zrna i uklanjanje stvorene mikrostrugotine.



Sl. 69 — Shematski prikaz obrade jedne šupljine ultrazvukom:
V_1, efikasne uzdužne vibracije;
V_2, parazitske poprečne vibracije.



Sl. 70 — Shematski presek mašine za obradu elektronskim mlazom:

1. dovodi struje; 2. priključak za merenje vakuuma; 3. elektronski top; 4. vlakno elektronskog topa; 5. sistem fokusiranja pri podešavanju optičke ose; 6. prozor za posmatranje; 7. magnetno sočivo; 8. radni predmet; 9. ručica za pomeranje stola; 10. izolator; 11. katoda; 12. anoda; 13. dijafragma; 14. sistem za popravku putanje perifernih zraka; 15. osvetljenje za posmatranje predmeta koji se obrađuje; 16. objektiv prozora za posmatranje; 17. deflektor snopa; 18. radni sto; 19. osvetljenje profila radnog predmeta.

MOGUĆNOSTI. U principu svi materijali mogu da se obrađuju pomoću ultrazvuka, nezavisno od njihove električne ili toplotne provodljivosti. Obrada je utoliko lakša, ukoliko je materijal koji se obrađuje tvrđi, krtiji i lomljiviji. Praktično, ovaj postupak se ograničava na staklo, porculan, grafit, ferit, germanijum, silicijum, veštačko i prirodno drago kamenje. U širem smislu, on se primenjuje na sve tvrde i lomljive izolatore, dok se provodnici obrađuju prvenstveno elektroerozijom.

Tačnost je reda veličine 1/100 milimetra, a izuzetno može da bude i 5 μ. Da bi se postigle vrlo tačne obrade, izvodi se više uzastopnih prolaza, upotrebljavajući abrazivna sredstva sa sve sitnijim zrnom. U početku brzina obrade ostaje približno konstantna, a zatim veoma blago opada samo sa porastom dubine. Međutim, kada dubina postane veća od prečnika rupe, brzina obrade opada usled prigušivanja elastičnih talasa.

Naravno, brzina obrade je utoliko veća ukoliko je abrazivno sredstvo tvrđe i zrno krupnije, odnosno, tačnost obrade i kvalitet dobijene površine su bolji ukoliko je abrazivno sredstvo sitnije.

PREDNOSTI I NEDOSTACI. I jedni i drugi proističu iz same prirode postupka.

Prednosti su, pre svega, tehničke i ekonomske prirode:

— najvažnija je mogućnost obrade tvrdih i lomljivih tela, upotrebljavajući alat jednostavne izrade, obično od mekog čelika;

— obrada je automatska;

— ukupno opterećenje kojim alat deluje na predmet koji se oblikuje vrlo je malo i ne izaziva lomove ili deformacije radnog predmeta;

— ne dolazi do zagrevanja predmeta u toku rada niti do stvaranja mikropukotina ili unutrašnjih napona;

— na kraju, suprotno tradicionalnim postupcima, brzina obrade raste sa tvrdoćom i lomljivošću obrađivanog materijala.

Nedostaci su slični kao i pri elektroeroziji:

— alat se takođe haba, utoliko brže ukoliko je materijal koji se obrađuje čvršći; otuda potreba da se koristi više alata uzastopno da bi se postigla obrada vrlo velike preciznosti;

— brzina skidanja materijala obično je manja u odnosu na elektroeroziju, kao i maksimalna obradiva površina;

— na kraju, radni kapacitet mašina sa ultrazvukom, ukupno uzevši, niži je nego u mašina sa elektroerozijom. Teorijski, bilo bi moguće povećati brzinu obrade povećanjem frekvencije vibracija, jer to vodi porastu broja udara u jedinici vremena. Međutim, ako učestalost vibracija prekorači 25.000 Hz, prinos prostiranja ultrazvuka od magnetnog sočiva do alata opada, a energija elastičnih talasa koji stižu u prednji deo alata opada brže od porasta frekvencije vibracija.

OBRADA ELEKTRONSKIM SNOPOM

PRINCIP. Obrada elektronskim mlazom, koja se naziva još i obrada elektronskim bombardovanjem je noviji postupak oblikovanja materijala. Snop fino fokusiranih elektrona velike brzine, periodično isprekidan modulacijom, upravlja se na predmet koji se obrađuje; on je stavljen u komoru pod pritiskom manjim od 10^{-4} mm živinog stuba *(sl.* 70). Pod dejstvom toplote dobijene od kinetičke energije udarnih elektrona dolazi do otparavanja materijala u vakuumu, u zoni udara elektrona. Da bi se izbeglo zagrevanje celog predmeta, poboljšala tačnost obrade i povećala brzina otparavanja visokoenergetskim mlazom, elektronsko bombardovanje se periodično prekida. Elektroni se upućuju u zonu obrade u obliku impulsa velike energije, čije se trajanje može podesiti približno između 0,1 i 100 mikrosekundi pri maksimalnoj trenutnoj snazi od 1 kW. Prečnik fokusiranja za snopove koji su u upotrebi je reda veličine nekoliko mikrona. Najčešće je obrada potpuno automatizovana: pomeranje zone udara elektrona vrši se skretanjem snopa, slično kao kod televizijske cevi. Ovo delimično objašnjava dobijenu tačnost: pošto se postavljanje predmeta kontroliše direktno, optičkim putem, u celini se izbegavaju nesavršenosti mehaničkih komandi.

MOGUĆNOSTI. Većina materijala može da se obrađuje elektronskim bombardovanjem: i provodnici i izolatori. Kod izolatora, uklanjanje elektrona se vrši na površini. Mlaz elektrona deluje kao jedan veoma mali čeoni glodač. On skida sloj po sloj materijala. Pomeranjem zone udara moguće je glodati profile proizvoljnog oblika. Količina materijala koji se skida u jedinici vremena prilično je mala.

Obrada elektronskim bombardovanjem koristi se i za bušenje otvora vrlo malog preseka i velike dubine, dok je bušenje slepih rupa teže pošto unutrašnjost uvek ostaje zaobljena. Ono se takođe koristi za izradu uređaja za proizvodnju vlakana u industriji veštačkog tekstila, injektora, dijafragmi itd., kao i pri bušenju i glodanju pravog dragog i poludragog kamenja koje se koristi u industriji. Međutim, to je tehnika koja je, pre svega, namenjena proizvodnji submikroskopskih elemenata koji se koriste u elektronici: otpornici, diode, tranzistori itd.

PREDNOSTI. Obrada elektronskim snopom ima niz prednosti:

— ona se delimično takmiči sa elektroerozivnim postupcima i ultrazvučnom obradom, sa dve tehnike čije su prednosti slične (skidanje materijala praktično ne zavisi od njegove tvrdoće, a opterećenje kome je izložen radni predmet je zanemarljivo);

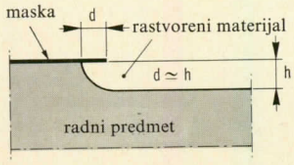
— ona omogućava da se fini radovi izvedu veoma precizno;

— međutim, glavna prednost ovog metoda je rad u vakuumu, koji štiti radni predmet od svih hemijskih uticaja i onemogućava kontaminaciju, čak i površinsku, sa atomima stranih tela iz okolne atmosfere, iz alata ili tečnosti za obradu.

HEMIJSKA OBRADA

PRINCIP. Hemijska obrada je postupak oblikovanja metalnih predmeta kontrolisanim hemijskim rastvaranjem u tečnoj sredini. Pošto se prethodno odmaste, predmeti se potapaju u hemijsko kupatilo, gde su izloženi nagrizanju po celoj površini. Kupatilo se pažljivo meša i održava na konstantnoj temperaturi, koja zavisi od postavljenog cilja: velika brzina nagrizanja ili dobar kvalitet površine. U slučaju delimične obrade, delovi predmeta koji treba da sačuvaju svoje prvobitne dimenzije štite se specijalnim lakom koji se naziva *maska.*

Za lake legure reagens za nagrizanje je soda, dok se za druge metale obično koriste kiseli rastvori. Međutim, kupatila su u praksi obično kompleksna, pošto moraju da uklone nedostatke do kojih je došlo usled naglog (bazičnog ili kiselog) nagrizanja materijala. Bilo kakva hemijska kupatila da se upotrebe, ona će istovremeno sa nagrizanjem u dubinu nagrizati i materijal ispod maske *(sl.* 71). Stoga o tome treba voditi računa prilikom stavljanja maske.



Sl. 71 — Shema hemijskog nagrizanja na ivici maske.

Stepenasta obrada predmeta zahteva upotrebu nekoliko maski uzastopno. Ponekad se vrši samo delimično potapanje obrađivanog predmeta. Moguće je takođe izraditi predmete čija se debljina postepeno menja; dovoljno je da se zaranjanje predmeta u hemijsko kupatilo vrši postupno.

MOGUĆNOSTI. Ova tehnika se naročito preporučuje pri skidanju metala sa velikih predmeta male debljine (koje je teško učvrstiti na sto mašine alatke), kao i pri skidanju malih količina metala sa vrlo velikih površina i sa predmeta koji imaju složen oblik.

Hemijska obrada može da se primeni za većinu metala i legura. U praksi, koristi se za aluminijum i njegove legure, zatim za legure magnezijuma, nerđajuće čelike, čelike visoke mehaničke i termičke otpornosti, titan, berilijum, cirkonijum, volfram, niobijum, molibden itd.

Zavisno od materijala koji se obrađuje i upotrebljenog hemijskog kupatila, brzina nagrizanja kreće se od 0,5 do 2 mm/čas. Ovo može da izgleda veoma sporo, ali hemijska obrada se vrši bez udela manuelnog rada i kada se uzme u obzir velika površina nagrizanja, vidi se da je brzina skidanja materijala često znatno veća od one koja se postiže na tradicionalnoj mašini. Npr., za nagrizanje površine od 6 m² količina materijala koji se skida iznosi 100—400 cm³/min, što je veoma mnogo.

Preciznost obrade u dubinu čvrsto je vezana sa debljinom skinutog materijala zbog nejednake brzine nagrizanja, koja uglavnom zavisi od lokalne strukture materijala. Ova tačnost se kreće između 1/10 i 1/100 milimetra.

Hemijska obrada se primenjuje, npr., pri smanjenju debljine udubljenja i ispupčenja na predmetima livenim ili kovanim u matricama. Otkivci i odlivci se izrađuju sa što manjom debljinom zida, a zatim potapaju u hemijsko kupatilo koje smanjuje dimenzije na željenu vrednost. Tako se dobijaju laganiji predmeti koje je nemoguće dobiti direktno. Ista tehnika se primenjuje pri dobijanju tankih limova (oko 1/10 milimetra) koji ne mogu da se valjaju direktno: polazeći od debelih limova, hemijskim stanjivanjem se dobijaju tanki limovi.

Ovaj metod danas ima široku primenu u radionicama za izradu avionskih ćelija i elemenata za vasionske letilice.

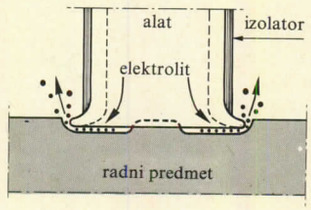
PREDNOSTI. Možda ih nema mnogo, ali su od vrlo velikog značaja:
— suprotno tehnici obrade elektroerozijom, ultrazvukom ili elektronskim bombardovanjem hemijska obrada zahteva vrlo jednostavnu opremu, a obradiva površina je ograničena jedino dimenzijama suda za uranjanje, što vodi praktično neograničenim koeficijentima skidanja materijala, izraženim u vidu zapremine u jedinici vremena;
— u ovom metodu predmet nije izložen nikakvim mehaničkim opterećenjima i ne trpi promene kristalne strukture; predmet se dobija bez dodatnih unutrašnjih napona.

ELEKTROLITIČKA OBRADA

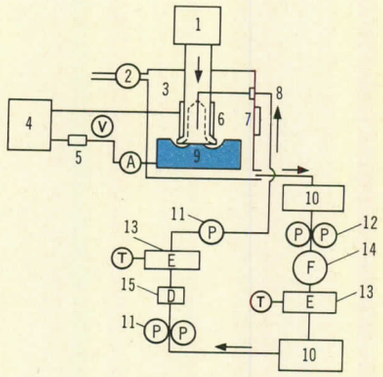
PRINCIP. Elektrolitička obrada je postupak oblikovanja elektroprovodnih materijala anodnim rastvaranjem *(sl. 72)*.

Da bi se anodno rastvaranje uspešnije lokalizovalo, elektroda — alat se delimično pokriva lakom za izolaciju. Materijal elektrode mora da bude otporan na koroziono dejstvo elektrolita, da se lako obrađuje i ne deformiše i da bude električni provodnik. Zavisno od predviđene obrade koristi se mesing, bakar ili nerđajući čelik. Maska koja se upotrebljava pri hemijskoj obradi postaje ovde suvišna, pošto je rastvaranje ograničeno električnim poljem, čiji se oblik menja sa oblikom, položajem i pomeranjem elektrode.

Mašina koja se koristi *(sl. 73)* sastoji se od generatora jednosmerne struje vrlo velike gustine, pokretne

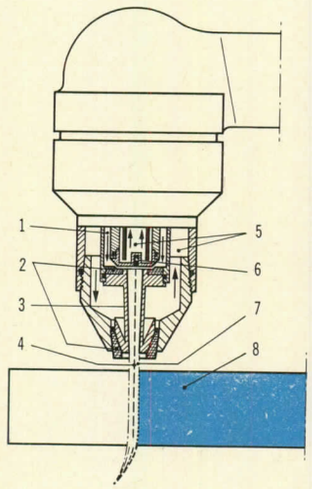


Sl. 72 — Shema nagrizanja pri elektrolitičkoj obradi.



Sl. 73 — Osnovna shema mašine za elektrolitičku obradu:

1. servo-mehanizam povezan sa alatom-elektrodom; 2. ventilator za evakuaciju; 3. komora za izolaciju; 4. električni generator; 5. zaštita; 6. elektroda-alat; 7. posmatranje; 8. dovod elektrolita pod pritiskom; 9. radni predmet; 10. rezervoar; 11. priključak za pritisak; 12. pumpa za proticanje; 13. izmenjivač; 14. filtar; 15. merač protoka.



Sl. 74 — Pištolj za plazmu:

1. komprimovani gas; 2. prsteni za izolaciju; 3. mlaznica; 4. električni luk; 5. hlađenje protokom vode; 6. elektroda od volframa (katoda); 7. plazma luka; 8. radni predmet.

elektrode učvršćene u sistem za automatsko pomoćno kretanje, koji se nalazi iznad radnog predmeta, zatim od kola elektrolita sa rezervoarom, pumpom, filtrom, izmenjivačem itd. Obrađivani predmet i elektroda — alat zatvoreni su u komoru čiji je zadatak da evakuiše gas (vodonik) i pare koje se oslobađaju iznad radne zone.

MOGUĆNOSTI. Obrada elektrolizom može da se koristi za bušenja i glodanja većine metala i legura. Zavisno od materijala koji se obrađuje brzina pomoćnog kretanja katode iznosi 1—10 mm/min za gustine struje reda veličine od 200 do 1000 A/cm². Ako je intenzitet struje veći od 10.000 A, koeficijent skidanja materijala je blizu vrednosti od 10 cm³/min za obrađivanje površine od 50 cm².

Tačnost obrade šupljina velikih dimenzija, reda veličine 250 mm, iznosi približno 1/10 milimetra. Površina predmeta uvek je kvalitetno obrađena jer se najpre nagrizaju ispupčenja pošto stvaraju veće električno polje.

PREDNOSTI. Zbog svoje raznovrsne primene, ova tehnika u izvesnom smislu podseća na obradu elektroerozijom:

— ona je možda manje precizna, ali za obradu — sa osrednjom preciznošću — velikih predmeta od visokotopivih čelika, ona je brža i jeftinija; tačnost obrade je reda veličine nekoliko desetina delova milimetra;

— za istu snagu, strujni generator instalacije za elektrolitičku obradu je mnogo jednostavniji i jeftiniji od impulsnog generatora mašina za obradu elektroerozijom.

ELEKTROLITIČKO BRUŠENJE

PRINCIP. Pri ovom postupku, koji se pre svega upotrebljava za oštrenje karbidnog alata za rezanje, uklanjanje materijala vrši se anodnim rastvaranjem.

Mašina koja se pri tom koristi sadrži jedan disk od dobrog električnog provodnika, prevučen dijamantom, koji se obrće u stezaču izolovanom od postolja i vezanom za negativni pol generatora jednosmerne struje. Alat za oštrenje, vezan za pozitivni pol istog generatora, oslanja se na disk. Ovaj je učvršćen na obrtni oslonac koji omogućava da se postigne željeni ugao oštrenja. Specijalni elektrolit koji sprečava stvaranje rđe i nije korozivan dovodi se na disk. Njegove pore obrazuju film od elektrolita, između provodnih delova elektroda, koji se neprekidno obnavlja. U stvari, između njih ne dolazi nikada do pravog dodira, ali su oba tela dovoljno blizu da abrazivna zrna diska uklone zaštitini film koji bi mogao da se stvori na površini obrađivanog predmeta. Napon na krajevima generatora varira od 4 do 12 V. Optimalna gustina struje je približno 100 A/cm².

PREDNOSTI. Elektrolitičko brušenje ima mnoge prednosti:

— glavna je u veoma brzoj obradi: brzina oštrenja jedne pločice od karbida (npr. P10) je 1,5 mm/min, dok je sa dijamantskim tocilom brzina oštrenja iste pločice reda veličine svega 0,5 mm/min;

— suprotno klasičnom brušenju, predmet koji se obrađuje praktično se ne zagreva, čime se izbegava stvaranje mikropukotina i unutrašnjih napona;

— na kraju, disk koji se koristi, sporije se haba nego tocila; specifično habanje je reda veličine od 1,5 do 3%; za 1.000 mm³ skinutog karbida habanje diska se kreće između 1,5 i 3 mm³, što je veoma malo.

OBRADA MLAZOM PLAZME

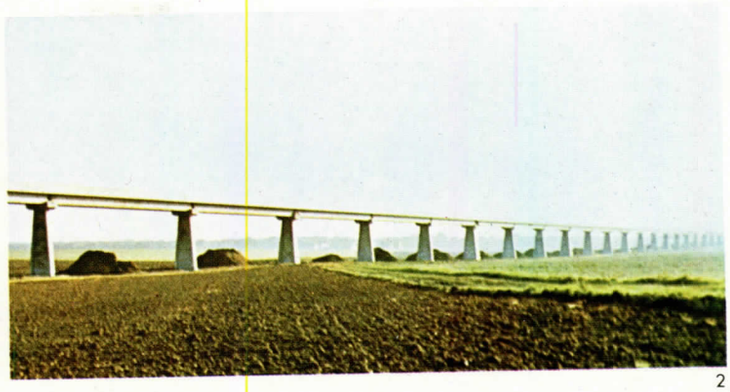
PRINCIP. Pri ovom postupku koristi se kontinuirani električni luk velike energije, stvoren strujom visoke frekvencije, pri naponu od približno 100 V, između jedne elektrode od volframa (hlađenog) koja predstavlja katodu i predmeta koji se oblikuje i predstavlja anodu *(sl. 74)*. Ovaj luk se snažno duva na predmet smešom komprimovanih gasova, redukujućih ili inertnih (vodonik, azot, argon itd.), koja prolazi kroz mlaznicu sa hlađenjem.

Energija ovako predata predmetu neuporedivo je veća od one koju stvara gorionik sa hemijskim sagorevanjem. Ona uglavnom potiče od energije neutralizacije stvorenih jona plazme i od toplote dezaktivacije i rekombinacije atoma koji prate mlaz plazme. Pošto je brzina prenošenja energije u pravcu grejne zone vrlo velika, mlaz plazme dovodi trenutno do topljenja, uz delimično otparavanje materijala anode. Pod uticajem kinetičke energije upadnih čestica istopljeni metal se izbacuje van grejne zone. Toplotno dejstvo je vrlo ograničeno usled brzine operacije, a upotreba redukujućih ili inertnih gasova sprečava oksidaciju metalnih predmeta koji se obrađuju.

PREDNOSTI. Postupak obrade pomoću mlaza plazme donekle se približava autogenom sečenju, ali u odnosu na njega ima niz prednosti:



1



2



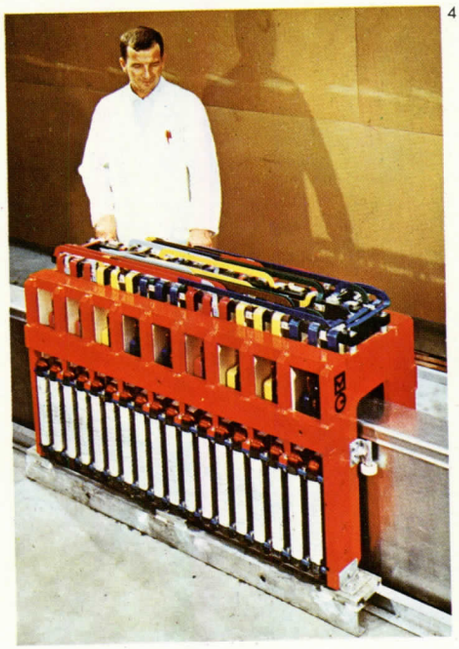
3

NOVA TRANSPORTNA SREDSTVA

Primena tri nova principa obećava neslućene mogućnosti transporta po zemlji i po vodi. Efekat vazdušnog jastuka između vozila i zemlje ili površine vode: pokretanje unapred ostvaruje se vazdušnom elisom ili reaktivnim pogonom. Na slikama su pokazani, železnica na vazdušnom jastuku (1) i njena prugà (2), a takođe i gliser — amfibija na vazdušnom jastuku (3).

Linijski motor (4) je u stvari elektromotor čiji je prstenast stator dobio oblik pruge, rotor je u obliku ploče, pričvršćen ispod vozila. Vozilo pokreće elektromotorna sila pri čemu ono ne dodiruje prugu (šinu).

Kod broda sa podvodnim krilima (5), pod uticajem brzine kretanja, na podvodna krila deluje hidrodinamička uzgonska sila koja izdiže trup broda iznad vode. Kako je otpor kretanja u vazduhu znatno manji, brod može da postigne mnogo veće brzine, uz povećanu stabilnost (pošto se kreće iznad talasa).



4



5

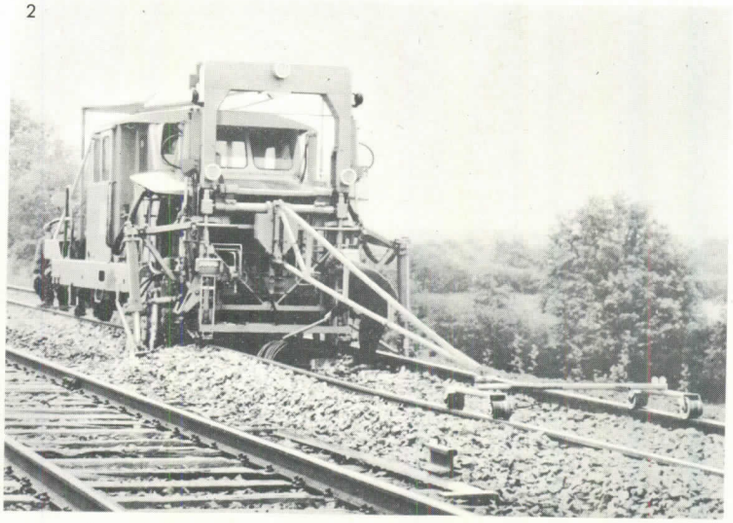
Fot. Société de l'Aérotrain, British Hovercraft, Merlin — Gérin, Rodriguez — Armone.

AUTOMATIZACIJA KOD ŽELEZNICA

1



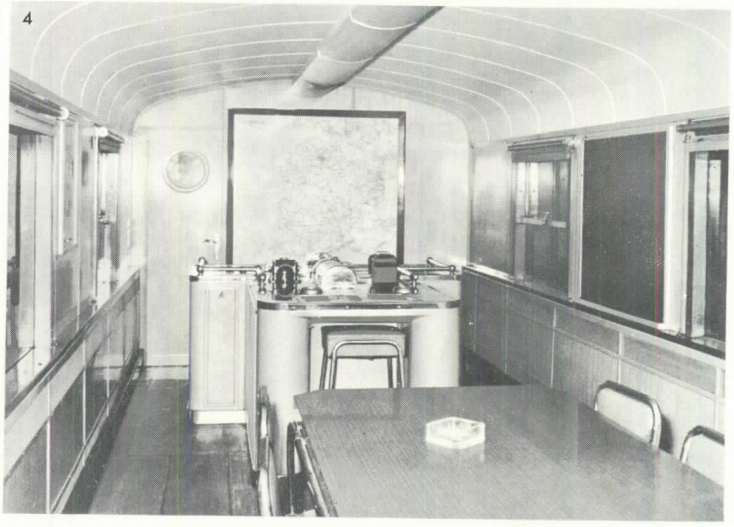
2



3



4

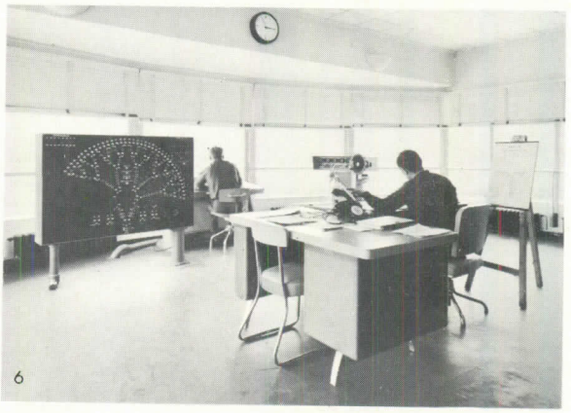


Brzine kretanja moderne železnice koje su u stalnom porastu zahtevaju izgradnju sigurnih železničkih pruga. Pri tome, mašine se koriste ne samo radi skraćenja trajanja radova, već takođe i radi izgradnje pravolinijskih i stabilnijih koloseka. U tu svrhu se koriste mašine za polaganje i pretresanje zastora od tucanika (1), mašine za podbijanje tucanika ispod pragova (2), dizalice za postavljanje elemenata koloseka — pragova i šina — pri montaži (3), i merna kola (vagon) za redovnu kontrolu stanja pruge (4). Radi formiranja i rasformiranja teretnih kompozicija i radi brzog raspoređivanja teretnih kola (vagona) na odgovarajući kolosek, velike prostrane ranžirne stanice (5) opremljene su elektronskim centralnim komandnim mestima (6), a vagoni (kola) automatskim vlačno-odbojnim uređajem (7).

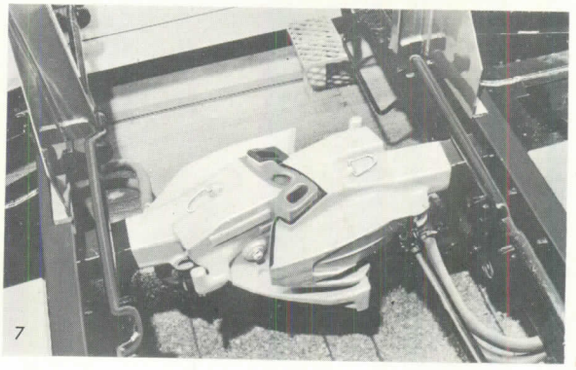
5



6



7



— energija potrebna za topljenje i za otparavanje metala u celini se dovodi sa mlazom plazme i ne potiče od egzotermnog sagorevanja metala koji se reže; dakle, suprotno autogenom sečenju, u mlazu plazme može da se obrađuje većina metala i legura, čak i onih sa najvišom topivošću i visokim stepenom legiranja, kao i nerđajući čelici; postupak se, pre svega, koristi za specijalne čelike, ali, isto tako, i za bakar, aluminijum i njihove legure;

— brzine rezanja mogu da dostignu 600 cm/min; one su, dakle, veće od brzina koje se postižu autogenim sečenjem;

— izgled reza je takođe mnogo čistiji;

— rezanjem sa mlazom plazme izbegava se pregrevanje osnovnog metala, tako da su deformacije oblikovanih predmeta vrlo male, a unutrašnji naponi uneti obradom praktično su zanemarljivi;

— da bi se obrađivali predmeti od visokotopivog čelika, pištolj za plazmu se zamenjuje u nekim slučajevima strugarskim alatom, naročito pri gruboj obradi;

— ovaj pištolj omogućava i sečenje paketa limova do debljina koje mogu premašiti 100 mm.

OBRADA ELEKTROMAGNETNIM ZRACIMA

PRINCIP. Mogućnosti obrade elektronskim bombardovanjem ograničene su odbojnim silama koje deluju između elektrona u mlazu. Da bi se prebrodile ove teškoće fokusiranja, tražila se mogućnost zamene naelektrisanih čestica električno neutralnim fotonima. Ovakva zamena je moguća ako se upotrebi snop koherentne svetlosti, koji se sastoji uglavnom od jednog skupa monohromatskih elektromagnetnih zraka koji se prostiru kao ravni talasi. Generatori koji stvaraju ove snopove nazivaju se *laseri* (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, engl.) u slučaju elektromagnetnih zraka vidljivog spektra, ili *maseri* (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation, engl.) za sve ostale zrake. Posle fokusiranja energija u ozračenoj zoni je reda veličine više stotina megavata po kvadratnom centimetru (oko 10^8 W/cm^2). Zahvaljujući posebnim osobinama ove svetlosti, izbegnuta je aberacija, a dimenzije poprečnog preseka fokusiranog snopa su reda veličine talasne dužine upotrebljenog zračenja. Za snopove koje emituju rubinski laseri, to odgovara veličini od približno 0,7 mikrona.

MOGUĆNOSTI. Upotreba ove tehnike još je na svom početku, ali su u laboratorijskim uslovima već uspele različite obrade velike finoće, a posebno bušenja reda veličine mikrona u čeličnim folijama. Ovi svetlosni zraci mogli bi da se upotrebe i za direktno merenje dimenzija predmeta koji se obrađuju na klasičnim mašinama; merenje bi se moglo vršiti sa velikom tačnošću u toku same obrade. Za automatske programirane mašine ne bi trebalo uzimati u obzir postepeno habanje alata pošto bi se njegovim pomeranjem upravljalo u procesu obrade i na licu mesta.

ZAKLJUČAK

Razvoj industrijskih proizvoda, koji su neizbežno sve usavršeniji a proizvodna cena im je sve niža, uslovljava razvoj odgovarajućih proizvodnih sredstava. Napredak ovih poslednjih sastoji se manje u povećanju složenosti mehaničkih delova, a više je usmeren na korišćenje drugih tehnika: elektriciteta, elektronike, vakuuma, hidraulike, hemije itd. Još malo poznati, novi postupci obrade izgledaju kompleksni, ali je veoma često njihova praktična primena jednostavna i rentabilnija od tradicionalnih postupaka. Za izvesne kompleksne obrade dešava se da rokovi izrade budu važniji od rentabilnosti. Dakle, cilj ovih metoda nije da obavezno istisnu tzv. klasične metode, nego ih najčešće dopunjavaju proširujući područje primene različitih tehnika obrade.

Prevela **Nada Milašin** **Georges FISCHER**

PLASTIČNE MATERIJE

Definicije i struktura

PLASTIČNA MATERIJA, SINTETIČKA SMOLA

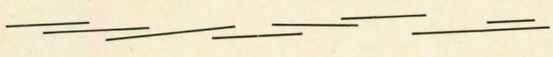
U tehničkom smislu, pod nazivom *plastična materija* podrazumeva se svaka materija koja se trajno deformiše pod dejstvom neke spoljašnje sile (pritiska, toplote, istezanja itd.).

Termin *sintetička smola* primenjuje se danas na sve polimere od kojih nastaju plastične materije, ili direktno ili posle spajanja sa pomoćnim supstancijama: plastifikatorima, punilima ili podlogama, stabilizatorima, mazivima, bojama i pigmentima, agensima za stvaranje pora itd. U stvari, sintetičke smole su smeše polimera čiji molekuli imaju različite dužine, a nastali su od istog monomera ili smeše monomera.

TERMOPLASTIČNE MATERIJE, UMREŽAVAJUĆE MATERIJE. Kada neka materija ima končastu molekulsku strukturu (linearni molekul), ona može pod spoljašnjim uticajem da pretrpi permanentnu deformaciju a da se pri tom njena hemijska ili fizičkohemijska struktura znatno ne promeni. S obzirom na to, ova materija može ponovo da pretrpi deformaciju ako se na nju i dalje dejstvuje odgovarajućim naprezanjima (pritisak, toplota).

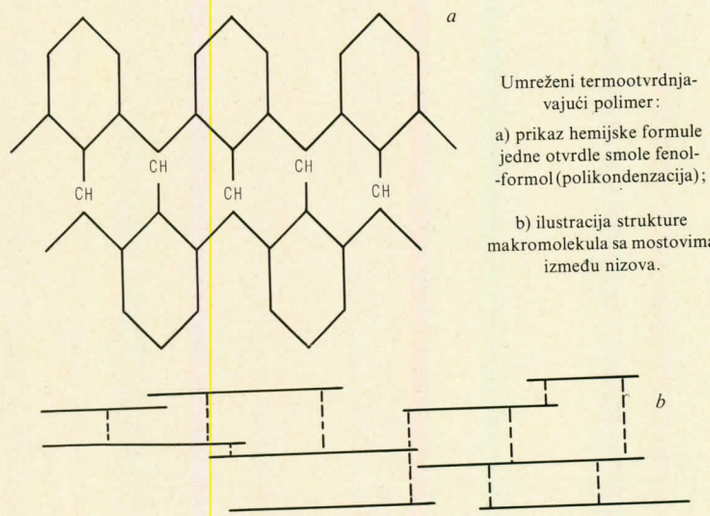
$$\cdots - CH_2 - CHCL - CH_2 - CHCL - CH_2 - CHCL - \cdots$$

Linearni termoplastični polimer;
a) prikaz hemijske formule polivinil-hlorida (poliadicija);
b) ilustracija fizičkog oblika makromolekula.



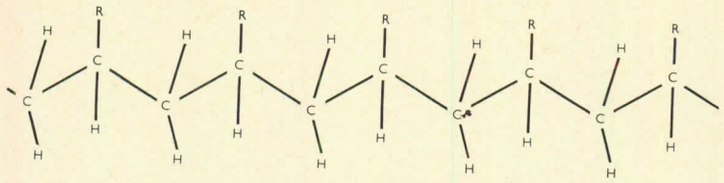
Ova permanentna sposobnost deformisanja oblika je osobina termoplastičnih materija, koje, bukvalno, »postaju plastične pod uticajem toplote«.

Druge smole imaju molekulske strukture koje su u prvom stadijumu nizovi koji sadrže mnogobrojne ogranke različito orijentisane u prostoru. U tom stanju su ove strukture nestabilne; njihova evolucija nije završena. Pod uticajem toplote ili, čak, samo nekog pogodnog katalizatora, ovi molekulski nizovi međusobno se povezuju poprečnim vezama — mostovima, što dovodi do čvrstih molekulskih trodimenzionalnih struktura. Kaže se da su ove smole »termootvrdnjavajuće«. Naime, kada su jednom podvrgnute dejstvu toplote i kad su pretrpele deformaciju pod uticajem pritiska, rezultat je nepovratan. Takva materija više ne može da se lije — ona je dostigla konačan stadijum. Kod nekih materija ovakvo »umrežavanje« postiže se tretiranjem polaznog molekula nekim umrežavajućim agensom.

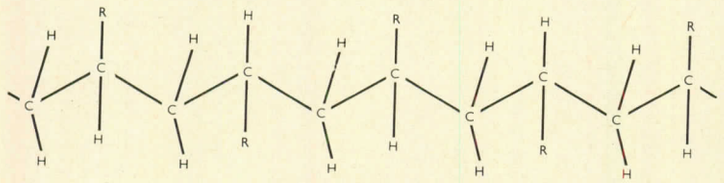


Umreženi termootvrdnjavajući polimer:
a) prikaz hemijske formule jedne otvrdle smole fenol-formol (polikondenzacija);
b) ilustracija strukture makromolekula sa mostovima između nizova.

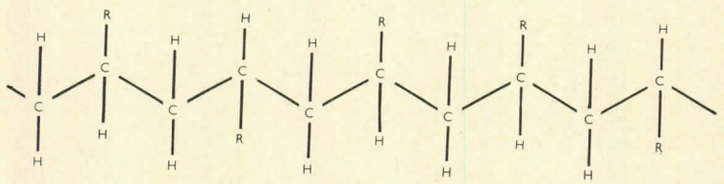
POLIMERI, KOPOLIMERI, KALEMI. Polimerizacija jednog prostog molekula kao što je $CH_2 = CHR$ dovodi do krupnog molekula — makromolekula, sastavljenog od karika $—CH_2—CHR—$ koje se ponavljaju više ili manje puta, prema stepenu ove polimerizacije. Ako se »grana« R uvek nalazi sa iste strane



Izotaktičan polimer (poliolefin);



Sindiotaktičan polimer.



Ataktičan polimer.

molekula-polimera, kaže se da je polimer *izotaktičan*. Ako se njegov položaj pravilno menja, tako da je naizmenično sa jedne ili druge strane glavnog lanca, kaže se da je polimer *sindiotaktičan*. Ako je ovo smenjivanje nepravilno, polimer je *ataktičan*. Ovakve promene u strukturi mogu da dovedu do promene osobina polimera.

Vezivanje više podjednakih molekula pod uticajem nekog katalizatora naziva se poliadicijom. Ako se vezuju dva različita molekula i daju polimer reakcijom pri kojoj se izdvaja voda, reč je o polikondenzaciji.

Poliadicija dva različita molekula, pri kojoj ne dolazi ni do kakvog izdvajanja, daje kopolimer. U tom slučaju makromolekul je sastavljen od različitih karika čije naizmeničnoređanje zavisi od odnosa sadržaja dva polazna molekula. Smenjivanje nije pravilno, osim ako je posebno započeta polimerizacija svakog monomera (blok-kopolimer).

Ako se lanac jednog makromolekula aktiviše elektronima visoke energije, γ-zracima ili X-zracima i ako se zatim ozračeni polimer potopi u drugi monomer, dolazi do kalemljenja ovog monomera na početni lanac: kalemljeni kopolimer.

NAJVAŽNIJE SMOLE

Termoplastične smole obuhvataju najvažnije materije po obimu njihove primene: poliolefine (polietilen visoke i niske gustine; polipropilen); polistirol i njegove kopolimere (stirol-akrilonitril, akrilonitril-butadijen-stirol ili A. B. S.); vinilne smole (polivinil-hlorid, polivinil-acetat, polivinil-alkohol, polivinilden-hlorid itd. i njihove kopolimere); metakrilne smole (polimer metil-metakrilata i njegove kopolimere); poliacetale (polimere formaldehida); polimerizovane fluoride ugljenika (hlor-trifluor-etilen, tetra-fluor-etilen); poliamide (tipove najlon, rilsan, orlon); polikarbonate; derivate celuloze (celuloid, celulozni acetat, celulozni acetobutiral, etil-celulozu); novije smole kao što su hlorisani polietár (penton), fenoksi, sirlin, estan, teksin, kinar itd.

ABBAABAABBBABABBABAAA

Klasičan nepravilni kopolimer (A i B predstavljaju dva polazna monomera.)

AABBBAABBBAABBBAABBBAA

Kalemljeni kopolimer.

AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA

B B B B

B B B B

B B B B

Pravilni blok-kopolimer.

(B je kalemljen na A posle polimerizacije A).

Termootvrdnjavajuće ili *umrežavajuće smole* obuhvataju: fenolne smole ili fenoplaste; aminoplaste (karbamid-formol, melamin-formol); epoksidne smole; alkidne smole i poliestre, dialil-ftalat; silikone

POMOĆNA SREDSTVA

PLASTIFIKATORI. To su organska jedinjenja, obično tečna i vrlo malo volatilna, čija je osobina da povećavaju plastičnost neke smole: oktil-ftalat, trikrezil-fosfat, estri adipinske, sebacinske kiseline itd. Oni se unose i do 40 % količine plastične mase.

PUNILA I PODLOGE. Bilo da su u obliku praha, vlakana ili tkanine, folija ili lamela, njihova svrha je da pojačaju strukturu materijala ili da snize cenu konačnog proizvoda: drveno brašno, pamučne pahuljice, celuloza, hartija, staklena tkanina, liskun, drvo, kalcijum karbonat itd.

STABILIZATORI. Kao što ime pokazuje, njihova namena je da zaštite materijal od svetlosti (čađ u polietilenu), od toplote (soli kalaja ili olova u polivinil-hloridu). Antioksidatori su takođe stabilizatori.

MAZIVA. Upotrebljavaju se u malim količinama, a njihova uloga je da olakšaju obradu plastične mase (stearati, za poboljšavanje ekstrudovanja polivinil-hlorida).

BOJE I PIGMENTI. Unošenjem u materijal, boje daju prozračno obojenje. Pigmenti, osim bojenja, dovode i do neprozračnosti.

AGENSI ZA STVARANJE PORA. To su materije koje se unose u plastičnu masu da bi proizvele pravilnu poroznost radi dobijanja sunđerastih materijala. Ovaj efekat se može postići zbog toga što se ove materije bilo rastvaraju u vodi, kojom se ekstrahuju iz mase, ili se mogu razlagati pod uticajem toplote, oslobađajući gasove koji izazivaju širenje mase.

KATALIZATORI POLIMERIZACIJE, OTVRĐIVAČI, dodaju se prepolimerima termoplastičnih smola da bi se ubrzala njihova polimerizacija (peroksidi dodati sirupu metil-prepolimerakrilata, koji se izliva između dva stakla, da bi se proizvele providne ploče organskog stakla). Oni se takođe unose i u prahove za livenje fenoplasta ili aminoplasta, da bi se ubrzalo otvrdnjavanje i time smanjilo vreme livenja (heksamin). Amonijum-hlorid dodat lepkovima karbamid-formolne smole je agens za otvrdnjavanje.

AGENSI ZA UMREŽAVANJE. Ovaj naziv se upotrebljava, na primer, za izocijanate koji se dodaju poliestrima ili polietrima neposredno pre sipanja u kalupe, da bi se izvršila reakcija umrežavanja, koju ovde prati pojava širenja usled oslobađanja vodene pare (poliuretani).

Proizvodnja sintetičkih smola

POLIOLEFINI

Ovi polimeri se dobijaju polazeći od etilenskih ugljovodonika — etilena, propilena, butilena, kojih ima dosta u gasovima nafte. Etilen je takođe dobijen, i to na ekonomičan način, iz običnog alkohola podvrgnutog katalitičkoj dehidrataciji na alumini.

Prvi postupak polimerizacije bio je britanskog porekla i sastojao se u podvrgavanju etilena vrlo visokim pritiscima: 1200 bara pri temperaturi između 100 i 300°C. Ovaj postupak je bio samo patentiran (1937).

Oko 1950. su Nata i Cigler, dobitnici Nobelove nagrade za hemiju, otkrili, nezavisno jedan od drugog, nov metod polimerizacije kod koga se primenjuju samo mali pritisci. Metod se može primenjivati na razne tipove olefina. Dobijeni polimeri imaju gustinu veću od onih koji se dobijaju pod visokim pritiskom. Ovo njihovo obeležje, sa drugim fizičkim karakteristikama, dovelo je do toga da se razlikuju dva tipa polimera: oni koji se dobijaju pod visokim pritiskom (polimeri male gustine) i oni koji se dobijaju pod niskim pritiskom (polimeri velike gustine). Prvi su ataktični, a drugi izotaktični.

Bilo kako bilo, njihov hemijski sastav u osnovi je isti kao kod parafina, a molekulski lanac ima sledeću pojednostavljenu strukturu:

... —CH_2—CH_2—CH_2—CH_2—CH_2—... polietilen

... —CH(CH_3)—CH_2—CH(CH_3)—CH_2—CH(CH_3)—CH_2— ... polipropilen

POLIETILEN DOBIJEN POD VISOKIM PRITISKOM (NISKE GUSTINE). Pri originalnom postupku polimerizacija se vrši pod pritiskom od 1500 do 2000 bara pri temperaturi između 100 i 200°C i u prisustvu male količine kiseonika koji ima katalitičku ulogu. Na molekulsku težinu polimera utiču uglavnom pritisak polimerizacije i sadržaj kiseonika.

Polietileni dobijeni pod visokim pritiskom su sintetičke smole sa najmanjom gustinom 0,92 — 0,95, što znači da plivaju na vodi. Kod velikih debljina su malo kruti, ali pri malim debljinama pokazuju izvesnu elastičnost, koja se zadržava čak i pri vrlo niskim temperaturama. Ove materije ne postaju stvarno lomljive sve do -55°C. Druga osobenost ovih polimera je njihova dosta jasna tačka topljenja, dok je za većinu drugih materija karakteristična samo tačka progresivnog

omekšavanja. Jedan kvalitet polietilena može, na primer, da bude još dosta čvrst i neplastičan na 102°C, a da naglo pređe u viskoznu tečnost na 106°C.

Komercijalno se polietilen isporučuje u granulama koje sadrže jedan antioksidator koji obezbeđuje njegovu postojanost u kontaktu sa atmosferom i olakšava obradu. Polietilen se obrađuje ekstruzijom, livenjem pod pritiskom, plastikovanjem, dakle, klasičnim postupcima za obradu termoplastičnih materija.

POLIETILEN DOBIJEN POD NISKIM PRITISKOM (VELIKE GUSTINE). U postupku Nata-Cigler, koji su u industriju uvela ova dva naučnika, koristi se atmosferski pritisak ili, najviše, pritisak od 7 bara. Otkriće se zasniva na izboru katalizatora koji omogućuje ovu operaciju pri takvim pritiscima; ovaj katalizator je vrlo kompleksan i heterogen. Njegov čvrsti deo, mikrokristaliničan ili koloidalan, zasnovan je na trialkil-aluminijumu; tečni deo je od titan-tetrahlorida. Polimerizacija se vrši između 50 i 75°C.

U postupku Filips, radi se pod višim pritiskom (30 do 40 bara), a katalizator je oksid šestovalentnog hroma, sa oksidom jednog elementa iz grupe silicijuma, aluminijuma ili cirkonijuma. Polimerizuje se između 140 i 150°C.

Najzad, u postupku Indijana, da pobrojimo samo najtipičnije, pritisak varira između 60 i 100 bara, temperatura između 200 i 260°C, a katalizator je, u osnovi, na bazi molibden-oksida.

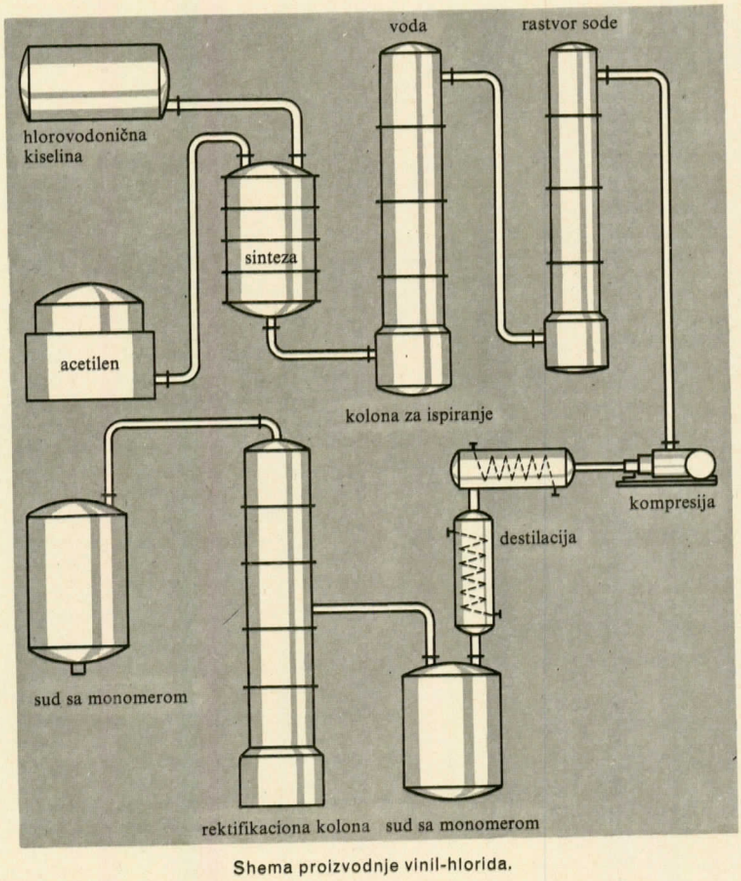
Ovi polietileni »niskog pritiska« (velike gustine) imaju gustine od 0,94 do 0,965; krući su od polietilena »visokog pritiska« i »tope« se na višoj temperaturi: 120 — 125°C. Obrađuju se istim postupcima.

POLIPROPILEN. Njegova proizvodnja se zasniva na primeni postupka Nata-Cigler koji smo već opisali. Ovaj polimer je čvršći od polietilena, ali se obrađuje istim postupcima. Njegova gustina je 0,902—0,910. On je, dakle, takođe lakši od vode. Interesantno mu je svojstvo veća otpornost na toploti. Topi se tek na 160°C. Stoga omogućuje izradu predmeta koji mogu, na primer, da se sterilišu na 120°C i koji su otporni prema ključaloj vodi (predmeti za domaćinstvo).

POLIBUTILENI. Prvi polimeri izrađeni od butilena bili su korišćeni za proizvodnju adhezivnih traka osetljivih na pritisak. To su bili viskozni proizvodi, lepljivi, sa malom molekulskom težinom. Korišćeni su takođe za plastifikovanje drugih poliolefina. U novije vreme uspelo je da se dobiju viši polimeri koji se mogu koristiti za proizvodnju filmova, cevi itd.

POLISTIROLI

Ako se ne računaju derivati celuloze, klasični polistirol je bio prva industrijalizovana termoplastična smola, nešto pre 1939. Otada je ona poboljšavana u pogledu povećavanja otpornosti na udar, bilo unošenjem malih količina sintetičke gume ili kopolimerizacijom sa drugim monomerima, kao što su butadijen ili akrilonitril.

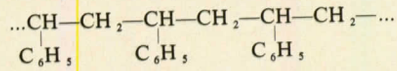


Shema proizvodnje vinil-hlorida.

Polazni monomer, stirol, dobija se polazeći od etilena i benzola, da bi se kao intermedijarni proizvod dobio etil-benzol. Ovaj se takođe izdvaja iz sporednih proizvoda u rafinerijama nafte, tačnije, iz smeša ksilola. Etil-benzol se dehidrogenizuje na 700°C pregrejanom parom u prisustvu katalizatora, pri čemu se dobija stirol.

Polimerizacija ovog monomera je, u principu, relativno prosta. Ona se izvodi bez katalizatora, pod dejstvom toplote, u jednoj koloni od nerđajućeg čelika.

Standardni polistirol se gotovo isključivo koristi za livenje čvrstih predmeta. To je termoplastična smola, dakle sa linearnim molekulima, tipa:



Odličan je električni izolator za visoke frekvencije. Ne apsorbuje vlagu, čak ni posle potpunog potapanja u vodu i ostajanja u njoj 48 časova. Nedostatak mu je što nije otporan pri povišenim temperaturama, nego omekšava na 65-75°C. Gustina mu je 1,04—1,065. Slabo je otporan na udar i savijanje. Vrlo je krut i daje metalni zvuk pri lakom udaru.

KOPOLIMERI. Otpornost na udar i na savijanje poboljšava se kopolimerizacijom sa malo butadijena, ili sa akrilonitrilom, ili sa oba ova monomera. Smole A.S. su kopolimeri stirola i akrilonitrila; smole A.B.S. sadrže sva tri monomera stirol-butadijen-akrilonitril.

Ovi kopolimeri se koriste, osim za livenje pod pritiskom, za ekstrudovanje velikih ploča koje se upotrebljavaju za proizvodnju rashladnih uređaja ili za ekstrudovanje cevi.

Sa polietilenima i polivinil-hloridom, polistiroli čine trijadu glavnih materija, ako se o tome sudi prema svetskoj tonaži njihove potrošnje.

POLIVINILHLORID I DRUGE VINILNE SMOLE

Ova klasa sintetičkih smola vrlo je značajna po svojoj raznovrsnosti i širokoj upotrebi.

Polivinil-hlorid je dobio komercijalni zamah nešto pre 1939. u Nemačkoj, dok se u Francuskoj proizvodi od 1940. To je najvažniji predstavnik ove klase.

POLIVINIL-HLORID. Monomer ove sintetičke smole, vinil-hlorid, ima jednostavnu formulu: $CH_2 = CH—Cl$. Postoje dva glavna postupka njegovog dobijanja:

1. reakcija gasovitog hlorovodonika sa acetilenom;

2. dejstvo hlora na etilen, posle čega se dobijeni dihlor-etan tretira da bi mu se oduzeo jedan molekul hlorovodonika. Proizvedeni hlorovodonik može se koristiti, kao u prvom postupku, za reagovanje sa acetilenom i dobijanje nove količine vinil-hlorida.

U jednom novijem postupku, polazna materija je prirodni gas (metan), koji se podvrgava kontrolisanoj oksidaciji koja dovodi do smeše acetilena i etilena. Uspelo je, čak, postupak regulisati tako da se održava izračunati odnos ova dva sastojka smeše. Na taj način se dejstvom hlora na ovu smešu dobija direktno vinil-hlorid, bez drugih sporednih proizvoda, jer hlorovodonik, koji se formira pri razlaganju dihlor-etana, odmah bude apsorbovan od acetilena.

U drugom skorašnjem postupku etilen se tretira hlorovodonikom u oksidacionoj sredini; to je primena Dikanovog postupka za proizvodnju hlora.

Polimerizacija ovog monomera može se izvoditi u homogenoj fazi, tj. direktno na vinil-hloridu koji je kondenzovan na -15°C. Operacija se izvodi u autoklavima koji izdržavaju pritisak. Dobijeni polimer je odličnog kvaliteta jer je bez nečistoća do kojih mora doći ako se polimerizacija vrši u emulziji ili suspenziji.

Polimerizacija u emulziji izvodi se u rotacionim autoklavima, pri čemu se monomer disperguje u vodenom rastvoru jednog emulgatora, u prisustvu peroksidnog katalizatora. Kod polimerizacije u suspenziji, katalizator se disperguje u samom monomeru koji se suspenduje u vodi zahvaljujući dodatku jednog zaštitnog koloida, polivinil-alkohola. Ovim postupkom dobija se polimer u zrnu.

Polivinil-hlorid se obrađuje bez plastifikatora pri proizvodnji krutih predmeta (kotlovi za hemijsku industriju). Pri dobijanju elastičnih proizvoda, moraju mu se dodati plastifikatori (oktil-ftalat, trikrezil-fosfat itd.). U svakom slučaju, dodaju mu se stabilizatori protiv dejstva toplote i svetlosti.

Ova plastična masa omogućuje proizvodnju iznenađujuće raznovrsnog niza predmeta, koristeći se tehnikama livenja pod pritiskom, ekstruzije, valjanja, oblaganja, rotacionog livenja itd.

Kod vinil-hlorida takođe se proizvode kopolimeri u prisustvu drugih monomera, kao što su vinil-acetat, viniliden-hlorid itd. Na taj način se mogu veoma široko varirati osobine i karakteristike plastične mase zavisno od tehničkih zahteva.

POLIVINIL-ACETAT. Monomer ove smole, vinil-acetat, dobija se po jednom sličnom postupku — reakcijom glacijalne sirćetne kiseline sa acetilenom u prisustvu katalizatora (na primer, aktivni ugalj impregnisan cink-acetatom). Radi se na 200°C, pod pritiskom nižim od atmosferskog.

U drugom postupku ahnidrid sirćetne kiseline reaguje sa acet-aldehidom. Nedavno je jedna britanska firma dobila ovaj monomer direktnom oksidacijom etilena u rastvoru bakarne soli i paladijuma.

Vinil-acetat se takođe može polimerizovati u masi, u emulziji, suspenziji ili u rastvoru. Kao katalizatori koriste se peroksidi.

Polivinil-acetat se koristi naročito zbog svojih adhezivnih svojstava, s jedne strane, dok je, s druge strane, njegova upotreba veoma raširena pri proizvodnji boja u vodenoj emulziji, koje se ponekad, ne sasvim tačno, nazivaju »boje sa lateksom«.

POLIVINIL-ALKOHOL. Monomer nije poznat u slobodnom stanju. Da bi se dobio polimer, koristi se zaobilazan put, koji se sastoji u saponifikaciji polivinil-acetata rastvorom sumporne kiseline.

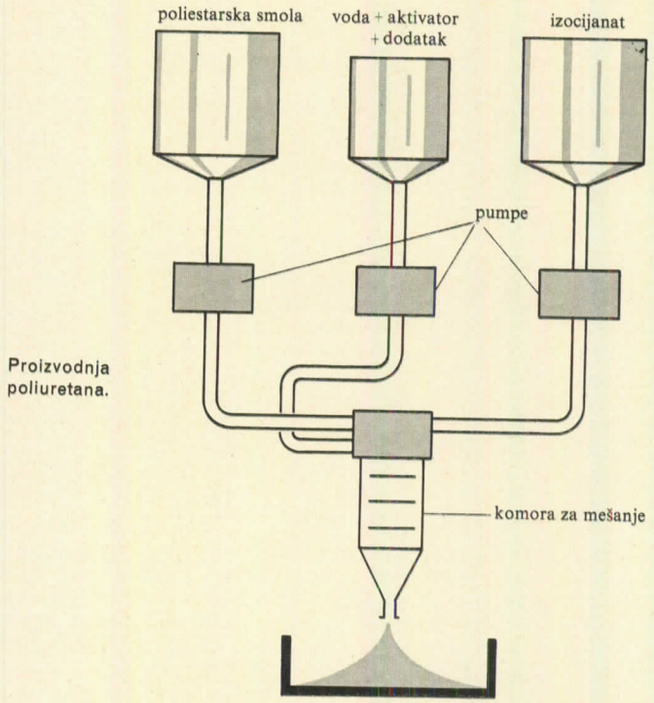
Ovaj polivinil-alkohol upotrebljava se za proizvodnju vodenih lepkova i apretura za tkanine, jer je rastvorljiv u vreloj vodi. Njegova rastvorljivost nestaje ako se podvrgne štavljenju rastvorom kalijum-dihromata.

Počev od 1960, Japanci koriste velike količine polivinil-alkohola za proizvodnju sintetičkih tekstilnih vlakana.

OSTALE VINILNE SMOLE. Kada se polivinil-alkohol tretira butir-aldehidom u alkoholnoj sredini i u prisustvu neke mineralne kiseline, on se transformiše u polivinil-butiral. Ovaj se naročito koristi za oblaganje tkanina da bi se učinile nepromočivim.

Pomenućemo još polivinil-piroliden, čija proizvodnja prolazi kroz niz veoma složenih operacija. Primena ovog proizvoda u medicini izvanredno je interesantna: usporivač za lekove da bi produžio njihovo dejstvo na organizam, zamena za krvnu plazmu pri transfuzijama.

Polivinil-karbazol, polivinilni etri, čija je proizvodnja počela u Nemačkoj, nisu se naročito proširili.



Proizvodnja poliuretana.

AKRILNE SMOLE

Najvažniji predstavnik ove grupe je polimer metil-metakrilata, koji je u Francuskoj veoma poznat pod nazivom »pleksiglas«. Polimerizovani akrilni estri (metil-, etil- i butil-akrilati) koriste se za proizvodnju lakova za kožu ili emulzione boje.

Metil-metakrilat dobija se od acetona i natrijum-cijanida pod dejstvom sumporne kiseline i u rastvoru metil-alkohola. Ovo jedinjene se polimerizuje izlivanjem u staklene kalupe za proizvodnju ploča, cevi znatne providnosti (sigurnosno staklo). Katalizator za polimerizaciju je jedan peroksid. Može se polimerizovati i u obliku granula za dobijanje praha za livenje (livenje pod pritiskom) ili mase za ekstrudovanje (talasaste ploče.)

Jedan postupak za sintezu akrilnih monomera sastoji se u tome da se izazove direktna reakcija acetilena, ugljenmonoksida i vode, pod dejstvom alkohola potrebnog za esterifikaciju, pod pritiskom od 100 bara.

POLIACETALI

Cist formaldehid se polimerizuje u rastvoru nekog organskog rastvarača, pod dejstvom, prvo, jednog prepolimera pripremljenog u cikloheksanu i, drugo, jednog podstrekača polimerizacije: azota, arsena, antimona, fosfora i jednog katalizatora. U jednom francuskom postupku koristi se kao polazna materija trioksan, trimer formola.
Poliformaldehid se koristi za livenje predmeta za industrijsku upotrebu.

POLIESTRI

Kao što pokazuje njihovo ime, ove smole se dobijaju kondenzacijom jedne polikiseline sa polialkoholom u prisustvu modifikacionih agensa (ulja koja suše ili druga ulja, kolofonijum) ili monomera (stirol, vinil-acetat, dialil-ftalat itd.).

ALKIDNE SMOLE. Iako su u početku nazvane *gliptali*, zato što su dobijene od glicerina i anhidrida ftalne kiseline, one se, u stvari, mogu dobiti i od drugih polikiselina ili polialkohola. Osobine im se menjaju ugrađivanjem lanenog ili ricinusovog ulja ili kolofonijuma. U stvari, većina ovih smola dobija se polazeći od monoglicerida lanenog ulja, koji zatim reaguje sa anhidridom ftalne kiseline i glicerinom pri oko 200°C u toku više časova u inertnoj atmosferi ugljen-dioksida.

Ove smole se koriste praktično samo za dobijanje boja i lakova: gliceroftalne boje, tiksotropne boje, emajli za peći.

NEZASIĆENI POLIESTRI. To su kompleksi koji sadrže, s jedne strane, kondenzat anhidrida maleinske kiseline i etilenglikola i, s druge strane, jedan monomer: stirol, vinil-acetat, dialil-acetat itd.

Ove smole su našle veliku primenu u proizvodnji plastičnih masa pojačanih staklenim vlaknima: talasaste ploče za krovne konstrukcije, čamci, automobilske karoserije, građevinski elementi, čabrovi za industriju itd.

Bez pojačanja koriste se za proizvodnju prozračnih tabli, izlivanjem u kalupe i polimerizacijom: prozori, zatapanje uzoraka za muzeje ili za umetničke efekte.

POLIURETANI. Ove smole se dobijaju dejstvom jednog diizocijanata na neki poliestar (ili polietar), a naročito se koriste za proizvodnju plastičnih pena, elastičnih ili krutih, koje se upotrebljavaju za termičku izolaciju zgrada, vagona, kamiona, zatim za punjenje delova nameštaja kao što su fotelje i automobilska sedišta (v. PENE).

HLORISANI POLIETAR. Prema polaznim jedinjenjima koja se koriste za dobijanje ove smole, naime, esterifikovanom pentaeritritu i trihloromonoacetatu, mi je ubrajamo u klasu poliestara. U stvari, to je polimer bishlorometil-oksetana sa izvanrednim kvalitetima za livenje, slabo zapaljiv, veoma otporan prema rastvaračima, alkalijama i mnogim kiselinama i nehigroskopan.

FENOLNE SMOLE

Prvi prah za livenje koji je u industriju uveo dr Bekeland, belgijskog porekla, bio je na bazi fenola i formola. Između 1950. i 1960. pojavile su se nove klase ovih smola sa veoma različitim osobinama: epoksidi, polikarbonati.

FENOL-FORMOL. Kondenzuje se, na primer, 830 kg fenola i 1060 kg formola 37%, u prisustvu 2,5 kg sumporne kiseline da bi se dobila jedna tona suve smole. Kondenzacija se striktno kontroliše, jer je proizvod reakcije termootvrdnjavajući, pa stoga reakcija treba da se zaustavi na nekoj tački, tako da se omogući naknadna operacija livenja ili pripremanja lakova i boja.

Proizvodnja praha za livenje sastoji se u unošenju 100 delova punila (drvenog brašna) u 100 delova suve smole fenol-formol. Ovaj prah se lije kompresijom, ili prenošenjem, ili, čak, pod pritiskom, u pogodnim uslovima.

I pored nedostataka postupka livenja (relativna sporost, nemogućnost korišćenja komada odbačenih zbog nekog nedostatka), ove smole su i dalje interesantne zahvaljujući njihovoj nezapaljivosti, otpornosti prema toploti i niskoj ceni.

U obliku tečnih smola, osvojile su znatna tržišta u proizvodnji penastih izolacionih ploča. Učestvuju u proizvodnji listastih tabli za električne izolatore ili za dekorisanje, impregnisanog drveta, bešumnih zupčanika itd.

EPOKSIDNE SMOLE. Glavni tip ovih smola je na bazi bisfenola i epihlorhidrina. Otvrdnjavanje ovih smola postiže se zagrevanjem u prisustvu otvrdnjivača: ftalnog anhidrida, maleinskog anhidrida, amina, poliamida, polifenola, oksalne kiseline itd.

Ove smole se naročito koriste za oblaganje električnih proizvoda, u elektronici, kao i za proizvodnju lakova koji su veoma otporni prema nepogodama, kiselinama i alkalijama.

POLIKARBONATI. Ove smole se dobijaju naročito dejstvom fosgena na bisfenol, pretežno su termoplastične, tj. mogu se liti pod pritiskom.

Njihove dobre osobine, kao što su prozračnost, otpornost prema toploti i na udar, omogućile su njihov razvoj tokom poslednjih godina, uz snižavanje prodajne cene.

FENOKSI SMOLE su komercijalizovane 1964. Njihova proizvodnja se zasniva na oksidaciji 2,6-dimetil-fenola u prisustvu bakar-amina kao katalizatora, pri normalnom pritisku i temperaturi. Dobija se, u stvari, polioksid fenilena.

Njihova specifičnost je otpornost pri niskim i povišenim temperaturama (od -170 do +190°C). Ove smole su termoplastične.

AMINOPLASTI

Ovaj izraz označava smole dobijene kondenzacijom karbamida i njegovih derivata — melamina sa formaldehidom.

SMOLE KARBAMID-FORMOL. One su izgubile mnogo od interesa koji je za njih vladao u početku, jer su to termootvrdnjavajuće smole, čija se vremenska stabilnost, naročito u uslovima povećane vlažnosti, ne smatra dovoljnom. Izborile su se za prednost nad fenolnim smolama svojom prozračnošću i, dakle, mogućnošću da se liju u belim i pastelnim, kao i u živim ili tamnim bojama. Pojava otpornijih melaminskih smola predstavljala je jaku konkurenciju.

Dobijaju se kondenzacijom karbamida i formola u prisustvu amonijaka, koji igra ulogu usporivača ili moderatora reakcije.

Unosi se jedno punilo, kao što je skrob, ako je reč o proizvodnji smole za adhezive, ili celulozna kaša, ako se želi dobiti prah za livenje kompresijom.

Ostali tipovi smola koriste se za proizvodnju lakova ili apretura za hartiju ili tekstil.

MELAMINSKE SMOLE se razlikuju od prethodnih time što se umesto karbamida upotrebi melamin i što imaju bolje karakteristike.

DERIVATI CELULOZE

Interesovanje za njih je prilično opalo, mada su regenerisana celuloza (koja je naročito poznata pod nazivom »celofan«) i acetobutirat celuloze zadržali znatna tržišta.

Treba ipak podsetiti da je celuloid bio prva plastična materija, koju su 1868. pronašla braća Hiat u Sjedinjenim Državama.

REGENERISANA CELULOZA izrađuje se u obliku folija za pakovanje, nizom složenih transformacija, polazeći od celuloze iz drvenog testa. Ovo se prevodi u alkalnu celulozu pod dejstvom kaustične sode, zatim u celulozni ksantat pod dejstvom ugljen-disulfida. Rastvoren u sodi, proceđen i sazreo, ksantat prolazi kroz prorez u kupatilo za koagulaciju, koje sadrži sumpornu kiselinu i mineralne soli; tako formirana folija ispira se više puta u nizu kupatila, iz nje se odstranjuje sumpor, zatim se beli, čini elastičnom, boji i konačno impermeabilizuje.

Osnova ove materije je ista kao kod viskoze, koja je poznata kao jedno od prvih veštačkih tekstilnih vlakana.

CELULOID. Danas se malo proizvodi, i to za veoma specijalizovanu primenu. To je nitroceluloza plastifikovana kamforom u prisustvu alkohola kao rastvarača.

CELULOZNI ACETAT. Ova materija, koja je u početku nazivana »nezapaljivi celuloid«, dobija se dejstvom anhidrida sirćetne kiseline na celulozu u prisustvu sirćetne kiseline i malo sumporne kiseline koja igra ulogu katalizatora.

Pošto se dobije celulozni estar, on se posle prečišćavanja i sušenja plastifikuje jedinjenjima kao što su triacetin, toluol-sulfamid i trifenil-fosfat.

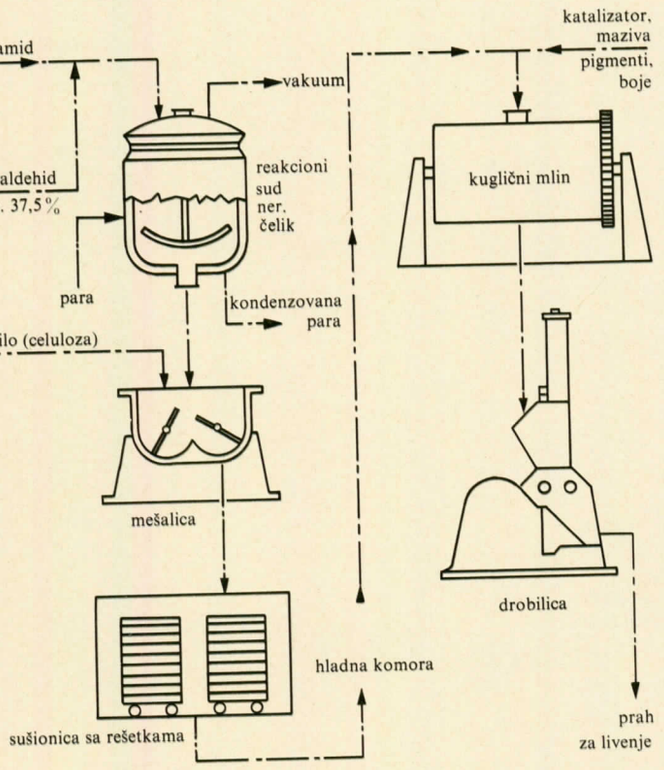
Kao i celuloid, i ova plastična materija se isporučuje u obliku folija, šipki, cevi, ali i u obliku praha za livenje pod pritiskom.

CELULOZNI ACETOBUTIRAT je poboljšani vid prethodne materije, koji se dobija jednovremenim dejstvom anhidrida sirćetne i buterne kiseline i ovih kiselina. Našao je zanimljive primene za ekstrudovanje cevi i za livenje automobilskih delova pod pritiskom.

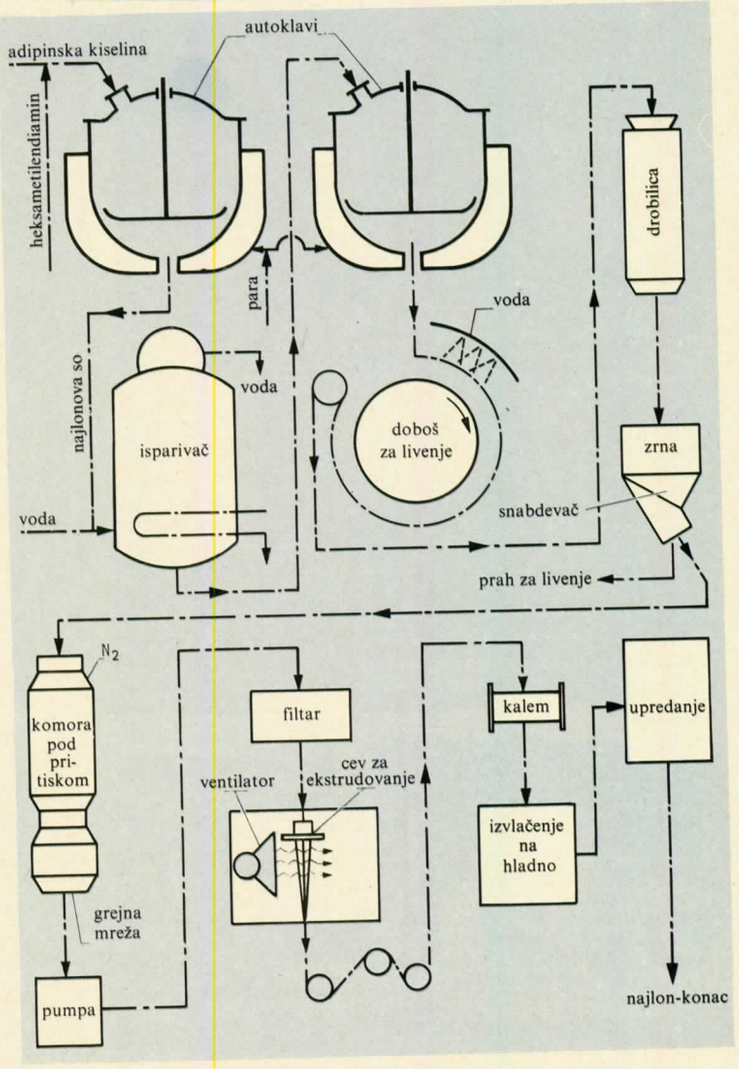
POLIAMIDI

Ova klasa smola našla je, u stvari, mnogo veću primenu u oblasti tekstila nego u domenu plastičnih masa. Plastične mase su poznate pod nazivima koji se najčešće upotrebljavaju: najlon, rilsan, perlon.

NAJLON je polimer koji se, u principu, dobija kondenzacijom adipinske kiseline i heksametilen-diamina.



Shema proizvodnje karbamid-formolnih smola.



Shema proizvodnje najlona.

Međutim, i drugi diamini mogu da učestvuju u proizvodnji i da promene konačne osobine proizvoda. Prah za livenje koristi se za livenje pod pritiskom, ili za ekstrudovanje i oblaganje električnih kablova. Ovaj polimer se, zatim, koristi i za oblaganje tekstilnih podloga. Ova materija ima veliku mehaničku otpornost, a obični organski rastvarači je praktično ne napadaju. U izvesnim slučajevima zamera joj se osetljivost na vlagu, koja dovodi do promene dimenzija. Međutim, njena izdržljivost na povišenim temperaturama je izvanredna.

RILSAN. Polazna materija je, u principu, ricinusovo ulje. Njegovim zagrevanjem dobija se undecilenska kiselina koja se bromuje bromovodoničnom kiselinom u prisustvu benzoil-peroksida ili acetil-peroksida; dobijene bromovane kiseline se kristališu u petrol-etru radi razdvajanja dva izomera; 11-bromoundecilenski izomer tretira se amonijakom na toplom ili na hladnom. Zatim se aminoundecilenska kiselina polimerizuje na 215°C u atmosferi azota.

Ostali poliamidi se praktično koriste samo u tekstilnim predionicama.

LINEARNI POLIESTRI. Ovi polimeri poliglikoltereftalata, koji su poznatiji kao sintetička vlakna (dakron, tergal), koriste se i u obliku folija vrlo velike mehaničke čvrstoće.

OSTALE PLASTIČNE MATERIJE

Svake godine industrija lansira znatan broj novih proizvoda koji nisu za potcenjivanje. Ne može se propustiti da se navede politetrafluoroetilen (teflon), koji se odlikuje izvanrednom mehaničkom otpornošću, stabilnošću prema većini reagensa i izdržljivošću na povišenim temperaturama. Pored toga, velika klasa silikona zasluživala bi više od prostog pomena, mada su njihove primene sasvim specijalne; njihova struktura je na granici između organske i neorganske hemije, pri čemu prisustvo silicijuma u polimernom nizu dejstvuje kao ugljenik — osnova organske hemije — ili više od ovoga. Među termoplastičnim smolama pomenućemo još: polihlorotrifluoroetilen, koji je po osobinama sličan teflonu; polivinilidenfluorid (Kynar), koji je otporan prema većini rastvarača; kopolimere etilen-vinil-acetat ili etilen-etil-akrilat, koji su komercijalizovani oko 1965.

U kategoriji termootvrdnjavajućih smola, pomenimo dialil-ftalat, sa ili bez staklenih vlakana kao punila, koji se može ubrojati u klasu poliestra, prah za livenje izveden od furana (sa azbestnim punilom za industrijska livenja), tečne alilne smole (za stakla oftalmoloških naočara). Treba takođe napomenuti i galalit, dobijen iz kazeina iz mleka, mada su njegove primene dosta ograničene.

Metode prerade

OBRADA, ZAVARIVANJE

Razne plastične mase dolaze do potrošača bilo u obliku poluproizvoda — folija i ploča, cevi, šipki i raznih profila, bilo u obliku praha za livenje, ili još i konačnih proizvoda koji zahtevaju doradu: malu obradu, zavarivanje, poboljšavanje izgleda površine itd.

Poluproizvodi se mogu seći na način koji zavisi od strukture plastične materije. Meke materije, kao što su celulozni derivati ili vinilne smole, mogu se seći makazama za karton; za velike debljine ili za tvrde materije koristi se testera sa malim zupcima: trakasta testera; kružna testera. U izvesnim slučajevima može se raditi i kleštima.

Bušenje velikih debljina i tvrdih materija dosta je slično bušenju mekih metala, ali burgije moraju biti oštrije. Za tokarenje se često koriste oruđa analogna onima koja se upotrebljavaju za metale. Narezivanje i urezivanje navoja izvode se klasičnom tehnikom.

Spajanje više delova od plastičnih materija je specifičnije. Materije za koje se mogu naći isparljivi rastvarači mogu se lepiti uz kraće posredovanje rastvarača ili rastvora te materije u njemu: to je slučaj celuloznih derivata i većine termoplastičnih smola. Smole koje otvrdnjavaju na toploti teško se lepe. U izvesnim slučajevima može se pribeći katalizovanim monomerima ili specijalnim adhezivima. Termoplastične materije kao što su kruti polivinil-hlorid ili polietilen obično se lepe »autogenim« metodom, uz korišćenje šipke od iste materije i duvaljke za vreo vazduh. Ovaj postupak se primenjuje u proizvodnji aparata ili čabrova za industriju. Polietilen u folijama vari se pomoću mašina za tačkasto zavarivanje. Tako se izrađuju torbe ili kese. Plastifikovani polivinil-hlorid u folijama zavaruje se elektronskim mašinama: predmeti za odevanje, kišni mantili itd.

OBLIKOVANJE

Tehnike oblikovanja primenjuju se uglavnom na termoplastične materije.

SAVIJANJE, ISTEZANJE, ŠTAMPANJE, UTISKIVANJE. Ovde se koristi plastičnost materije na toploti. Na taj način se savijaju cevi ili tanke šipke za oblaganje cevi ili za druge različite primene. Prethodno zagrejane debele folije mogu se štampati uz pomoć graviranih metalnih ploča da bi se utisnuo neki crtež u reljefu ili udubljenjima. Folije se mogu utiskivati posle zagrevanja primenom pritiska koji proizvodi ispupčenje nekog kalupa. Tako se proizvode čaše, tanjiri od metakrilne smole. Pritisak za oblikovanje može da bude prosto pritisak vazduha i tako se proizvode kupole sfernog oblika od metakrilne smole. Ako se ovaj pritisak vazduha uvede između dve zagrejane folije koje su duž ivice pritegnute u kalupu, mogu se proizvesti šuplji predmeti: igračke, lutke.

Metakrilna smola isečena na trake može da se upreda na toploti, da se savija, utiskuje, za izradu predmeta za prikazivanje u izlozima.

OBLIKOVANJE POD VAKUUMOM. Ako se folija termoplastične materije stavi u neki okvir, a zatim postavi iznad nekog kalupa iz koga se onda izvuče vazduh, posle zagrevanja folije dolazi do njenog usisavanja u kalup i oblikovanja. Tako se proizvode lavaboi od metakrilne smole. Jedno poboljšanje postupka sastoji se u tome da se folija jednovremeno pritiskuje nekim ispupčenjem radi oblikovanja i da se zatim isključi vakuum da bi materija obložila ispupčenje. Oblikovanje pod vakuumom u užem smislu vrši se u mašinama koje su specijalno konstruisane, tako da se zagrevanje folije i njeno oblikovanje usisavanjem izvodi na kalupu. Tako se proizvode svetleći natpisi, ambalaža, dvostruka vrata za hladnjake.

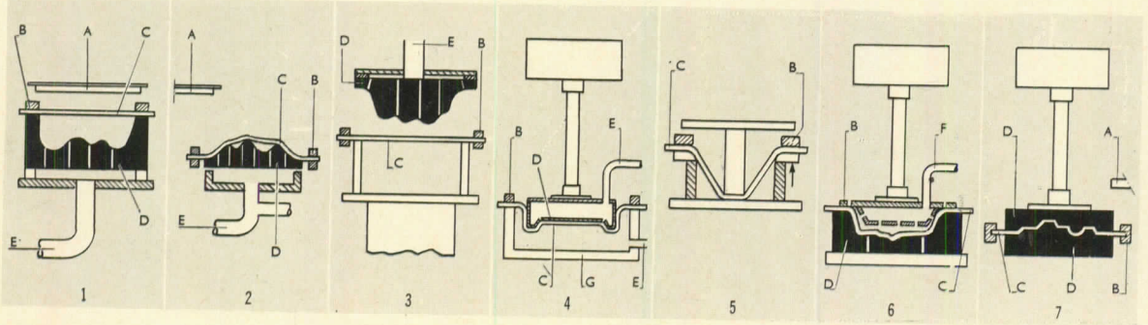
LIVENJE KOMPRESIJOM I SLOJEVITE PLASTIČNE MASE

Ova tehnika se primenjuje praktično samo za prah za livenje od termootvrdnjavajućih smola, a proizvodnja slojevitih plastičnih masa zahteva podloge impregnirane takvom smolom.

LIVENJE KOMPRESIJOM. Zbog jednostavnog postupka, to je bila prva tehnika livenja koja je primenjena za plastične materije u prahu. Sastoji se u zagrevanju praha za livenje u jednom kalupu uz istovremeno primenjivanje snažnog mehaničkog pritiska. Pod uticajem toplote materija se topi i ulazi u šupljinu kalupa, pri čemu pritisak obezbeđuje idealno popunjavanje i dobro oblikovanje. Jednovremeno toplota prouzrokuje konačno polimerizovanje smole i, kao rezultat toga, njeno definitivno otvrdnjavanje. Vađenje iz kalupa može se izvesti uz pomoć toplote, jer se materija više ne može deformisati zagrevanjem. Nedostatak ovog postupka proističe upravo iz ove poslednje konstatacije: loše izliveni komadi, odnosno škart, ne mogu se ponovo istopiti da bi se materija iskoristila. To je, dakle, nepopravljiv gubitak.

Jedini slučaj u sadašnjoj praksi u kome se koristi livenje neke termoplastične materije kompresijom jeste proizvodnja gramofonskih ploča od krutog polivinil-hlorida ili polistirola.

Moderne prese su automatske i ciklus livenja se definiše pomoću jednog uređaja za programiranje koji obezbeđuje zatvaranje prese, primenu pritiska, otvaranje prese, a zatim vađenje izlivenog komada iz kalupa i njegovo izbacivanje. Presovanje je hidraulično, ali ponekad i mehaničko. Kalupi su od specijalnih hromnih čelika i njihova koncepcija je vrlo važna za dobijanje dobrih rezultata. Oni



POSTUPCI PRI KOJIMA SE KORISTI VAKUUM ILI KOMPRIMOVANI VAZDUH

1 - negativno oblikovanje
2 & 3 - oblikovanje nabiranjem
4 & 6 - oblikovanje klipom za nabiranje

MEHANIČKI POSTUPCI

5 - utiskivanje
7 - presovanje

Postupci za oblikovanje plastičnih folija:
A—grejni izvor (infracrveni); B—okvir za pritiskivanje folije; C—folija; D—kalup ili klip; E—usisavanje (veza sa vakuum-pumpom); F—uduvavanje vazduha; G—komora.

se moraju obraditi sa vrlo velikom preciznošću. Da bi se ubrzalo livenje, koristi se prethodno oblikovanje ili pastile sa dimenzijama koje odgovaraju kalupu; one se prave hladnim presovanjem praha u odgovarajućoj presi. Ovakve pastile se elektronski zagrevaju — postave se između elektroda na koje se dovodi visokofrekventni napon — i zatim se brzo unose u kalup da bi se skratilo vreme njihovog pečenja u kalupu.

Prahovi za livenje su obično na bazi fenol-formolne, karbamid-formolne ili melamin-formolne smole. Odskora se koriste i »premiksi«, koji se sastoje od poliestarskih smola pojačanih staklenim vlaknima.

SLOJEVITE PLASTIČNE MASE VISOKOG PRITISKA. Impregnisanjem listova hartije rastvorom fenol-formolne smole, a zatim uvođenjem ovih osušenih listova između ploča višestepene prese, toplim presovanjem se dobijaju kompozitni materijali koji se nazivaju »listaste« ili »slojevite« plastične mase. Ovi materijali se koriste u elektrotehnici za izolatorske ploče. Ako se površinski slojevi izrade od štampane hartije i bezbojne melaminske smole, dobijaju se dekorativne slojevite mase za izradu ploča za stolove, sedišta, tezgi, obloga za nameštaj ili pregradnih zidova.

SLOJEVITE PLASTIČNE MASE NISKOG PRITISKA. To su, u stvari, poliestri pojačani staklenim vlaknima. »Čaršavi« od staklenih vlakana impregnišu se tečnom smolom, postave između dva lista celofana koji sprečavaju lepljenje za kalupe i zatim presuju pod malim pritiskom da ne bi došlo do izbacivanja smole, uz jednovremeno zagrevanje koje ubrzava polimerizaciju, odnosno otvrdnjavanje smole. Tako se u ogromnim mašinama za kontinualan rad izrađuju talasaste ploče. Namotavanjem na jedan valjak analognim postupkom proizvode se cevi vrlo velikog prečnika.

Uz pomoć relativno jeftinih kalupa mogu se izrađivati i gotovi proizvodi: školske table, kabine za kamione, karoserije za automobile, čamci za razonodu. Epoksidne smole se takođe koriste za izvesne proizvode za industrijsku namenu.

Dekorativne slojevite plastične mase takođe se proizvode od poliestara pojačanih staklenim vlaknima ili od neke poliestarske smole koja se nanese na vlaknastu podlogu i polimerizuje na toploti pod pritiskom.

LIVENJE POD PRITISKOM, LIVENJE PRENOŠENJEM

Ove dve tehnike su u principu vrlo srodne; livenje pod pritiskom se uglavnom koristi za termoplastične smole, dok se livenje prenošenjem primenjuje kod termootvrdnjavajućih smola.

LIVENJE POD PRITISKOM. Prah za livenje zagreva se u valjku jedne prese, tako da dobije konzistenciju paste ili sirupa; zatim se stopljena masa klipom potiskuje kroz jedan otvor u unutrašnjost zatvorenih kalupa koji se nalaze na niskoj ili umerenoj temperaturi. Ciklus je vrlo brz i njegova brzina je praktično ograničena samo vremenom potrebnim za potpuno hlađenje materije u kalupu, što je neophodno da bi se predmeti mogli izvaditi iz njega bez deformisanja.

Presa za potiskivanje može biti vertikalna ili horizontalna; vertikalna presa je pogodnija za proizvode koji sadrže metalne delove zatopljene u plastičnu masu. Pritisak se saopštava klipu pomoću hidrauličnog uređaja, a kod malih presa ponekad i pneumatičkog. Valjak ili lonac prese zagreva se električnom strujom do kontrolisane temperature, koja zavisi od prirode korišćenog praha za livenje.

Da bi se poboljšala produktivnost presa, one se snabdevaju uređajima za prethodno plastifikovanje praha za livenje, nekom vrstom malih ekstruzionih presa u kojima Arhimedov zavrtanj meša masu za vreme njenog zagrevanja i potiskuje je u sud za potiskivanje. Ovi uređaji se primenjuju kod presa sa velikim kapacitetom potiskivanja.

U novije vreme se klasičan klip zamenjuje zavrtnjem koji najpre proizvodi prethodno plastifikovanje zahvaljujući rotacionom kretanju, a zatim potiskuje masu translacionim kretanjem napred. Ova tehnika se veoma razvila, naročito kada su se pojavile materije sa povećanom termičkom stabilnošću, koje u mnogim primenama mogu da zamene termootvrdnjavajuće smole. Najviše korišćene materije su polietileni, polistiroli i njihovi kopolimeri, posle kojih dolaze druge termoplastične materije: polikarbonati, poliacetali, acetobutirat celuloze, poliamidi itd.

LIVENJE PRENOŠENJEM. To je tehnika potiskivanja primenjena na termootvrdnjavajuće smole. Ona se koristi modifikovanim presama, koje sadrže jedan dodatni klip sa posebnom komandom. Kalup za prenošenje je zatvorenog tipa, dok je kalup za komprimovanje otvoren. Materija se u obliku pastile koja je prethodno elektronski zagrejana, unosi u komoru za presovanje koja se nalazi iznad šupljine kalupa. Prelaz mase iz komore za presovanje u šupljinu kalupa vrši se pod dejstvom dodatnog klipa. Dolazi do »prenošenja« materije iz jedne šupljine u drugu.

Ovaj postupak je interesantan kada je posredi livenje termootvrdnjavajućih smola da bi se proizveli predmeti koji sadrže lomljive metalne delove. Naime, pri livenju pod pritiskom došlo bi do krivljenja metalnog dela zbog toga što bi se pritisak kome je izložena plastična materija prenosio i na njega. Nasuprot tome, u sistemu koji se koristi prenošenjem, materija dolazi u šupljinu kalupa istopljena, pa, stoga, ne može da deformiše prisutne metalne delove.

Pritisak koji je potreban u ovoj tehnici znatno je viši nego u slučaju proste kompresije: oko 2000 kg/cm², umesto 150-500 kg/cm², zavisno od materije. Površina komore za presovanje treba da bude za 15-20 % veća od šupljine kalupa, da pritisak prenošenja ne bi prouzrokovao otvaranje kalupa i neželjeno isticanje materije.

LIVENJE EKSTRUZIJOM je varijanta moderne tehnike potiskivanja zavrtnjem-klipom. Ona se primenjuje pri livenju plastifikovanog polivinil-hlorida, naročito u proizvodnji obuće.

Ovde se, u stvari, ne koristi presa za potiskivanje, već naročita ekstruziona presa koja radi diskontinuirano. Na taj način se obezbeđuje plastifikovanje materije početnim zagrevanjem i jako mehaničko naprezanje izazvano rotacijom zavrtnja u valjku mašine. Topla plastifikovana materija potiskuje se kroz otvor na mašini u kalupe raspoređene duž ivice jednog rotacionog transportera. Zatvaranje kalupa je mehaničko ili hidraulično. U klasičnim mašinama ovakav transporter nosi deset kalupa koji mogu da budu različiti. Takav uređaj može da izlije obično dva para obuće u minutu.

EKSTRUZIJA

Ova tehnika je veoma bogata mogućnostima, jer se ekstruziona presa može spojiti sa raznim uređajima, zavisno od proizvoda koji želimo dobiti.

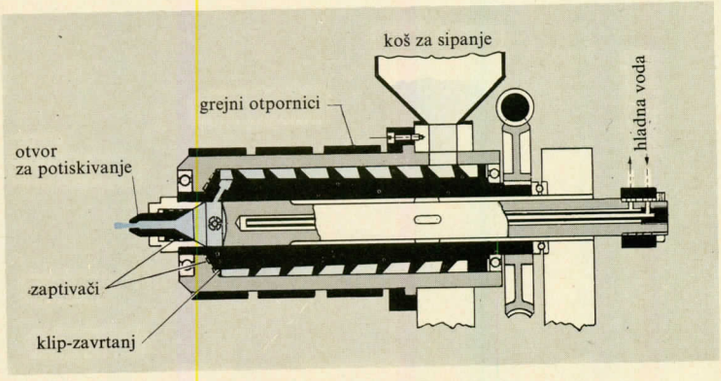
EKSTRUZIJA PROFILA. U ovom najjednostavnijem slučaju ekstruziona presa se u osnovi sastoji od beskonačnog zavrtnja, koji se okreće u valjku opremljenom uređajem za električno zagrevanje spolja. Oblik zavrtnja se podesi prema materiji koja se ekstruduje i koja mora biti termoplastična. Materija se potiskuje zavrtnjem kroz rešetku koja pruža otpor prolaženju smole i time obezbeđuje njeno plastifikovanje. Smola, čija se viskoznost podesi, istiskuje se zatim iz mašine kroz odgovarajuću cev, koja joj daje konačan oblik. Na taj način se dobija neprekidan profil, koji može biti cev, traka ili bilo koji drugi oblik. Ovaj profil zatim prolazi kroz pogodne uređaje za istezanje, hlađenje i podešavanje dimenzija (podešavanje kalibra cevi uvlačenjem u »dogled«). Najčešće se koriste elastični ili kruti polivinil-hlorid, polietilen, kopolimeri stirol-butadijen-akrilonitril (A.S. i A.B.S.), acetobutirat celuloze.

• *Oblaganje električnih kablova.* U ovom slučaju se ekstruziona presa oprema šupljim zavrtnjem za prolaz žica ili kablova koje treba izolovati, ili ugaonom glavom u koju se žica ili kabl uvode poprečno u odnosu na osu ekstruzije. Izolator može da bude na bazi polivinil-hlorida ili polietilena, a može da bude pokriven još jednim omotačem od polivinil-hlorida, sintetičke ili prirodne gume, ili polietilena. Pored ekstruzione prese, uređaj sadrži i vitlove za žicu, rezervoar za hlađenje posle ekstruzije, uređaj za vučenje, kalemove i pomoćne uređaje: merač dužine, aparat za kontrolisanje prečnika, aparate za ispitivanje i označavanje.

EKSTRUDOVANJE FOLIJA. Ako cev za ekstrudovanje sadrži ravan prorez velike širine, čija je izrada, uostalom, vrlo delikatna, moguće je ekstrudovati folije čija se debljina po izlasku iz mašine podešava prolaženjem između cilindara za valjanje i koje se zatim ohlade. Ove folije mogu biti od polistirola ili njegovih kopolimera i koriste se za proizvodnju vrata sa dvostrukim zidovima za hladnjake, tehnikom oblikovanja pod vakuumom. One mogu biti i od poluplastifikovanog polivinil-hlorida i tada se koriste za proizvodnju četvrtastih pločica za pokrivanje podova. Koriste se takođe i druge smole.

EKSTRUDOVANJE TALASASTIH PLOČA. Ova proizvodnja je veoma delikatna jer zahteva veliko iskustvo i pogodnu smolu: polivinil-hlorid sa vrlo velikom stabilnošću na višim temperaturama. Primenjuje se tehnika izvedena od prethodne, kojom se ekstrudovana folija, dok je još vruća, načini talasastom uz pomoć specijalnog uređaja.

EKSTRUDOVANJE POJEDINAČNIH VLAKANA. Ekstruziona presa sadrži cev za ekstrudovanje vlakana, koja se po izlasku iz mašine istežu, hlade, stabilizuju u sušnici i namotavaju.



Principijelna shema prese za potiskivanje.

Proizvode se vlakna od krutog polivinil-hlorida, poliamida (najlon, rilsan), polietilena dobijenog pod niskim pritiskom, polipropilena, a koriste se za proizvodnju četaka, metli, ženskog rublja, konca za pecanje, velova za zaštitu od insekata, kablova i užadi.

EKSTRUZIJA-DUVANJE. Ako se ekstruduje tanka cev velikog prečnika i ako se jednovremeno održava izvestan pritisak vazduha u unutrašnjosti cevi, dolazi do njenog širenja, tj. do porasta njenog prečnika i stanjivanja zidova. Ako se u tom stanju spljošti i ohladi, dobija se cevasta navlaka koja se može upotrebiti za proizvodnju torbi i kesa poprečnim zatapanjem uz pomoć mašina koje mogu biti i automatske. Na taj način se proizvode navlake od polietilena i krutog polivinil-hlorida.

EKSTRUZIJA-NADIMANJE. Ekstruziona presa proizvodi cev određenog prečnika, zavisno od predmeta koji se izrađuje. Ova zagrejana cev pod dejstvom sopstvene težine ulazi u otvoreni kalup, gde biva uhvaćena uz jednovremeno duvanje vazduha koji je širi i čini da prianja uza zidove kalupa. Ova tehnika se jako raširila i koristi se za proizvodnju ambalaže, kao što su boce od polivinil-hlorida za prehrambene tečnosti (ulje, vino), ili od polietilena za deterdžente. Na taj način se može proizvesti ambalaža velike zapremine — do 50 litara, pa i više. Ista tehnika se koristi za proizvodnju šupljih igračaka (lopti, lutaka) i delova za automobile.

OBLAGANJE HARTIJE. Mogućnosti koje nudi ekstruziona presa koriste se još za pokrivanje hartije jednim slojem polietilena koji izlazi iz ravnog proreza mašine. Debljina pokrivača može da varira u praksi od 13/1000 do 8/100 milimetra. Proizvodi se i nepromočiva hartija za održavanje i pakovanje proizvoda osetljivih na vlagu.

• *Ekstruzione prese.* Ekstruziona presa mora biti podešena prema svrsi za koju je namenjena; to znači da se mora izabrati tip zavrtnja koji odgovara ekstrudovanom materijalu (zavrtanj sa jednim ili dva otvora), ili da treba koristiti mašinu sa jednim ili dva zavrtnja, pri čemu je ovaj poslednji tip naročito pogodan za kruti polivinil-hlorid.

Protok proizvoda kroz mašinu zavisi od prečnika zavrtnja, brzine njegove rotacije, kao i od njegove dužine. Obično se radi sa zavrtnjima čija je dužina osamnaest do dvadeset puta veća od prečnika. Prečnik može da varira od 30 do 300 mm.

VALJANJE

Valjaonički stan je mašina koja sadrži bar dva valjka jedan iznad drugog, ali obično postoje tri ili, čak, četiri valjka. U slučaju mašine sa tri ili četiri valjka, ovi su raspoređeni ili u obliku slova L, ili u obliku obrnutog L, ili u obliku Z, što zavisi od tipa mašine i namene. Valjci su od poliranog livenog gvožđa, a ponekad od čelika. Njihova širina može da dostigne 2m, a prečnik 60 cm. Njihovo međusobno rastojanje može se podešavati, kao i brzina rotacije.

Jedan valjaonički stan može da proizvodi folije od polivinil-hlorida debljine od 8/100 do oko 1 mm. Brzina proizvodnje može da dostigne 50 m/min. To je vrlo skupa mašina, utoliko više što treba predvideti materijal za pripremanje materije koju treba plastifikovati i zagrevati pre unošenja u mašinu. Priprema se može izvršiti na valjcima, u unutrašnjim mešalicama tipa Banburi, ili u ekstruzionim presama koje omogućuju želatiniranje. Na izlazu iz valjaoničkog stana, folija se može štampati između dva valjka od kojih je jedan graviran, a drugi obezbeđuje protivpritisak. Zatim se folija ohladi na jednom doboŠu i namotava.

Takođe je moguće da se folija dobijena valjanjem utisne preko neke tkanine, ukoliko se raspolaže mašinom sa četiri valjka. Tako se može proizvesti imitacija kože za izradu raznih predmeta za garderobu ili za dekorisanje, zatim za izradu nameštaja, automobilskih karoserija ili materijala za železničke vagone. Ova tehnika je pogodna samo za proizvodnju u velikim serijama, s obzirom na cenu korišćene opreme; ona, međutim, omogućuje da se postignu niže cene koštanja nego kod konkurentnih tehnika — oblaganja ili ekstruzije. Pri ovoj tehnici obično se upotrebljava samo polivinil-hlorid, prirodna ili veštačka guma.

PLASTIKOVANJE, OBLAGANJE U LEBDEĆEM SLOJU, LIVENJE CENTRIFUGIRANJEM

Ove tehnike zahtevaju polazni materijal u obliku finog praha koji se topi pri zagrevanju.

PLASTIKOVANJE. Metalni predmeti se oblažu zaštitnim slojem sintetičke smole uz pomoć specijalnog pištolja. Smola, koja se nalazi pod pritiskom vazduha u jednom sudu, izlazi u obliku praha kroz cev pištolja; plamen duvaljke obuhvata mlaz praha i stapa ga. Materija u stopljenom stanju udara u metalnu podlogu, očvrsne, prianja uz nju i ravnomerno se na njoj raspoređuje.

Ovaj postupak je primenljiv i na tečne smole koje se polimerizuju. U tom slučaju upotrebljava se još jedna cev kroz koju prolazi određena količina katalizatora, jednovremeno dok kroz prvu cev prolazi smola. Zagrejana smola se pod uticajem katalizatora polimerizuje na podlozi.

OBLAGANJE U LEBDEĆEM SLOJU. Predmeti koje treba obložiti prethodno se zagrevaju nekoliko minuta u sušnici ili infracrvenim grejačima do temperature koja je viša od tačke topljenja materije kojom se oblaganje vrši. Zagrejani predmeti se onda unose i ostave nekoliko sekundi u kontaktu sa slojem praha sintetičke smole, koji lebdi zahvaljujući uzlaznoj struji gasa (vazduha); plastična materija se topi u kontaktu sa vrelim predmetima i prianja uz njih.

Za ovu svrhu se koristi većina sintetičkih smola, naročito one koje su termoplastične.

LIVENJE CENTRIFUGIRANJEM. U šupalj kalup se stavlja prah polietilena. Uz pomoć pogodnog uređaja kalup se rotaciono kreće u unutrašnjosti jedne peći. Polietilen se topi i pokriva unutrašnje zidove kalupa; pre vađenja iz kalupa smola se ohladi da bi se stvrdnula.

Jedna varijanta ovog postupka, koja se primenjuje na vrlo velike predmete, kao što su burad, cisterne itd., sastoji se u tome da se kalup napuni polietilenom u prahu; kalup se zagreva dok ne počne topljenje smole; čim se na zidu kalupa formira »koža«, iz njega se udaljava višak smole, a zagrevanje se produži radi izjednačavanja pokrivača. Zatim, kad se kalup ohladi, iz njega se vadi materija.

PROIZVODNJA FILMOVA

Fotografski, kinematografski i drugi filmovi proizvode se polazeći od nitroceluloze ili celuloznog acetata. Postoje dva tipa mašina za livenje: mašina sa dobošem i mašina sa trakom.

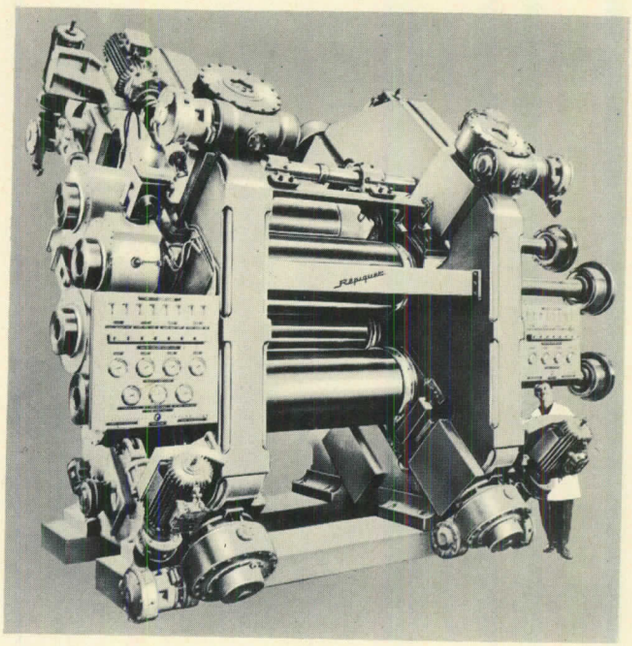
Prva sadrži kao bitan deo jedan doboš prečnika 3 m i širine koja varira, ali obično ne prelazi 1,10 m. Uz pomoć pogodnog uređaja, rastvor se u tankom sloju sipa na gornji deo doboša, nešto iza najviše tačke doboša u odnosu na smer okretanja. Doboš se zagreva i pokriva plastičnom masom u unutrašnjosti hermetički zatvorenog suda; posle jednog punog obrta doboša, film se sa njega skida i prolazi kroz jedan prorez, zatim preko više valjaka, da bi se ohladio, i najzad se namotava.

Mašina sa trakom, koja se više koristi od prethodne, sastoji se od beskrajne bakarne trake koja se okreće na dva doboša, jednom komandom, nepokretnom, i drugom pokretnom, koji služi za povlačenje. Trake mogu imati različite dužine (do 28 m) i širine (do 1,40 m). Debljina bakarnih traka je nešto manja od 1 mm; njihova proizvodnja je vrlo delikatna i zahteva veliku pažnju, jer bi se svi defekti reprodukovali na izlivenom filmu. Stoga se traka ne pokriva direktno filmom, već se na nju najpre nanosi sloj želatina. Film koji se skida sa trake, suši se, a zatim namotava.

OBLAGANJE

Obložene tkanine nekad su se proizvodile pomoću rastvora gume ili nitroceluloze (gumirana platna, moleskini, nepromočive tkanine). Približno od 1940. znatno se razvila i proširila upotreba vinilnih plastisola.

Vinilni plastisol je suspenzija jednog polivinil-hlorida specijalnog kvaliteta u tečnom plastifikatoru. Suspenzija se na hladnoći može održati više sedmica bez



Valjanje. *Fot. X.*

velikih promena. Međutim, ako se temperatura povisi, plastisol se želatinizuje: smola se disperguje u plastifikatoru i nastaje čvrsta masa.

Uređaj za oblaganje tkanina sastoji se od jedne glave za oblaganje na kojoj se nalazi prsten postavljen iznad tkanine koja se oblaže, i čiji se položaj može regulisati. Ovaj prsten se može postaviti iznad gumenog valjka (spreading), ili direktno na tkaninu (prsten u vazduhu), ili, najzad, na beskrajnu gumenu zavesu. Izbor materijala i tehniku određuje priroda posla.

Pri prolasku ispod prstena tkanina se pokriva tečnim slojem plastisola koji se, i pored svoje viskoznosti, ravnomerno raspoređuje. Tako obložena tkanina prolazi, zatim, kroz tunel za želatinizovanje u kome se održava temperatura od oko 170°C. U njemu se plastisol želatinizuje i otvrdne, ali sačuva dobru elastičnost. Po izlasku iz tunela, obložena tkanina dolazi na doboš za hlađenje, a zatim se namotava na kalem.

Ako konačni sloj treba da bude debeo, postupak prolaženja ispod prstena ponavlja se dva ili više puta, pri čemu se svaki put na nju nanese po jedan tanak sloj. Rezultat je mnogo bolji nego ako se odjednom nanese debeo sloj.

Tkanina se može obložiti sa obe strane u dve uzastopne operacije. Jednako se oblažu tkanine za pokrivanje podova i upredena vlakna.

LIVENJE ROTIRANJEM, ZAMAZIVANJEM, SIPANJEM, POTAPANJEM

Kod svih ovih postupaka obično se koriste vinilni plastisoli, mada se može upotrebiti i polietilenski prah (rotacija), lateksi (potapanje), termootvrdnjavajuće smole (sipanje).

LIVENJE ROTIRANJEM. U šupalj kalup se unese određena količina plastisola koja odgovara težini konačnog proizvoda. Rotiranjem kalupa, koji se nalazi u jednom zagrejanom omotaču, plastisol se ravnomerno raspoređuje na unutrašnjim zidovima kalupa i želatinizuje, formirajući homogeni sloj. Posle hlađenja, predmeti se mogu izvaditi iz kalupa.

LIVENJE ZAMAZIVANJEM. Ovaj postupak je jedna varijanta prethodnog i koristi se tehnikom livenja gipsanih predmeta. Pošto se prethodno zagreje u sušnici, kalup se napuni plastisolom. U kontaktu sa vrelim kalupom, plastisol se želatinizuje i formira sloj čija debljina postepeno raste. Kada se prethodnim ispitivanjem, koje zavisi od iskustva, proceni da je sloj dovoljan, udalji se višak plastisola i zagrevanjem u sušnici želatinizuje se unutrašnji pokrivač. Masa se ohladi pre vađenja iz kalupa.

LIVENJE SIPANJEM. Kada je reč o proizvodnji punih predmeta, plastisoli se mogu liti sipanjem u kalupe. Želatinizovanje se vrši zagrevanjem u sušnici. Za ovu tehniku se sve više koriste epoksidne, termootvrdnjavajuće smole. Smoli se dodaje i punilo kao što je drveno brašno i jedan agens za otvrdnjavanje. Sipanje u kalupe se vrši pod dejstvom Zemljine teže. Ako su posredi mali predmeti, kalupi su od mekog čelika, dok se za teške predmete koriste kalupi od legure aluminijuma. Nije potreban nikakav pritisak, ali se, radi udaljavanja vazduha iz mase i sprečavanja stvaranja mehurova, upotrebljava vakuum-pumpa. U liv se mogu uneti i metalni delovi.

LIVENJE POTAPANJEM. Ova tehnika se ranije primenjivala na gumeni lateks za izradu obuće, čizama, rukavica itd. Zatim je proširena na vinilni plastisol. Prethodno zagrejani oblici potapaju se u masu; trajanje potapanja zavisi od debljine predmeta koji se proizvodi; vađenje iz mase vrši se uz rotaciono kretanje, da bi se izbeglo formiranje kapljica; želatinizovanje se dovrši u sušnici.

Potapanje se primenjuje pri izradi postava, naročito za postave rukavica.

PENE

Upotreba šupljikavih plastičnih proizvoda veoma se raširila od 1950-1960. Plastične pene se mogu proizvesti praktično od svih sintetičkih smola, ali, iz komercijalnih razloga, proizvodnja je ograničena na nekoliko tipova smola sa interesantnim karakteristikama.

PENE OD POLIURETANA. Izražavajući se hemijski, ove pene se dobijaju reakcijom jednog diizocijanata (obično diizocijanata toluola) sa nekim poliestrom ili polietrom. Formiraju se u pokretnim koritima, u kojima pomoću mešalice, koja obezbeđuje potpuno mešanje komponenata, izlazi neprekidna traka, zahvaljujući naizmeničnom poprečnom kretanju u odnosu na translaciono kretanje pokretnog korita. Brzina isticanja mora biti takva da prianjanje uzastopnih traka bude savršeno, bez nabora. Pokretno korito se sa unutrašnje strane pokrije hartijom na koju poliuretan prianja. Ovim se sprečava lepljenje smole na uređaj za isticanje. Na kraju se hartija oguli sa površine bloka pene. Do nastajanja pene dolazi usled vodene pare koja se oslobađa u toku reakcije dveju komponenata od kojih nastaje konačna smola. Ova voda ostaje zarobljena u masi i tako formira ćelije. Elastičnost, odnosno krutost pene zavise od izbora korišćenog poliestra ili polietra. Posle konačnog polimerizovanja pene u tunelu u kome se održavaju potrebni uslovi, blokovi se seku vrelom žicom do željenih dimenzija. Postoje i prenosne mašine koje omogućuju da se pena sipa direktno u prostor koji treba napuniti izolatorskom masom: na primer, prostor između dvostrukih zidova zgrada.

PENA OD POLISTIROLA. Kruta pena od polistirola se proizvodi polazeći od polistirola specijalnog kvaliteta koji sadrži pentan kao agens za nadimanje. Najpre se izvrši prethodno nadimanje smole u struji pare, ili u atmosferi pare (sušnica). Temperatura mora da dostigne 110°C. Za 3 do 5 minuta se dobija gustina manja od 20 g/dm^3. Zatim se proizvod ostavi izvesno vreme na vazduhu da bi se omogućila difuzija u unutrašnjost ćelija. Tek posle toga se pristupa samom livenju.

Operacija livenja se izvodi u kalupima zagrejanim na 100-120°C. Pri ovome dolazi do dodatnog širenja i čestice smole se spajaju međusobno. Kalupi su od aluminijuma, lakog metala ili nerđajućeg čelika i imaju najmanje dve strane načinjene od ploča sa rupama kroz koje prolazi para koja proizvodi konačno nadimanje.

FENOLNE PENE. Polazna smola nalazi se u vodenoj sredini u koju se dodaje i jedan emulgator. Agens koji dovodi do stvaranja pora može biti laki benzin koji ključa na 40 do 80°C. Komponente se brzo pomešaju pre sipanja u kalupe i u poslednjem momentu se dodaje kiseli katalizator.

Jedan postupak koji je u industriju uveden 1965. omogućuje proizvodnju neprekidnih izolacionih ploča.

Prednost ovog tipa pene je njena velika otpornost na vatru i toplotu. Stoga se može koristiti za termičku i akustičku izolaciju zgrada. Ove pene služe i kao lak unutrašnji sloj pri proizvodnji vrata, unutrašnjih zidova u stanovima, jer se s obe strane mogu prekriti (sendviči) dekorativnim slojevitim pločama.

OSTALE PENE. Smole urea-formol koriste se i za proizvodnju pena. Za ovu svrhu se naročito koristi butil-naftil-sulfonska kiselina kao penušavi agens i katalizator. Za proizvodnju elastičnih pena upotrebljavaju se polivinil-hloridni plastisoli, kojima se dodaje neki agens za stvaranje pora. Do nastajanja pene dolazi u trenutku želatinizovanja razlaganjem agensa za stvaranje pora.

Za proizvodnju plastičnih pena takođe se koriste polietilen, silikoni i epoksidne smole.

OBRADA

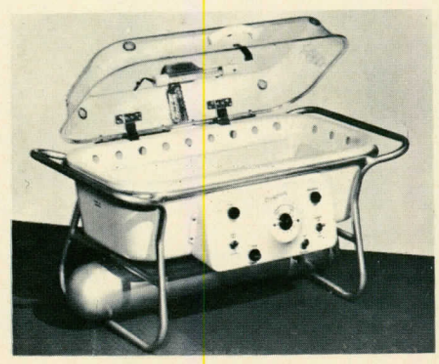
I pored težnje da se operacijom livenja dobiju potpuno završeni predmeti, oni često zahtevaju izvesnu obradu: poliranje, metalizovanje, štampanje, označavanje.

POLIRANJE. Ova operacija obrade dolazi obično pre radova na ukrašavanju ili označavanju. Mali predmeti se mogu polirati mešanjem u osmougaonom sudu sa malim polutvrdim drvenim klinovima uz dodavanje voštanih materija i malo kamena. Veliki predmeti se poliraju na valjku od kretona, zatim na valjku od filca uz primenu veoma slabo abrazivnih voštanih materija. Sjaj se postiže na valjku od flanela.

METALIZOVANJE. Bakarisanje, posrebrivanje, pozlaćivanje mogu se postići klasičnim postupcima galvanoplastike. Za velike serije koristi se metalizovanje u vakuumu, koje je brže i ekonomičnije. Predmeti koji se metalizuju postave se na držače koji se unose u komoru za metalizovanje, u kojoj se metal isparava pod vakuumom i u tankim slojevima taloži na predmete.

Postoje i drugi postupci, kao što je anodno metalizovanje, kada se čestice metala izbacuju pod dejstvom visokofrekventne struje. Ponekad se koristi metalizovanje uz pomoć struje vrelog gasa *(schoopage)*.

ŠTAMPANJE, OZNAČAVANJE. Postupak pri štampanju zavisi od vrste materijala. Ako je reč o neprekidnom filmu, koristi se fleksografska mašina za štampanje; postoje takođe postupci koji se koriste za tkaninu: svileni ekran,





Prenosni inkubator od metakrilne smole. *Desno*, ambalaža. *Fot. X, Larousse.*

lionski okvir itd. Tip ovih uređaja zavisi od toga da li su predmeti ravni, okrugli, šuplji. Može se raditi tehnikom report ili ofset počev od klišea, ili sa šablonom i svilenim ekranom. Označavanje na toploti omogućuje utiskivanje sa naknadnim pozlaćivanjem ili bojenjem. Za plastične predmete mogu se takođe primeniti specijalne boje.

Primena

Primene su praktično beskonačne i jedino su ograničene samim karakteristikama plastičnih materija. Nedovoljna mehanička otpornost i neizdržljivost na toploti mogu da ograniče njihovu primenu u izvesnim okolnostima. Međutim, ta ograničenja stalno se smanjuju, a zauzvrat postoje mnogobrojni sektori primene gde samo plastične materije mogu da reše probleme koje nameću uslovi u kojima će se proizvedeni predmeti upotrebljavati.

POLJOPRIVREDA, PREHRAMBENA INDUSTRIJA, PAKOVANJE. Tek oko 1955, ove osnovne aktivnosti su otkrile prednosti plastičnih materija. Danas se poljoprivreda uveliko koristi filmovima od polietilena ili polivinil-hlorida kod gajenja ozimih kultura: staklene bašte, tuneli, zaštitni pokrivači. Da bi salata i drugo povrće postalo belo, koriste se crni filmovi.

Plastisoni ili plastične asure zamenjuju nekadašnje asure od slame za pokrivanje staklenih bašta i trapova. Oni ne trule, prozračni su i samo delimično zadržavaju svetlost, tako da malo usporavaju rast biljaka u periodu mraza. Vreće od polietilena služe za transport i čuvanje stočne hrane. Biljke se štite pomoću plastičnih kesa. Pri navodnjavanju koriste se nepromočivi filmovi za pokrivanje dovodnih kanala i sprečavanje gubitaka vode infiltracijom ili creva od polivinil-hlorida ili polietilena koja se mogu zakopati uz pomoć specijalnih plugova. U tropskim zemljama se grozdovi banana često uvijaju u polietilenske vreće.

Pakovanje i održavanje prehrambenih proizvoda u plastičnim omotačima (polietilen ili polivinil-hlorid) postali su počev od 1960. uobičajeni u Evropi. Ovi omotači, osim zaštitne uloge, imaju tu prednost da omogućuju da se zaštićeni proizvod može videti.

Najspektakularniji razvoj, naročito od 1964, bio je u proizvodnji boca od polivinil-hlorida za jestivo ulje, vino i druge tečnosti. Osim praktične strane ove nove ambalaže za masovne potrošače, ona je omogućila ogromne uštede u transportnim troškovima, ne samo smanjivanjem težine boca već i ambalaže u koju su one smeštene. Manja lomljivost plastičnih materija, u poređenju sa staklom, omogućila je upotrebu ambalaže od kartona, umesto nekadašnjih drvenih sanduka.

Plastične materije udružene jedne s drugima ili sa hartijom stvaraju kompozitne materijale za ambalažu: celofan-polietilenske folije, hartiju obloženu polietilenom itd.

ZGRADE I PREDMETI ZA DOMAĆINSTVO. Predmeti za domaćinstvo osvojili su naklonost potrošača znatno pre nego što su plastične materije prodrle zaista u samu zgradu. Polietilen, polistirol su na ovom polju osvojili značajno tržište u bezbroj primena: tanjiri, čaše, posude i pribor za salatu, zvono za sireve, posude za maslac, prese za limun, čabrice, kante za otpatke, obloge za kuhinjski nameštaj itd. U nameštaju su se takođe pokazale znatne prednosti ovih materijala: garniture za sedišta i fotelje od tkanina obloženih polivinil-hloridom, table za stolove i sedištva od dekorativnih slojevitih plastičnih masa ili armiranih poliestara.

U proizvodnji lustera koriste se metakrilne smole, jer su plastični lusteri manje lomljivi od staklenih. Izrađeni su i prozori i izlozi od metakrilne smole ili poliestra.

Široko se koriste pokrivači za podove od polivinil-hlorida, sa ili bez podloge od tkanine.

Za proizvodnju sanitarnih uređaja koriste se armirani poliestri ili metakrilna smola; od ovih materija proizvode se lavaboi, kade, klozetske šolje.

Upotreba vodovodnih cevi od krutog polivinil-hlorida povećava se i dalje zavisno od toga koliko se napušta ili smanjuje upotreba tradicionalnih materijala.

Međutim, primena plastičnih materija ne zaustavlja se na ovome i poslednjih godina smo svedoci poleta u korišćenju armiranih plastičnih masa za proizvodnju stanova — ploča ili čak kompletnih elemenata koji se sastavljaju na licu mesta praktičnim i brzim sredstvima. Vikend-kuće se takođe proizvode na taj način; u ovom slučaju svi uređaji se ugrađuju u toku livenja: plakari, police, sanitarni uređaji. Serijska proizvodnja stambenih zgrada ovog tipa može dovesti do revolucije kakvu je predstavljala serijska proizvodnja automobila: brzina proizvodnje, niska cena, a naročito udobnost.

U međuvremenu, u klasičnoj gradnji, plastične materije se koriste za termičku i akustičku izolaciju (plastične pene) kako za zidove tako i za podove i tavanice, za pokrivanje manjih zgrada (talasaste ploče od armiranog poliestra ili od polivinil-hlorida), za osvetljenje lusterima od metakrilne smole ili još i kao barijera protiv vlage (filmovi od polietilena koji se postavljaju ispod temelja). Prozorski kapci od krutog polivinil-hlorida, koji ne trunu, dolaze namesto drvenih kapaka.

Javni radovi, signalizacija na putevima, veoma mnogo se koriste sintetičkim smolama. Između betonskih ploča postavljaju se nepropustljivi spojevi od plastične mase, čija je namena da zaštite od termičkog širenja i skupljanja.

ODEĆA. Dugmad, kopče, broševi bili su nekada jedini predmeti od plastične materije primenjene u odevanju. Pojava vinilnih smola otvorila je nove vidike i omogućila interesantne primene od kišnog mantila do gaćica za odojčad, od rukavica za domaćinstvo ili zaštitnih rukavica do obuće za plažu i čizmica postavljenih flanelom. Elastične plastične pene koriste se za izvesno rublje, kao elementi koji daju čvrstinu sakoima, kao izolaciona postava za zimsku ili sportsku odeću ili unutrašnja postava za cipele.

Plastične mase koriste se kao pokrivači za glavu za razne prilike: nepromočive kapuljače, kape za kupanje, zaštitni šlemovi za rudare i druge radnike.

Atomsko doba koristi se plastičnim materijama za proizvodnju zaštitnih odela za tehničare koji rade u kontaminiranoj atmosferi. Astronauti nose skafandre za čiju izradu se koriste sintetičke smole.

Postoji, takođe, mišljenje da će u dosta bliskoj budućnosti tkanje vlakana biti delimično zamenjeno ekstrudovanjem poroznog plastičnog platna namenjenog za izradu odeće.

INDUSTRIJA PREDMETA ZA RAZONODU. Evolucija društva donela je modernom čoveku novu brigu: organizovanje razonode.

Plastične materije su obilno zastupljene u svim domenima: muzika, igre, sportovi, igračke, ukrasi.

Gramofonske ploče već odavno nisu od smole i laka; zamenio ih je polivinil-hlorid, čije su prednosti: manja lomljivost, smanjivanje šumova. Magnetne trake za snimanje zvuka su od polivinil-hlorida ili linearnog poliestra.

Okviri za radio-prijemnike, naročito kada je reč o malim aparatima, često se liju od sintetičke smole.

Igračke za decu ili za odrasle uveliko se izrađuju od plastičnih materija: lopte, elastične ili krute šuplje igračke, konstrukcione igračke, igračke za plažu (pojasevi, dušeci, čamci).

Loptice za ping-pong, rakete za badmington, pločice za kockarnice, kockice za igranje, šahovske figure, domine — teško se danas mogu zamisliti od drugih materijala osim plastičnih. Za sport se od armiranih poliestara proizvode štapovi i daske za skijanje, štapovi za ribolov, motke za skakanje, koplja. Razvoj čamaca za razonodu od armiranih plastičnih materija bio je takođe spektakularan.

Uspeh veštačkog cveća, koje se lije od polietilena, rezultat je velikog majstorstva livaca i njihovog ukusa.

TRANSPORT I TEHNIKA. Klasična tehnika koristi se sintetičkim smolama već više godina: ležajevi ili bešumni zupčanici od slojevite fenolne smole sa tkaninom, spojnice i garniture za zaptivanje, smolasta veziva za abrazivna tocila, obloge probojaca za metale od epoksidnih smola.

Avijacija je morala da koristi plastične materije zbog njihove male težine i mehaničke otpornosti. Metakrilne smole se široko koriste za prozore i kabine. Armirani poliestri služe za izradu čeonih i drugih delova aviona. U obliku adheziva, sintetičke smole (naročito epoksidne) koriste se za spajanje pojedinih delova aviona, umesto ranijih tradicionalnih eksera. Otpornost na zamor je znatno bolja.

S obzirom na problem težine koji je značajan, ni automobil nije mogao ostati u pozadini. Tako smo počev od 1950. svedoci porasta upotrebe plastičnih materija naročito za pomoćne uređaje: livene ploče za instrumente, volani, razna dugmad i ručice, elise za ventilator, poziciona svetla, čepovi i slavina za akumulator, kapa razvodnika, presvlake za sedišta od plastične imitacije kože, zagrevanje vazduha (dovodne cevi, rešetke za odleđivanje), rezervoar za tečnost za ispiranje stakla itd.

Radi smanjivanja težine automobila, njihove karoserije su izrađivane od armiranih poliestara, naročito za sportska vozila. Međutim, jedna velika francuska firma nije oklevala da svoje serijske modele opremi krovom od armiranog poliestra, čak je kod nekih proizvoda primenila čitave plastične karoserije.

Mnogi uređaji za bicikle takođe se liju od sintetičke smole: ručice guvernala, poziciona svetla, sedišta i torbice, a novi modeli sadrže čitav okvir od armiranog poliestra.

U astronautici su sintetičke smole omogućile da se reše mnogi problemi koji bi bili nerešivi sa tradicionalnim materijalima: delovi raketa od plastičnih materija armiranih staklenim vlaknima, unutrašnja zaštita rezervoara od korozije gorivima koja se koriste za kretanje. Izvesne smole ili elastomeri koriste se čak kao goriva tipa »kompozitni prah«.

Drugi oblik transporta, kome nisu potrebna vozila, koristi se cevovodima veoma velike dužine (naftovodi, gasovodi). Kod malih kalibara koriste se ekstrudovane cevi od krutog polivinil-hlorida, etilena, acetobutirata celuloze, kopolimera stirola tipa A.B.S., a ponekad i od poliestara armiranih staklenim vlaknima. Za cevovode velikih dimenzija više se koriste armirani poliestri; u tom slučaju se pomoću specijalnih mašina, cevi proizvode namotavanjem staklenih vlakana uz jednovremeno impregnisanje poliestarskom smolom. U izvesnim planinskim oblastima Švajcarske i Austrije, mleko se takođe transportuje u dolinu polietilenskim cevovodima. U hemijskoj industriji plastični cevovodi pretpostavljaju se metalnim, zbog njihove visoke otpornosti na koroziju.

ELEKTROTEHNIKA. Može se reći da bi moderne primene elektriciteta bile nemoguće bez sintetičkih smola.

Loša električna provodljivost plastičnih materija koristi se za proizvodnju livenih izolatora (upotreba fenoplasta, polistirola, teflona, silikona), ili za izolatorske

omotače električnih žica i kablova (polivinil-hlorid, polietilen, poliamidi, silikoni). U obliku laka fenolne smole ili alkidnih smola, ovi izolatori služe za impregnisanje električnih kalemova. Livene epoksidne smole upotrebljavaju se za izradu delikatnih montaža koje se koriste u elektronici. Akumulatorski sudovi, kućišta za baterije liju se od sintetičkih smola. Separatori akumulatorskih ploča proizvode se od polivinil-hlorida ili polistirola.

Proizvodnja štampanih kola zahteva upotrebu ploča od plastične materije, koje se pokrivaju slojem nekog provodnog metala kao što je bakar. Za ovu svrhu koriste se melaminske smole, silikoni, epoksidne smole. Materijal za pojačanje obično je na bazi staklenog vlakna. Samo električno kolo dobija se nagrizanjem kiselinom po jednoj klasičnoj metodi, pri čemu delovi koje kiselina ne sme da napadne bivaju zaštićeni štampanjem uz pomoć neke antikorozivne supstancije. Posle nagrizanja i ispiranja, kolo se utiskuje u plastičnu podlogu toplim presovanjem. Ovakva štampana kola su omogućila minijaturne elektronske aparature koje se obično koriste u avijaciji, astronautici, telekomandovanju, jednom reči u tranzistorskim aparatima.

HEMIJA I ZAŠTITA OD KOROZIJE. Osim već pomenutih upotreba za cevovode, otpornost sintetičkih smola prema koroziji koristi se u proizvodnji kompletnih aparata za hemijsku industriju. Može se govoriti o pravoj industriji plastičnih kotlova, u kojoj se upotrebljavaju više ili manje debele folije od krutog polivinil-hlorida, polietilena, metakrilne smole, koje se obrađuju postupcima dosta sličnim onima u klasičnoj industriji kotlova: autogeno zavarivanje šipkom uz pomoć duvaljke toplog vazduha (bez plamena u kontaktu sa materijalom), krivljenje, sečenje, bušenje, narezivanje i urezivanje navoja itd. Burad, cisterne, mešalice, kolone za ispiranje ili destilaciju, čak i pumpe potpuno izrađene od plastične materije, normalno se proizvode, kao i ventili, tako da je sva oprema otporna prema kiselinama, alkalijama i većini organskih rastvarača.

Prizvode se i pokretne trake za transport korozivnih proizvoda unutar fabrike, ventilatori, cevi za dimove, čak i dimnjaci za evakuisanje štetnih gasova.

Za zaštitu osoblja koristi se odeća od polivinil-hlorida: mantili, rukavice, čizme, kapuljače.

Najzad, izvesni hemijski proizvodi koji nagrizaju hartiju ili tkaninu pakuju se u vreće ili kese od plastične materije: polivinil-hlorida, polietilena.

MEDICINA I HIRURGIJA. Međutim, ono što je najčudnije, jeste to da se ljudski organi mogu zameniti elementima od plastične materije. Tako reparaciona hirurgija koristi delove krvnih sudova od metakrilne smole, polietilena, delove creva od polivinil-alkohola. kaleme od metakrilne smole za zamenu oštećenih delova kosti, akrilne krajeve butne kosti, najlonske pločice za popravljanje trbušnog zida (peritonit, kila) ili za trepanaciju. Tolerancija organizma prema ovim umecima obično je dobra, mada su konstatovani neki slučajevi alergije.

U zubarskoj struci uobičajeno je korišćenje akrilnih smola za izradu veštačkih zuba, plombiranje, livenje mostova.

Kontaktna sočiva su od akrilne smole, dok se stakla za oftalmološke naočare liju sipanjem alilnih smola.

Najzad, zar nije najčudnije da se krvna plazma može delimično zameniti jednim veštačkim serumom na bazi polivinil-pirolidona?

Ovo nas navodi na zaključak da nema granice mogućnostima upotrebe sve većeg broja plastičnih materija.

Preveo **Slobodan Marinković**

Jean DELORME

ŽELEZNICE

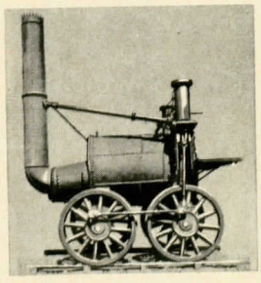
ISTORIJAT

Železnica se pojavila u vreme kada se još znalo samo za životinjsku vuču, kao rezultat nastojanja da se smanji otpor kretanja rudarskih kolica kotrljanjem točkova najpre po drvenim (1670), a zatim po metalnim šinama [Šefild (Sheffields), 1776]. Pronalazak parne lokomotive [Vivian i Trevitik (Trevithick), 1802; Blenkinsop, 1811; Segen (Seguin) i Stivenson (Stephenson), 1829] podstakao je nagli razvoj ove ideje.

Parna lokomotiva, čiji je prvi prototip »Raketa« Džordža Stivensona (1829), nastala je primenom parne mašine [Kinjo (Cugnot), 1770], valjkastog parnog kotla sa dimnim cevima (Segen, 1827) i izvlačenja dimnih gasova duvaljkama (Stivenson).

Razvoj železničke mreže išao je uporedo sa pojavom i razvojem mašinske industrije i ekstraktivne industrije (ugalj, gvožđe), u početku, veoma brzo, ali i haotično. Vlade su ubrzo uvidele značaj i potrebu planiranja njenog razvoja. S druge strane, železnica je, u službi države, postala instrument objedinjavanja razvoja industrije i trgovine i koncentracije stanovništva u gradskim centrima. U Francuskoj, prve železničke pruge izgradila su braća Segen (1826—1834) u oblasti Sent-Etjena i braća Talabo (Talabot) u oblasti Nima. Železnička mreža oko Pariza sagrađena je na osnovu koncesija koje je Legran (begrand) odobrio (zakon 1833, povelja 1842) Pereiru (Pereire) i Rotšildu (Rothschild). Tokom nekoliko sledećih decenija, osobine železnice znatno su poboljšane korišćenjem svih dostignuća mašinstva. Brzina od 25 km/čas, koju je postigla »Raketa« (1829), povećana je sa lokomotivom inženjera Kramptona (Crampton, 1855) na 100 km/čas.

Nagli razvoj železnice oduševio je inženjere i vladajuće krugove koji su u železnici videli rešenje svih problema prevoza. To je uticalo, s jedne strane,



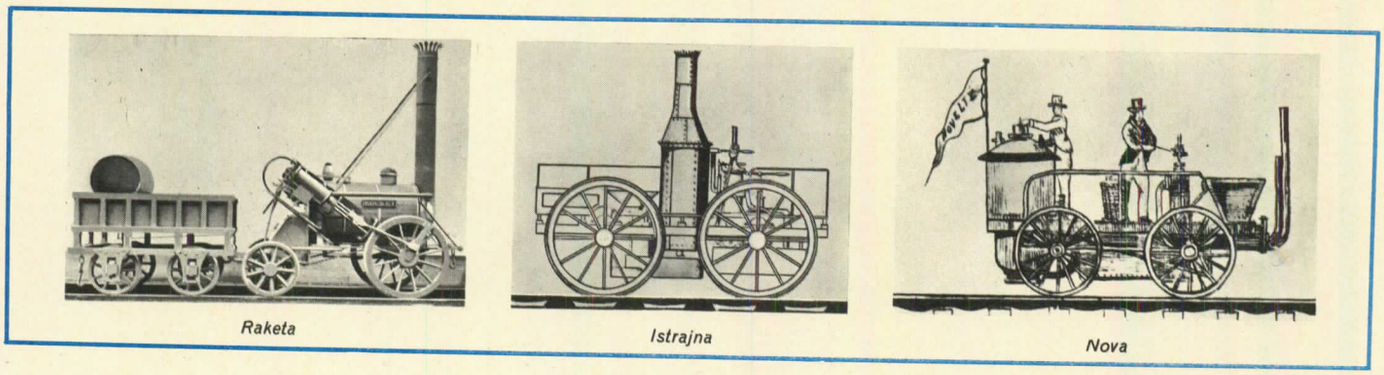
Neuporediva

na prihvatanje projekata manje rentabilnih železničkih pruga [plan Frejsine (Freycinet), 1878-1879]. a sa druge strane, napuštanje drugih vrsta saobraćajnih sredstava (puteva, kanala itd.).

Ova preterivanja očigledno neće imati ekonomsko opravdanje.

Krajem XIX i početkom XX veka prihvaćeno je mnogo razumnije shvatanje o ulozi železnice. Pojavom automobila železnica dobija mesto koje joj i pripada: to je masovno prevozno sredstvo sa velikim korisnim učinkom, kako pri prevozu robe tako i pri prevozu putnika. Posle perioda teških konkurentskih borbi u vreme ekonomskih potresa između dva svetska rata, shvatanje o potrebi koordinacije razvoja raznih vidova prevoza postaje sve neminovnije. Na taj način, železnici je omogućeno da nađe delokrug rada koji joj najviše odgovara. Istovremeno, u mnogim zemljama, npr. u Francuskoj, železničke kompanije se udružuju u nacionalne organizacije, kao što je Nacionalno društvo francuskih železnica (Société nationale des chemins de fer français, 1938).

I pored razvoja automobila, izvanrednog individualnog prevoznog sredstva, kamiona, pogodnog za prevoz robe »od vrata do vrata«, i aviona, nezamenljivog na dugim rastojanjima, koji nije mogao da ugrozi prevoz kanalima, pogodan za masovne terete manje vrednosti i transport ugljovodonika cevovodima, železnica je, zbog neprekidnog ekonomskog i demografskog razvoja, stalno povećavala obim prevoza, prilagođavajući se, razume se, dostignućima moderne tehnike.



Raketa

Istrajna

Nova

Razvoj železnice do drugog svetskog rata

Devetnaesti vek je sav u znaku mašina i parne lokomotive. Početkom XX pojavila se električna energija, u vidu jake struje, za električnu vuču, i u vidu slabe struje, za održavanje veze i signalizaciju. U prvoj polovini XX veka razvoj je ipak tekao postepeno, kao, uostalom, i u drugim oblastima tehnike. Drugi svetski rat je izazvao revoluciju u svim ovim oblastima.

ŽELEZNIČKA PRUGA

Kotrljanje metala po metalu znatno je smanjilo trenje pri kotrljanju (na 3 kg po toni za osovinu sa kliznim ležištima i na manje od 1,5 kg po toni za osovinu sa valjkastim ležištima), ali je zato železnica postala veoma osetljiva na reljef tla. Ako se pri tom žele postići i znatne brzine, železnička pruga mora imati velike poluprečnike krivine. Zadovoljenjem ovih uslova nastaju teške trase koje imaju veliki broj veštačkih objekata.

Način izgradnje železničke pruge veoma se brzo ustalio; izabrano je nekoliko širina koloseka, zavisno od očekivanog saobraćaja i povezivanja sa susednim železničkim mrežama (normalni kolosek 1,440 m, široki kolosek, metarski kolosek). Kolosek se sastoji od dve šine povezane pragovima koji održavaju njihovo rastojanje i prenose opterećenje na debeo sloj zastora od tucanika koji leži na planumu donjeg stroja železničke pruge. Dvoglave šine postavljenę na specijalna ležišta ustupile su mesto šinama tipa »Vinjol« (Vignol) čije se stopalo pričvršćuje neposredno za prag šinskim zavrtnjima. Nagib šina je 1/20 prema unutrašnjoj strani koloseka, što odgovara koničnosti bandaža točkova. Ova dva geometrijska uslova obezbeđuju automatsko vođenje osovine u slučaju nekih parazitskih kretanja (vijuganje). U krivini, kolosek je nagnut prema unutrašnjoj strani krivine, srazmerno veličini krivine, da bi se poništio uticaj centrifugalne sile. Iskustvo i teorija omogućili su takve prelazne krivine koje obezbeđuju sve veću udobnost putnika i dobro vođenje vozila (parabolični prelazi, klotoidni prelazi).

Povećanje opterećenja i brzine dovelo je do postepenog povećanja težine šina po dužnom metru, broja pragova na jednom kilometru i debljine sloja zastora donjeg stroja koloseka. Istovremeno, preciznim određivanjem teorijske ose (metod korekcije krivine pomoću strelice) usavršeno je određivanje elemenata železničke pruge i trasiranje, a nivelisanje je izvedeno primenom usavršenih metoda podbijanja (suflaž). Ovaj postupak sastoji se u nivelisanju železničke pruge tačno na željenu kotu stavljanjem sitnog šljunka pod pragove. Količina šljunka zavisi od nivelete, koja je prethodno određena merenjem i proračunima.

Ukrštanje, račvanje itd., izvode se pomoću pružnih uređaja, čiji je najprostiji i najrasprostranjeniji oblik prosto račvanje ili prosta skretnica. Ona se sastoji od tri dela:

1. *menjalice* (jezička), tj. skretnice u pravom smislu reči, koja oscilira oko svoje ose između glavnih šina i omogućava pristup jednom ili drugom koloseku;

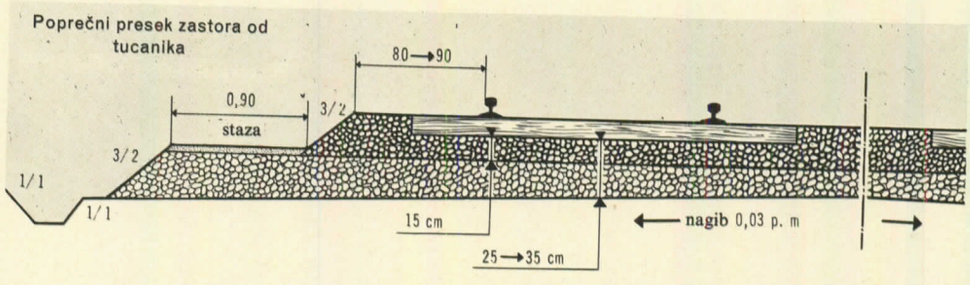
2. *srcišta*, napravljenog, najpre, od delova šina oblikovani po potrebi (srce, zečija šapa i kontrašina), a docnije, na danas opšte prihvaćen način, u obliku monoblok-srcišta;

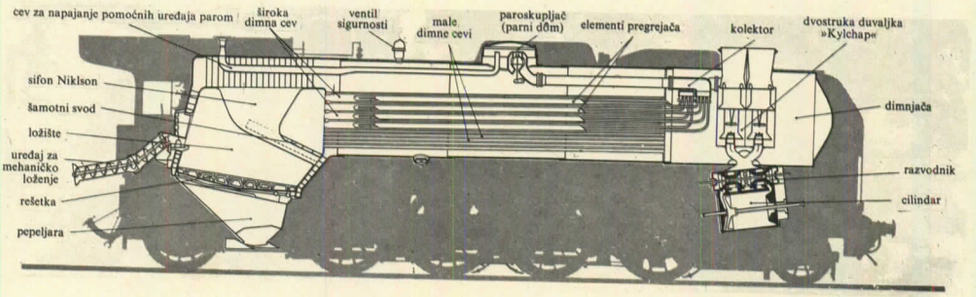
3. *srednjeg dela šine* tekućeg koloseka između menjalice i srcišta.

Pokretanje skretnice se, u početku, vršilo iz neposredne blizine, ručnom polugom sa kontrategom. Danas, skretnicom se gotovo uvek upravlja sa rastojanja pomoću mehaničkih ili električnih prenosnih uređaja, sa osiguranjem (u normalnom ili skrenutom položaju) i kontrolom položaja. Mnogi složeniji pružni uređaji, predviđeni za mnogobrojne kombinacije, sastoje se od više skretnica, kombinovanih sa *ukrsnicama* (prosta ili dvostruka *skretnica*, *ukrsna skretnica*, prosta ili dvostruka). Na otvorenoj pruzi, presecanje koloseka, u pravom smislu reči, zamenjuje se *ukrsnim skretnicama* (sauts de mouton).

VUČA

PARNA VUČA. Tokom više od jednog veka na železnici je korišćena gotovo isključivo parna vuča. Parna lokomotiva sastoji se, jednostavno rečeno, od parnog kotla stavljenog na vozilo koje može da se kreće. Toplotna energija predata pari u kotlu pretvara se u cilindru parne mašine u mehaničku energiju koja se prenosi na točkove u obliku vučne sile. Kotao, osim retkih izuzetaka, ima dimne cevi sa ložištem pozadi, a napred dimnu komoru (dimnjaču) u kojoj se, ispuštanjem pare koja je već prošla kroz cilindre, vrši, pomoću duvaljke, izvlačenje dimnih gasova iz ložišta kotla. Dimni gasovi izbacuju se kroz dimnjak u atmosferu. Para se skuplja u gornjem delu kotla, u paroskupljaču (parni dôm) pomoću *Kramptonove cevi*. Kroz razvodnik, koji se pokreće polugom regulatora, para ulazi u cilindre. Šireći se u cilindrima, ona vrši naizmenično pokretanje klipova koji preko sistema prenosnih poluga i krivaje pokreću pogonske točkove. Razvođenje pare u cilindar vrši se pomoću





Kotao sa dimnim cevima i pregrevanjem pare.

razvodnika kojim upravlja kulisa razvodnika i omogućava promenu procenta punjenja. Ravni razvodnici su postepeno zamenjeni cilindričnim, a u nekim slučajevima *klipnim* i *ventilskim razvodnicima*. Najčešće se primenjuje Volšertov (Walschaert) razvodnik koji je zamenio dvostruku Stivensonovu kulisu. Pritisak pare u kotlovima je stalno povećavan, ali zbog teških uslova rada lokomotivskih kotlova nije prešao vrednost od 20 do 24 bara. Paru je, ipak, sve bolje iskoristio Male (Mallet, 1878) *sprezanjem* cilindra, tj. podelom procesa širenja pare, a kasnije i primenom pregrevanja pare (1900). Pregrevanje pare vrši se pre ulaska u cilindre u cevima pregrejača. Cevi pregrejača nalaze se u najširim cevima gornjeg dela snopa dimnih cevi. Izvesna dopunska ekonomičnost postignuta je predgrevanjem napojne vode sa jednim delom iskorišćene pare. Sagorevanje je poboljšano postavljanjem plamenog svoda u ložištu i stvaranjem komore za sagorevanje. Istovremeno, primenom *cevnog svoda* i *Niklsonovog* (Nicholson) *sifona* poboljšana je cirkulacija vode i, na taj način, toplotna energija je bolje iskorišćena. Rad ložača je uprošćen mehaničkim loženjem, odnosno *stokerom*, a zatim i upotrebom tečnog goriva. Isto tako je usavršena duvaljka za ispuštanje izrađene pare radi poboljšanja izvlačenja dimnih gasova [Kailčap (Kylchap)]. Najzad, usavršavanje parnog ciklusa [Čeplon (Chapelon)] i otklanjanje taloženja kotlovskog kamenca primenom integralnog Armandovog (Armand) postupka (T. I. A.) omogućilo je znatno povećanje stepena korisnog dejstva parnih lokomotiva. Stepen korisnog dejstva ostaje ipak znatno niži od stepena korisnosti stabilnih postrojenja (max. 11%).

Parni kotao i mehanizmi postavljeni su na okvir postolja koji je u početku bio izrađen od debelog čeličnog lima i poprečnih nosača. Savremene lokomotive imaju okvir postolja izliven u jednom komadu sa cilindrima spoljnim (visokog pritiska) i unutrašnjim (niskog pritiska).

Donji stroj lokomotive sastoji se od pogonskih osovina međusobno povezanih spojnim polugama i, eventualno, od nosećih osovina smeštenih u pomoćno postolje nazvano *obrtno postolje* (dve osovine) ili *slobodna osovina* (jedna osovina).

Zahvaljujući prianjanju između točkova pogonskih osovina i šina, usled čega *sila koju prenosi* pogonska poluga može da nađe tačku oslonca, moguće je pokretanje lokomotive. Prianjanje je srazmerno opterećenju pogonskih osovina (adheziona težina), kome je srazmerna i maksimalna vučna sila. Postojala je tendencija da se poveća sila prianjanja, s jedne strane, povećanjem opterećenja po osovini (20 do 23 tone u Francuskoj, do 35 tona u SAD) i, s druge strane, povećanjem broja pogonskih osovina. U tom slučaju, pogonske osovine se postavljaju na dva posebna okvira postolja kao, npr., kod lokomotive sa zglobnom vezom [Male (Mallet) i Gara (Garatt)]. Težina lokomotive se prenosi na pogonske i noseće osovine pomoću vešanja čiji su aktivni elementi, lisnati gibnjevi, međusobno povezani polugama uređaja za izjednačavanje radi dobijanja pogodnog rasporeda opterećenja.

ELEKTRIČNA VUČA. Električna vuča se pojavila početkom XX veka. Pokušaji su vršeni sa jednosmernom i sa naizmeničnom strujom. Primena naizmenične struje bila je otežana zbog problema komutacije, pa je korišćena struja niske učestanosti (16 2/3 Hz i 25 Hz). Zbog toga je pogon jednosmernom strujom bio, do drugog svetskog rata, mnogo više korišćen, bilo sa niskim naponom (600—750 V na gradskim i prigradskim linijama), bilo sa srednjim naponom (1 500—3 000 V na dugačkim međugradskim linijama). Za vuču jednosmernom strujom koriste se redni motori, tj. takvi kod kojih su namotaji induktora redno vezani sa namotajima kotve radi dobijanja dobre karakteristike vučna sila — brzina. Regulisanje brzine je moguće, s jedne strane, menjanjem napona na priključcima motora i promenom načina veze motora (serijski, serijsko-paralelni, paralelni itd.) ili, s druge strane, uključivanjem otpornika vezanih na red sa motorima pri stavljanju lokomotive u pokret. Regulisanje brzine vrši se, isto tako, i šentiranjem namotaja induktora.

Električna lokomotiva sastoji se od sanduka—karoserije sa jednom ili dve komandne kabine. Karoserija je postavljena na okvir donjeg postolja sa pogonskim osovinama. Prianjanje, kao i kod parne lokomotive, može biti delimično i potpuno. U sanduku karoserije nalaze se komandni uređaji i polazni otpornici koji se moraju hladiti na pogodan način, kao i kompresori za napajanje kočnica sabijenim vazduhom. Vučni motori se nalaze ili u karoseriji ili na obrtnim postoljima. U prvom slučaju, njihovo kretanje je, usled vešanja pomoću opruga, nezavisno od kretanja osovina, te se snaga prenosi preko prenosnih uređaja koji dozvoljavaju ova relativna kretanja. U drugom slučaju, često se koristi elastično vešanje, pri čemu su motori neposredno vezani za osovinu, što uprošćava prenos snage. Loša strana ovog načina vešanja je to što motor postaje mnogo osetljiviji na dinamičke udare pri kretanju po šinama.

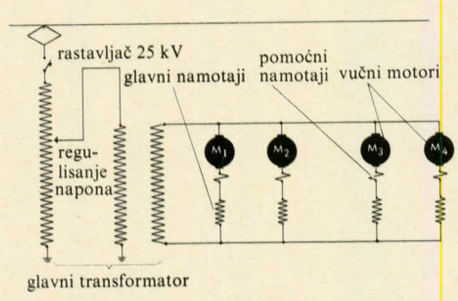
Lokomotiva ima dve vrste električnih kola:

1. *Strujno kolo snage* u koje se dovodi struja visokog napona iz vazdušne kontaktne mreže preko trole ili pantografa, ili iz treće šine preko jednog klizača. Struja, prvo, prolazi kroz zaštitne uređaje (zaštitni prekidač), a zatim ulazi u motore preko sistema kontaktora i menjača smera vožnje. Ovi uređaji omogućavaju različite veze motora, promenu smera obrtanja i, u slučaju potrebe, uključivanje i polaznih otpornika za pokretanje lokomotive. Povratna veza struje ostvaruje se preko mase lokomotive i koloseka.

2. *Strujno kolo za upravljanje i kontrolu* je niskog napona i preko manipulatora, kojim upravlja elektro-vozovođa, napaja komandne organe strujnog kola snage (zaštitni prekidač, kontaktor i menjač smera vožnje). Komandni uređaji su elektromagnetskog ili elektropneumatskog tipa. Uređaj za uključivanje na ovim uređajima obezbeđuje koordinaciju rada kola za upravljanje i sprečava opasno ili neodgovarajuće manevrisanje.

VUČA MOTORIMA SA UNUTRAŠNJIM SAGOREVANJEM. Ovaj način vuče počeo je da se razvija tek oko 1930, i to sa pojavom brzohodnih dizel-motora. Motori sa karburatorom primenjivali su se na železnici vrlo kratko vreme sa lokomotivama tipa »Mišlin« (Michelines).

U Francuskoj se od 1937. koriste dizel-lokomotive sa električnim prenosnikom. Ove lokomotive su pogodne i za manevarsku službu (500 KS) i za službu na glavnim prugama (4000 KS). U Francuskoj je istovremeno izgrađen vozni park šinobusa sa motorima od 150 do 300 KS i mehaničkim prenosnikom »Reno« (Renault), a u retkim slučajevima sa električnim prenosnikom »Dekovil« (Decauville). Dizel-lokomotive sa električnim prenosnikom doživele su munjeviti razvoj u SAD, gde su veoma brzo gotovo potpuno zamenile parnu vuču. Osnovni problem pri vuči dizel-motorima leži u prenosu momenta dizel-motora na pogonske osovine, budući da motor treba da radi u relativno ograničenom broju obrtaja i ne može da podnese preopterećenje bez opasnosti od brzog kvara. Električni prenos, pri kome dizel-motor predaje energiju generatoru jednosmerne struje, koji, zatim, napaja vučni elektromotor, rešava dovoljno dobro ovaj problem, pod uslovom besprekorne regulacije pobude generatora. To se postiže ako se raznim tipovima automatskih regulatora pobude (šent i antikompaund-pobude) doda sistem zaštite od preopterećenja (regulator u strujnom kolu pobude). Uz ove mere predostrožnosti, dizel-lokomotiva se ponaša kao električna lokomotiva koja nosi sopstvenu električnu centralu. Njena prednost je u tome što je nezavisna od električne mreže.



Shema strujnog kola snage lokomotive sa monofaznim motorom 25 kV — 50 Hz.

Bilo je nekoliko pokušaja da se gasna turbina prilagodi za vuču na železnici. Do danas ova nastojanja nisu dovela do određenih rezultata.

ŽELEZNIČKA KOLA

Predviđena, u početku, za prevoz robe, železnica je ubrzo počela da služi i za prevoz putnika. Prva putnička kola bila su, u stvari, obična »plato-kola«, na koja je bio postavljen sanduk-karoserija diližanse.

TERETNA KOLA. Tokom vremena putnička kola počela su, po konstrukciji, sve više da se razlikuju od teretnih kola, čija je konstrukcija i dalje ostala jednostavna i robustna. Stoga su vagoni sa dve osovine bili dugo jedini tip teretnih kola. Metalno postolje sa drvenim kolskim sandukom oslanjalo se na osovine preko lisnatih opruga i mazalica sa kliznim ležajima. Postolje je, osim toga, nosilo odbojne uređaje (odbojnike, prvo krute, zatim, elastične) i vlačne uređaje. Ovaj tip kola čiji je drveni kolski sanduk postepeno zamenjen sandukom izrađenim delimično (zatvorena teretna kola) ili potpuno (otvorena teretna kola ili plato-kola) od metala, ostalo je u upotrebi u Evropi sve donedavna. U SAD, međutim, koriste se, počev od druge polovine XIX veka, vagoni sa obrtnim postoljem tipa »Diamond«, koji su opremljeni vrlo brzo automatskim vlačnim uređajima.

PUTNIČKA KOLA. U težnji da se poveća udobnost i sigurnost, putnička kola su se razvijala sve brže. Postepeno su opremljena parnim grejanjem, gasnim, a zatim, električnim osvetljenjem i savršenijim i udobnijim unutrašnjim uređenjem (kupei, tapacirana sedišta, hodnici, sanitarni uređaji). Vagoni sa donjim strojem na obrtnim postoljima i sa poprečnim mostom za međusobnu vezu pojavili su se krajem XIX veka. U XX veku usavršava se sistem sigurnosnih uređaja primenom metalne konstrukcije karoserije kola. Istraživanja su zatim usmerena na smanjenje težine vagona, poboljšanje grejanja, uvođenje klimatizacije vazduha, zvučnu izolaciju itd.

UREĐAJI ZA KOČENJE

Kočenje je, najpre, izvedeno pomoću sistema zavojnog vretena sa ručicom. Kočničari, raspoređeni po vagonima, ručno su zaustavljali vozilo na znak koji je mašinovođa davao pištaljkom. Vestinhauzov (Westinghouse) sistem za kočenje sa sabijenim vazduhom veoma je brzo prihvaćen svuda, izuzev u zemljama sa engleskom tehnikom. U tim zemljama koristili su se kočni uređaji sa razređenim vazduhom. Kod kočnice tipa »Vestinhauz«, koja se upotrebljava u Francuskoj, kompresor postavljen na lokomotivi šalje vazduh pod pritiskom u glavni vod koji se pruža duž cele kompozicije voza. Kada mašinovođa otvori ventil kočnika, smanjuje se pritisak vazduha u glavnom vodu. Usled pada pritiska u glavnom vodu, u dejstvo stupa *trostruki razvodni ventil* koji spaja pomoćni rezervoar sa kočionim cilindrom, izazivajući pritiskivanje papuča za kočenje na točkove. Ovaj sistem kočnica je *produžnog* (dejstvuje na celu kompoziciju voza) i automatskog dejstva (svako prekidanje vlačnog

uređaja ili vodova kočnice izaziva kočenje) i omogućava *podešavanje* sile kočenja prilikom stezanja, ali ne i prilikom otpuštanja kočnice. Zbog toga se javljaju izvesne teškoće pri spuštanju voza na dugim nizbrdicama, pa je neophodno ugrađivanje specijalnog trostrukog ventila (uređaj »*ravnica-planina*«).

Direktna ili neautomatska kočnica, čija se jačina dejstva može podešavati i pri stezanju i pri otpuštanju kočnice, koristi se na pojedinim lokomotivama i vozilima.

SIGNALIZACIJA

Cilj je signalizacije da osigura bezbednost železničkog saobraćaja i da, za vreme kretanja voza, omogući sporazumevanje između osoblja na pruzi i osoblja u vozu. Signali su *zvučni — akustični* (pištaljke, petarde, zvučno ponavljanje signala na lokomotivi) i *vidni — optički* (čeoni i završni signal na vozovima, signali na pruzi, signal u kabini mašinovođe — *cab-signal*).

Pružni signali kojima celokupno osoblje mora slepo i trenutno da se pokorava obezbeđuju prostorni razmak vozova na otvorenoj pruzi.

PROSTORNA SIGNALIZACIJA je veoma brzo izvedena primenom blok-sistema, prvo mehaničkog, a zatim, električnog. Pruga je podeljena na više prostornih odseka i svaki odsek je zaštićen semaforom ispred koga je postavljen predsignal.

SIGNALIZACIJA ZA ZAŠTITU PRUŽNIH UREĐAJA sastoji se od više signala koji se pomoću niza zavisnosti u blok-uređaju postavljaju u određeni položaj zavisno od položaja skretnice. Na taj način, isključena je mogućnost davanja prolaza vozu čije bi kretanje ugrozilo bezbednost već odobrenog kretanja nekog drugog voza. Uzajamne zavisnosti (između signala i skretnice), kao i daljinsko upravljanje signalnim uređajima i skretnicama, ostvareni su, u prvo vreme, mehaničkim putem. Kasnije, sa razvojem *energetskih komandnih mesta* (elektrodinamička komandna mesta), zavisnosti se izvode električnim kontaktima. Ručna komandna mesta, sa desetinama i stotinama ručica, zamenjena su centralizovanijim komandnim mestima (na principu releja), a u izvesnim slučajevima i centralizovanom komandom celokupnog saobraćaja.

Najzad, na osnovu zaključaka Verlanove (Verland) komisije, u signalizaciji svetlosnim signalima koriste se opšte usvojene boje: zelena (prolaz slobodan), žuta (priprema ili usporavanje), crvena (stoj). Ove boje su i danas u opštoj upotrebi. Da bi se poboljšala bezbednost saobraćaja, na lokomotivama se postavljaju uređaji za ponavljanje signala. U Francuskoj, zvučno ponavljanje signala vrši se pomoću »krokodil«-uređaja, koji propuštaju električnu struju kroz lokomotivu ako ona prolazi kroz zatvoreni signal. U SAD, optičko ponavljanje signala vrši se u kabini mašinovođe (cab-signal).

EKSPLOATACIJA

Pri eksploataciji železnice treba težiti što boljem iskorišćavanju infrastrukture i železničkih prevoznih sredstava radi ekonomičnijeg i bezbednijeg prevoza putnika i robe. Ovo se može postići samo zajedničkim naporima dveju čvrsto povezanih službi: *komercijalne* i *saobraćajne*. Komercijalna služba obavlja poslove sa korisnicima, utvrđuje tarifu, bavi se pitanjima obračuna itd. Saobraćajna služba se bavi organizacijom kretanja vozova, formiranjem kompozicija i nadgledanjem saobraćaja. Ovi poslovi obavljaju se u komandnim mestima, gde se na *grafikonima* prati teorijsko i stvarno kretanje vozova i ispravno funkcionisanje kompleksa pruga-signalizacija-vozovi na samoj železničkoj pruzi. Grafikoni pokazuju kretanje *redovnih* i *povremenih* vozova.

S komercijalnog gledišta razlikujemo putničke i teretne vozove. Teretni vozovi imaju dva režima brzine: *običan režim* (sporovozna roba ili mala brzina) i *ubrzani režim* (brzovozna roba ili velika brzina). Komercijalna brzina vozova povećavala se stalno, i danas, za putničke vozove, prelazi često i 100 km/čas. Rekordna brzina, postignuta u Francuskoj, je 331 km/čas (1955), ali je malo verovatno da će u redovnoj eksploataciji na železnici klasičnog tipa biti prevaziđena brzina od 200 km/čas. Brzina vozova sa ubrzanim režimom (brzovozna roba) takođe je veoma povećana. Takvi vozovi prevoze lako kvarljivu robu i male (denčane) pošiljke. Roba se prevozi uglavnom pojedinačnim vagonima, a u nekim slučajevima i celim kompozicijama. Osim u ovom poslednjem slučaju, veoma podesnom za brzo otpremanje robe, vozovi se često moraju preuređivati da bi se omogućilo otpremanje vagona sa jednog na drugo mesto. Preuređivanje se vrši u *rasporednoj (ranžirnoj)* stanici, čija je organizacija rada sve racionalnija (mesto za automatsko razformiranje, pružne kolosečne kočnice, daljinsko upravljanje lokomotivom) i omogućava dnevno raspoređivanje velikog broja vagona (5 000 vagona dnevno na pruzi Vilnev—Sen Žorž, 15 000 vagona u nekim ranžirnim stanicama u Americi).

Za prevoz robe koriste se sve više specijalizovana teretna kola: vagoni za prevoz rude, izotermički vagoni i hladnjače, platforme sa spratovima za prevoz automobila, vagoni-cisterne sa instalacijama za grejanje itd.

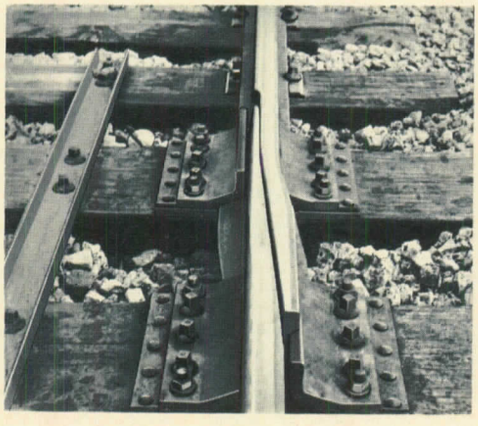
Utvrđivanje cene prevoza robe igra veoma važnu ulogu u privredi jedne zemlje i može znatno da utiče na usmeravanje razvoja nekih grana industrije.

Savremena tehnika

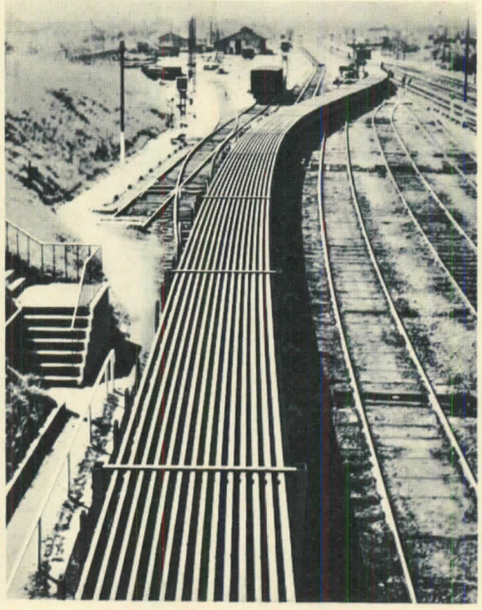
ŽELEZNIČKA PRUGA

Povećati udobnost pri vožnji velikim brzinama na otvorenoj pruzi odavno je značilo smanjiti udare pri prelaženju preko *dilatacionih spojeva* šina. Udar se ublažavao stavljanjem *podmetača* ispod dilatacionih spojeva ili upotrebom *spojnica* posebnog oblika. Problem je bio stvarno rešen tek otklanjanjem spojnica i primenom zavarivanja šina na spojevima. Stoga je neophodno da šine budu u stanju da podnesu naprezanja usled temperaturnih promena i da izbegnu opasnost od izvijanja, koja se javlja na visokim temperaturama. Istraživanja su kasnije pokazala da je zavarivanje šina moguće ukoliko se zadovolje određeni uslovi: pojačavanje, a u krivinama i ukrućenje podmetača dilatacionih spojeva, ukopavanje pragova u zastor od tucanika, postavljanje i zavarivanje u kalupu sa tačno određenom temperaturom. Dužina šina bivala je sve veća (72 m, zatim 300 m pa i 800 — 900 m). Šine tako velikih dužina, delimično zavarene u radionici pre postavljanja, zahtevaju poseban pribor i tehniku postavljanja. Dilatacioni spojevi ovih šina dozvoljavaju velika pomeranja i stvarno su male skretnice. U nekim slučajevima, naročito u ekvatorijalnim oblastima, pruge se zavaruju na čitavoj dužini, a dilatacioni spojevi postoje samo u blizini pružnih uređaja. I pružni uređaji su isto tako pretrpeli značajne izmene. Danas se izrađuju skretnice koje dozvoljavaju velike brzine pri vožnji *niz* i *uz* jezičak. Ugao skretanja je veoma mali, a dužina jezička velika. Jezičak (menjalica) ne okreće se više oko svoje osovine, već čini celinu sa šinom tekućeg koloseka. Skretanje jezička je moguće zahvaljujući elastičnosti metala i smanjenju širine, prema tome i momenta inercije stopala šine u zoni savijanja.

Izmenom načina pričvršćivanja šina na pragove povećana je udobnost i sigurnost vožnje. Na prugama sa velikom gustinom saobraćaja, šine se danas učvršćuju sistemom *dvostrukih elastičnih veza*. One se oslanjaju na pragove preko gumenih ploča, a šinski zavrtnji stežu stopalo šine pomoću elastičnih čeličnih podloški koje sprečavaju popuštanje šinskih zavrtnja i obezbeđuju pritezanje stopala stalnom silom.



Dilatacioni spoj dugačkih šina.



Prevoz dugačkih šina.



Zavarivanje dugačkih šina aluminotermijskim metodom.

Fot. S. N. C. F.

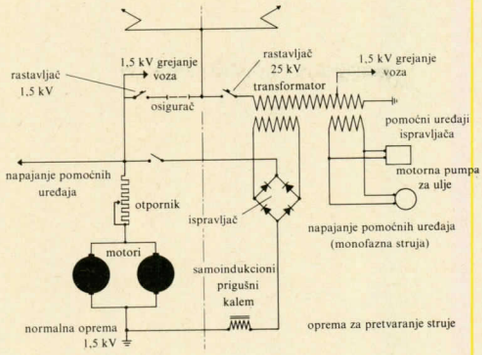
VUČA

ELEKTRIČNA VUČA. Pre drugog svetskog rata, u Nemačkoj, u dolini Helental, vršeni su pokušaji da se naizmenična monofazna struja visokog napona (20 000 V) i industrijske učestanosti (50 Hz) iskoristi za električnu vuču. Isprobani su razni tipovi lokomotiva, bilo sa monofaznim motorima, bilo sa ispravljačkim uređajima. Na inicijativu Luja Armana (Louis Armand), Društvo nacionalnih železnica Francuske (S. N. C. F.) počinje 1945. ispitivanje monofazne vuče sa više tipova lokomotiva na probnoj liniji u Savoji. Posebno je ispitana komutacija motora naizmenične struje trofazno-monofaznih podstanica i prelazak sa jedne vrste struje na drugu. Posle nekoliko godina eksperimentisanja ovi pokušaji su dali dobre rezultate, i ovaj način električne vuče počeo je da se primenjuje u velikim razmerama. Od tada, u severnim i istočnim oblastima, francuske železnice koriste prednosti električne vuče.

Posle ovih eksperimenata ipak su ostala samo dva osnovna načina korišćenja naizmenične struje. Pogonski motori se napajaju ili naizmeničnom monofaznom strujom ili jednosmernom strujom koja se dobija iz ispravljača na lokomotivi. Ovi motori jednosmerne struje koriste poboljšanje komutacije ostvareno na monofaznim motorima. Pronalaskom *ignitora* (1950) i *ekscitora* (1952), a posebno suvih ispravljača (1955—1960) rešene su eventualne dileme u korist motora s jednosmernom strujom.

Električna lokomotiva koja koristi monofaznu struju nije danas ništa drugo do lokomotiva jednosmerne struje koja ima sopstveni uređaj za smanjenje napona (transformator sa više izvoda, čime se izbegava upotreba polaznih otpornika i promena načina sprege motora) i za ispravljanje struje. Istovremeno sa usavršavanjem električne vuče rasla je i specifična snaga električnih motora, što je dovelo do smanjenja broja motora. Postavljanjem motora na obrtno postolje olakšano je rešavanje problema prenosa snage. Ova tehnika omogućila je konstruisanje *obrtnih postolja sa jednim motorom*. Istovremeno su otklonjene i teškoće koje nastaju zbog korišćenja elastično vešanih motora. Osim toga, s obzirom na to da je otklonjeno propinjanje obrtnih postolja, a prenošenje vučne sile sa obrtnih postolja na okvir postolja vrši se preko nisko postavljene rude, postiže se bolje iskorišćenje sile prianjanja. Sila prianjanja povećana je i poboljšanjem karakteristike vučna sila—brzina koja, u stvari, omogućava automatsko ograničenje klizanja. Različiti naponi i učestanosti koji se koriste u Francuskoj i u zemljama zapadne Evrope i dalje predstavljaju smetnju za vuču interregionalnih i međunarodnih vozova. U Francuskoj danas postoje regioni u kojima se vuča vozova vrši jednosmernom strujom sa naponom od 1 500 V i naizmeničnom strujom sa naponom od 25 000 V i 50 Hz. U Italiji se vuča obavlja jednosmernom strujom sa naponom od 3 000 V, a na nekoliko deonica trofaznom strujom napona 3 600 V. U Švajcarskoj se koristi naizmenična struja napona 15 000 V i 16 2/3 Hz, a u Belgiji jednosmerna struja od 3 000 V itd. Neophodno je bilo proučiti mogućnost konstruisanja lokomotive koja bi lako prelazila sa jedne vrste struje na drugu. Tako su nastale lokomotive koje su bile sposobne da koriste dve vrste struje (na linijama u Francuskoj), a zatim i lokomotive koje mogu da koriste tri-četiri vrste struje (na međunarodnim linijama). Isti problem pojavio se i u vezi s električnim grejanjem putničkih kola, tako da su i vagoni morali biti opremljeni uređajima za korišćenje četiri pa i pet raznih napona i učestanosti.

VUČA DIZEL-MOTORIMA. Vuča dizel-motorima razvijala se, u pogledu konstrukcije, u dva sasvim različita pravca: na lakim vozilima (šinobusi) — brzohodni dizel-motori sa mehaničkim prenosom kao kod automobila; na lokomotivama — sporohodni motori sa električnim prenosom jednosmerne struje. Međutim, velika težina motora ograničava



Shema strujnog kola snage lokomotive sa dve vrste struje 1,5 kV jednosmerne — 25 kV/50 Hz.

razvoj ovog načina vuče u železničkom saobraćaju. Jedinična snaga najvećih lokomotiva iznosi oko 2 000 KS.

Posle drugog svetskog rata pojavili su se snažni dizel-motori sa velikim brojem obrtaja (1 000, zatim 1 200 i 1 500 ob/min), pa je bilo veoma primamljivo primeniti i kod lokomotive ista rešenja kao kod šinobusa. Međutim, pokušaji da se primeni čist mehanički prenos nisu urodili plodom. Hidraulički prenosnik ima, na žalost, ograničen stepen korisnosti i teško se može sam koristiti na lokomotivi. Bilo je pokušaja da se primeni i pneumatski prenosnik. Karakteristike ovog prenosnika dozvoljavaju odlično iskorišćenje sile prianjanja, a iskustva stečena na tegljačima vrlo ohrabruju. Međutim, snage koje je moguće postići veoma su ograničene. Ovaj problem rešen je gotovo besprekorno primenom mehaničkog prenosnika sa hidrauličkim menjačem i sa nekoliko hidrauličkih spojnica. Lokomotiva tipa BB 69 000, čija težina ne prelazi 75 tona, može imati ugrađen motor od 4 400 KS.

Hidromehanički prenosnik uspešno se primenjuje i na šinobusima i motornim vozovima, naročito u Nemačkoj.

ŽELEZNIČKA KOLA

AUTOMATSKI VLAČNI UREĐAJ. Krajem XIX veka automatski vlačni uređaj počeo je da se primenjuje prvo u SAD, zatim i u Rusiji. Na evropskim železnicama automatski vlačni uređaj još nije u opštoj upotrebi. Sadašnji sistem, pri kome su organi za tegljenje i ublažavanje udara razdvojeni (vlačni i odbojni uređaji), ima mnogo nedostataka. Naime, neophodno je da radnik koji vrši manevrisanje, uđe između vagona i kada ih zakačuje i kada ih otkačuje. Ovakav način manevrisanja je veoma opasan. I pored primene zaštitnih odredaba donetih na konferenciji u Bernu (sigurnosni pravougaonik), svake godine ima nesrećnih, pa i smrtnih slučajeva. Osim toga, nužnost ovih manevara veoma komplikuje operacije ranžiranja i raspoređivanja vagona jer dolazi do uzastopnih sudara vagona koji nisu zakačeni jedan za drugi, sve dok se ne završi formiranje kompozicije voza. Međunarodne konferencije su priznale ekonomski i humani interes zamene klasičnog vlačnog uređaja novim uređajem za automatsko spajanje vagona. Međunarodna unija železnica (U. I. C) utvrdila je uslove koje ovaj uređaj mora da ispuni. Ovi uslovi su mnogostruki pa i protivrečni, jer se moraju imati u vidu razni tipovi kola, različita opterećenja, dozvoljeni uglovi i poluprečnici krivina pružnih uređaja, naprezanje koje uređaj treba da izdrži pri vuči i pri udaru, kao i energija koju pri tom mora da amortizuje.

Najzad, izuzetno je važno da se u isto vreme izvrši spajanje vodova uređaja za kočenje, a u nekim slučajevima i električnih vodova kontrolnih uređaja. Samo mali broj prototipova uređaja za automatsko spajanje vagona ispunjava pomenute uslove. Šira primena ovih uređaja tek predstoji.

MOTORNI VOZOVI TRANS-EVROPA-EKSPRES (kompozicije T. E. E.). Izvanredno nagli razvoj šinobusa u Evropi pokazao je da njihovi motori zadovoljavaju potrebe za lakim prevoznim sredstvom čiji je kapacitet znatno manji od kapaciteta klasičnog voza. Ubrzo je, međutim, upotreba samo jednog vozila postala nedovoljna. To je, u početku, rešeno jednostavnim *spajanjem* dva šinobusa (svaki je imao svog mašinovođu). Kasnije su spajanjem stvoreni šinobusi »blizanci« (dva motora čine jedinicu kojom upravlja samo jedan mašinovođa). Bilo je i pokušaja da se naprave kompozicije šinobusa grupisanjem celokupne snage na jednom pogonskom vozilu (npr., sa dva motora od po 300 KS ili, kasnije, sa jednim motorom od 500-750 KS) koje bi bilo u stanju da povuče jednu ili dve prikolice. Ukratko, elementi motornog vozila ostali su manje-više nepromenjeni. Interesantno je pomenuti da je ovaj sistem prevoza korišćen prilikom uspostavljanja brzih međunarodnih linija između velikih gradova zapadne Evrope (naročito večernje veze). Društvo Trans-Evropa-ekspres, koje su, 1954, osnovale sedam železničkih nacionalnih organizacija (Zapadna Nemačka, Belgija, Francuska, Italija, Luksemburg, Holandija i Švajcarska), utvrdilo je program uvođenja u saobraćaj kompozicija T. E. E. Takve kompozicije, predviđene za oko stotinak putnika, mogle bi ponuditi korisnicima veći komfor, brzinu od 140 km/čas, obede i druge usluge neophodne na međunarodnim vezama (odeljak za prtljag, posebne odeljke za carinu i policiju, ozvučavanje itd.). Izuzimajući neke opšte odredbe, konstruktorima je ostavljena puna sloboda u pogledu tehničkih rešenja. Tako su dobijena razna konstruktivna rešenja: od jednostavnih prilagođavanja šinobusnih konstrukcija (francuska i italijanska kompozicija) do pravih vozova sa specijalnim pogonskim vozilima (nemačke, švajcarske i holandske kompozicije). Nosivost (od 90 do 228 t) i snaga (od 1 040 do 2 660 KS) su isto tako varirali, mada je specifična snaga svih bila oko 10 KS po toni. Sve kompozicije imaju dizel-motore, a razni tipovi prenosa (električni, hidromehanički i mehanički) zastupljeni su ravnopravno.

Najzad, specijalne mere su preduzete da se omogući saobraćaj ovim kompozicijama na prugama raznih zemalja i osigura ponavljanje signala.

Uspeh linija Trans-Evropa-ekspresa podstakao je železničku saobraćajnu upravu da poveća broj mesta i dužinu kompozicije i da se ne ograniči isključivo na korišćenje »dizel« vuče. Tako su Švajcarska Konfederacija i Društvo nacionalnih železnica Francuske (S. N. C. F.) izgradile specijalne kompozicije sa električnim »četvorostrujnim« lokomotivama, koje mogu da se koriste električnim mrežama raznih evropskih zemalja (Francuska 1 500 V jednosmerne struje i 25 000 V—50 Hz naizmenične struje, Belgija i Italija 3 000 V jednosmerne struje, Holandija 1 500 V jednosmerne struje, Luksemburg 25 000 V—50 Hz, Nemačka i Švajcarska 15 000 V—16 2/3 Hz).

POBOLJŠANJE UDOBNOSTI PUTNIKA. Elektrifikacija železničke mreže olakšala je povećanje komercijalne brzine. Na nekim linijama brzina je prevazišla 125 km/čas (Pariz—Lion), a na nekim dostigla i 160 km/čas (specijalna linija Tokio—Osaka). Povećanje komercijalne brzine zahteva i povećanje maksimalnih brzina. U pomenutim slučajevima, maksimalne brzine su 150 i 210 km/čas. Železničke pruge se moraju prilagoditi ovako velikim brzinama: treba odstraniti udarce na šinskim spojevima i poboljšati vešanje vozila da bi se sprečilo prenošenje parazitskih kretanja obrtnog postolja na kolski sanduk. U tom cilju proučavani su razni tipovi elastičnog vešanja sa boljom amortizacijom, sa dugačkim veznim polugama i sa kosim klatnima. Napravljena su udobnija sedišta. U luksuzne kompozicije, predviđene za velike brzine, ugrađeni su uređaji za kondicioniranje vazduha (uređaji za

klimatizaciju), a zidovi vagona su sa zvučnom izolacijom, što zahteva besprekorno zaptivanje vrata i prozora. U tom slučaju, prozori se ne mogu otvarati. Uređaji za klimatizaciju i grejanje troše znatnu količinu energije (30—50 kW po vagonu). Električna energija se dovodi vodom za napajanje voza. Ako vuča nije električna, potrebna energija se dobija iz generatora smeštenog u posebnom vagonu.

UREĐAJI ZA KOČENJE

Puštanjem u saobraćaj sve bržih i sve težih vozova postalo je jasno da klasično kočenje pomoću kočnice produžnog dejstva sa sabijenim vazduhom više ne zadovoljava. U stvari, naredbu za kočenje daje mašinovođa otvaranjem slavine kočnika na lokomotivi. Njegova naredba prenosi se duž voza brzinom prostiranja depresije u glavnom vodu kočionog sistema i ne izvršava se istovremeno na celoj kompoziciji. Specijalnim uređajima brzina prenošenja naredbe kočenja povećala se od 80 m/sec na blizu 300 m/sec, što je nešto manje od brzine zvuka. Međutim, veću brzinu od ove nije moguće postići. Iz tih razloga kočenje se ne vrši istovremeno na celoj kompoziciji. Vremensko zakašnjenje pri kočenju prouzrokuje sile koje deluju na krajevima kompozicije i mogu da dovedu do kidanja vlačnog uređaja. To je neprijatno i za putnike i za robu koja se prevozi. Osim toga, automatska kočnica se ne može postepeno popuštati a nije ni neiscrpna, što stvara teškoće pri spuštanju voza niz duge nizbrdice. Rešenje problema traženo je prvobitno u kočnicama sa dva voda: snabdevanje vazduhom vrši se iz osnovnog voda, a opšti vod služi za komandovanje kočnicom. Klasični trostruki ventil zamenjen je brzodejstvujućim razvodnikom sa četiri izvoda. Na taj način kočnica je postala neiscrpna a podešavanje pri popuštanju je olakšano. Međutim, brzina prenošenja komande ostala je i dalje nedovoljna. Stoga se pokušalo da se kočnicama komanduje električnim putem. U tom slučaju, osim vazdušnih vodova, na vozu treba da postoje i električni vodovi koji su, sem za vreme kočenja, pod naponom. Probe su bile uspešne, ali ovaj način kočenja nije još postigao širu primenu.

EKSPLOATACIJA

RAZVOJ TERETNOG SAOBRAĆAJA. Uprave železničkog saobraćaja morale su uložiti znatne napore u borbi protiv konkurencije kamiona u prevozu robe. Kvalitetnim prevozom nadoknađivale su teškoće oko čestih pretovara pri otpremanju i preuzimanju robe ili pri prelasku na druge vrste železničkih pruga. Nezavisno od povećanja komercijalnih brzina težilo se smanjenju gubitaka i oštećenja, kao i lakšem rukovanju robom. Uvođenje vagona sa osovinskim mazalicama sa automatskim podmazivanjem ili sa valjkastim ležištima i primena elastičnog vešanja pomoću dvostrukih vešalica omogućili su dalje povećanje brzina

Pored vagona klasičnog tipa (zatvorena teretna kola, plato-kola i otvorena teretna kola) čije su konstrukcije pojačane, pojavljuju se mnogobrojni tipovi specijalnih vagona. Izotermički i rashladni vagoni (niska temperatura se održava topljenjem leda) koriste se za prevoz povrća i voća, a vagoni-hladnjače (sa sopstvenim rashladnim uređajima) prevoze lako kvarljivu robu.

Klasični tipovi vagona-cisterni obogaćeni su novim vrstama. Vagoni za prevoz teških derivata nafte opremljeni su uređajima za zagrevanje, a vagoni za prevoz rastresitih materijala (cement, zrnasta roba) imaju specijalne uređaje za utovar i istovar.

Specijalni vagoni konstruisani su za prevoz teških tereta (transformatora, destilacionih kolona itd.) i za prevoz naročitih proizvoda, npr., tečnog liva na temperaturi od 1 500°C u livnicama.

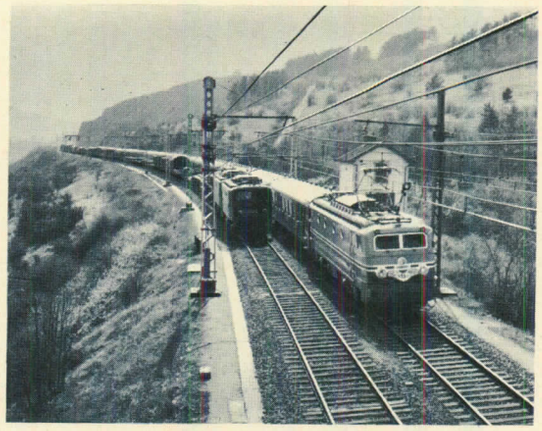
Povezivanje železničkog i drumskog saobraćaja omogućeno je specijalnim autoprikolicama koje se mogu postaviti na vagone podešene za ovu svrhu. Ovaj način prevoza, nazvan »piggy back«, prvo se pojavio u Francuskoj, a zatim se počeo primenjivati i u SAD. Radi lakšeg utovara i istovara, manji paketi se grupišu u specijalne sanduke »palete«, koji se lako prenose pomoću veoma pokretljivih viljuškara. Komadna roba se grupiše u »konteinere«, čija zapremina varira od 1 do 30 m³ i koji se mogu lako natovariti na teretna plato-kola i na kamione-platforme.

CENTRALIZOVANI SISTEM EKSPLOATACIJE. U periodu između dva svetska rata postalo je očigledno da se inicijativa o kretanju vozova ne može prepustiti osoblju pojedinih stanica. Celokupnim železničkim saobraćajem treba da rukovode malobrojni organi koji raspolažu sredstvima za brzo obaveštavanje i efikasno delovanje. Ovaj način rukovođenja kretanjem vozova ponikao je u SAD i zasniva se na »dispečerskom sistemu«. U Evropi je ovaj sistem izveden pomoću »komandnih mesta« koja su telefonski povezana sa svim važnijim punktovima na teritoriji koju opslužuju. Komandna mesta imaju po jednog rukovodioca za svaku službu (prvenstveno za eksploataciju i vuču, a zatim i za vagone) i dispečera koji prati kretanje vozova na grafikonima. Ova komandna mesta dejstvuju još uvek posredstvom železničkih stanica i mesta za rukovanje skretnicama i signalima. U velikim stanicama, ovi uređaji za upravljanje raspoređeni su na veliki broj mesta, tj. svuda gde se nalaze uređaji za mehaničko upravljanje skretnicama. To predstavlja veliku prepreku sporazumevanju i brzom upravljanju kretanjem vozova. Prvi korak ka savlađivanju ovih teškoća bio je zamenjivanje mehaničkog komandovanja skretnicama i signalima električnim upravljanjem. *Velike ručne poluge* i složeni *blok-uređaji* sa mehaničkim zavisnostima, zamenjeni su *tasterima* i *relejima*. Takav sistem omogućio je da se na malom prostoru koncentriše komandovanje velikim brojem uređaja. Dalje pojednostavljenje ovog sistema vodilo je grupisanju određenih komandi na »maršruti« kretanja voza. Velike stanice imaju, u tom slučaju, samo jedno ili dva mesta za ručno komandovanje maršrutom.

Registrovanje maršruta i automatsko raskidanje, koje je srazmerno već izvršenom kretanju voza, omogućilo je stvaranje novih maršruta čim kompozicije u saobraćaju napuste zone odgovarajućih pružnih uređaja (*elastičan tranzit*).

Korak dalje u tom pravcu predstavlja centralizovani sistem upravljanja železničkim saobraćajem. Primenjen je najpre u Sjedinjenim Američkim Državama, uglavnom na linijama sa jednim kolosekom. U Francuskoj je ovaj sistem uveden prvi put na deonici sa tri koloseka između gradova Uj—Sartruvil, a kasnije i Ašera. Jedan kolosek ove linije korišćen je na taj način što su vozovi naizmenično puštani u jednom i drugom smeru. Pomenuti sistem uspešno je primenjen za vreme elektrifikacije linije sa dva koloseka, između Pariza i Liona. Na najopterećenijoj deonici, između Blezi-Ba i Dižona, vozovi su na oba koloseka naizmenično puštani prvo u jednom, a zatim u drugom pravcu. Umesto da telefonom izdaje naređenja osoblju stanica i komandnih mesta, dispečer daljinskim upravljanjem komanduje skretnicama i signalima. Na ploči za optičku kontrolu može u svakom trenutku da vidi položaj svih uređaja skretnica i signala i položaj vozova na svakoj deonici pruge.

Najzad, veliki napredak je učinjen kada je upravljanje kretanjem vozova posredstvom signala i skretnica povereno elektronskim računskim mašinama. Željeno kretanje vozova mora se prethodno »zadati« mašini *programom*. Elektronski računar zamenjuje dispečera i sam vrši, ako je potrebno, izmenu u programu i obezbeđuje, ako je red vožnje poremećen, najbolje moguće kretanje. Ovaj način upravljanja korišćen je prvi put na deonici pruge Dol—Valorb.



Eksploatacija dvokolosečne pruge puštanjem vozova naizmenično u jednom i drugom smeru.
Fot. Artistique. Dižon.

POVEĆANJE BRZINE. U borbi protiv konkurencije drugih prevoznih sredstava i u želji da zadovolji zahteve korisnika, železnica nastoji da poveća komercijalnu brzinu ne samo na glavnim prugama, na kojima je to i najlakše, već i na celokupnoj železničkoj mreži. Povećanje brzine zahteva velike napore i korenite promene u svim oblastima železničkog saobraćaja.

— *Lokomotive* moraju biti snažnije jer se veliki deo otpora pri vuči (oni koji nastaju usled raznih otpora prouzrokovanih vazduhom) povećava sa kvadratom brzine. Električne i dizel-lokomotive prilagođavaju se bolje velikim brzinama jer nemaju, kao parne mašine, teške delove sa naizmeničnim kretanjem. Brzinski rekord na šinama s električnom vučom postignut je u Francuskoj 1955. godine.

— *Pogonska i vučena vozila* treba da imaju osovinske mazalice sa kliznim ležištima sa automatskim podmazivanjem ili sa valjkastim ležištima da bi se izbeglo suviše često i katastrofalno pregorevanje ležišta, usled čega dolazi do oštećenja rukavca osovine.

— *Kolosek* treba da bude savršeno trasiran, nivelisan i sa jednakim razmakom šina. Izbegavati, ako je moguće, spojeve šina, povećati poluprečnike krivina, podesiti nadvišenje šina, ukloniti kritične tačke i zameniti presecanja sa ukrsnim skretnicama.

— *Signalizaciju* treba podesiti vodeći računa o znatno povećanom zaustavnom putu pri kočenju (povećati rastojanje predsignala i glavnog signala i postaviti »prethodne opomene«).

— *Kočenje* treba poboljšati i što bolje iskoristiti prianjanje, ali tako da ne dođe do samokočenja pri malim brzinama, jer se koeficijenat trenja kočnica povećava sa smanjenjem brzine (koristiti usporivače-»decelerostate«).

— Najzad, i *eksploatacija* se mora prilagoditi većim brzinama. Spora kretanja (teretni vozovi) ne treba da remete kretanje brzih vozova (koristiti aktivne sporedne koloseke za spore vozove, puštati brze vozove jedan za drugim ili u grupama). Stanice se moraju prepraviti da bi se izbeglo obavezno zaustavljanje ili usporavanje vozova. Prelaz sa jedne na drugu železničku mrežu treba pojednostaviti. U nekim zemljama (Japan) izrađene su specijalne železničke pruge i brzi vozovi su odvojeni od teretnih.

Tehnika budućnosti

METRO NA PNEUMATSKIM TOČKOVIMA

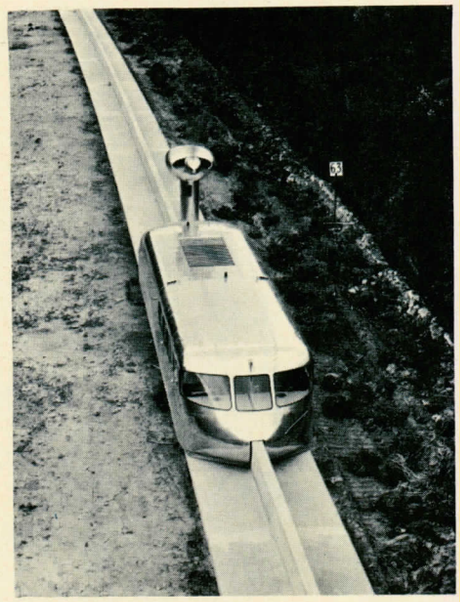
Vozila metroa izložena su veoma teškim uslovima neprekidnog rada, sa čestim zaustavljanjima i polascima. Putnici koji se koriste ovim prevoznim sredstvom moraju u njemu, zbog velikih rastojanja (radno mesto — mesto stanovanja), da provode srazmerno veliki deo svog vremena. U težnji da se poboljšaju usluge, povećava se kapacitet linija i udobnost u vozilu. Povećanje kapaciteta zahteva veći broj vozova, veće brzine, ubrzanja i usporenja. Bolji komfor postiže se smanjenjem buke, jačim osvetljenjem, većom udobnošću sedišta i poboljšanjem elastičnog vešanja vozila.

Primenom pneumatskih točkova rešen je istovremeno veliki broj ovih problema. Prvi prototip ovog vozila pustila je u saobraćaj Autonomna uprava gradskog saobraćaja u Parizu (R. A. T. P.), 1951, na liniji Por de Lila—Pre Sen Žerve. Kasnije su postupno opremljene još tri linije (br. 11, 1952; br. 1, 1963; br. 4, 1966). Vozila R. A. T. P, sa gumenim točkovima, postavljena su na obrtna postolja koja imaju istovremeno i drumski i železnički donji trčeći stroj. Železnički donji trčeći stroj služi za vođenje samo po pružnim uređajima i preuzima opterećenje u slučaju kvara na gumama. Izvan pružnih uređaja, bočno vođenje se izvodi postavljanjem gumenih točkova sa vertikalnom osovinom na sva četiri ugla obrtnog postolja. Ovi gumeni točkovi se kotrljaju po dvema šinama za bočno vođenje. Pruga, prema tome, ima dve šine sa normalnim razmakom, dve staze izvan šina za kotrljanje glavnih nosećih točkova i dve šine za vođenje. Obrtna postolja imaju po dva »pogonska mosta«, slično automobilima, a svaki ima električni motor i diferencijalni mehanizam.

»Metro sa pneumatskim točkovima« odlično odgovara postavljenim zadacima. Jasno je, međutim, da je postavljanje automobilskih i železničkih trčećih strojeva veoma komplikovano, ali i nužno za postupno prelaženje s jednog sistema na drugi. Potpuno nove konstrukcije imaće verovatno jednostavnija rešenja i ostvariće potpuno objedinjavanje automobilske i železničke tehnike.

VISEĆI VAZDUŠNI METRO

Metro je nastao kao rezultat pokušaja da se jednim moćnim prevoznim sredstvom, sa velikim stepenom iskorišćenja, gradski javni prevoz odvoji od celokupnog saobraćaja. Međutim, gradnja tunela je veoma skupa, a podzemni prostor gradova, naročito bliže površini, pretrpan gustom mrežom kanalizacionih, vodovodnih, gasnih, električnih, telekomunikacionih vodova. Jedino rešenje je izgradnja tunela na velikoj dubini (podzemna železnica u Londonu) ili pruge iznad tla. U tom smislu je izgrađen izvestan broj visećih vazdušnih železnica. Vazdušni metro na gumenim točkovima sistema SAFEGE predstavlja najveći tehnički domet u toj oblasti. Pruga se sastoji od jedne noseće grede u obliku korita. Gornja površina grede je zatvorena, a donja otvorena duž sredine. Gredu podupiru noseći stubovi postavljeni na odgovarajućem rastojanju (30 m na probnoj pruzi Šatonef sir Loar). Vozilo se sastoji od sanduka-karoserije sa glavnom gornjom gredom, koja je obešena o dva obrtna postolja, praktično slična onima kod metroa sa gumenim točkovima sistema R. A. T. P. Obrtna postolja se kreću u nosećoj gredi. Vešanje po sistemu klatna dozvoljava naginjanje sanduka-karoserije pod uticajem centrifugalne sile. Nagib vozila se kontroliše hidrauličnim uređajima.



Železnica na »vazdušnom jastuku«. *Fot. Bertin.*

Razni tipovi metroa na gumenim točkovima, pri normalnim uslovima rada, mogu postići ubrzanje i usporenje od 1,5 m/sec i uspon od 12%.

ŽELEZNICA NA »VAZDUŠNOM JASTUKU«

Ovu železnicu konstruisao je francuski inženjer Žan Berten (Jean Bertin), primenjujući sledeći princip kretanja vozila po tlu: vozilo se oslanja na tlo (ili na neku drugu podlogu, npr., na površinu vode) preko »vazdušnog jastuka«, koji nastaje uduvavanjem vazduha pri srazmerno malom pritisku. Održavanje ovog pritiska postiže se na taj način što se površina oslonca, koja treba da je što veća, okruži slojem vazduha sa većim pritiskom (Hovercraft), ili nekom gipkom, elastičnom zavesom. Na taj način se sprečava oticanje vazduha niskog pritiska. Kod voza na »vazdušnom jastuku« ovaj princip je primenjen ne samo za nošenje već i za vođenje vozila. Pruga Bertenovog voza je, u stvari, greda, betonska ili čelična, u obliku prevrnutog slova T. Vozilo ima dva reda zavesa od gume u koje se ubacuje vazduh pod pritiskom od 0,05 do 0,10 bara. Jedan red zavesa omogućava nošenje voza na samoj pruzi, koju čini horizontalni deo (stopalo) izvrnutog slova T. Drugi red zavesa osigurava vođenje po kičmi grede koju čini vertikalni deo slova T. Ceo ovaj sistem je simetričan u odnosu na osovinsku ravan pruge. Sadašnji prototip ovog voza (model u razmeri 1/2) sa kojim su vršene probe u gradu Gomez-la-Vil, na pruzi dugačkoj 6 km, ima klasični motor od 250 KS, sa avionskom elisom. Dva ventilatora za ubacivanje vazduha pokreću automobilski motori od 50 KS. Ovaj prototip je postigao, sopstvenim pogonom, brzinu veću od 200 km/čas, a sa dodatnom raketom brzinu veću od 300 km/čas. Predviđeno je i korišćenje turbomlaznih i reaktivnih motora. Pogon linijskim elektromotorom, na predlog P. Patena (P. Patin), 1964, može da bude veoma elegantno rešenje, naročito u pogledu smanjenja buke. Ispitivanja su pokazala da se može postići i verovatno preći brzina od 400 km/čas pod uslovom savršenog izvođenja trase, naročito poluprečnika krivina u horizontalnoj i vertikalnoj ravni. S druge strane, voz na »vazdušnom jastuku« može da savlada znatno veće uspone i padove od klasičnih železnica. Kočenje se vrši, normalno, pomoću motora (elisom ili reaktivnim motorom sa hodom i unazad). Naglo kočenje se postiže frikcionim uređajima na pruzi ili čak i prestankom dejstva vazdušnog jastuka. Konstrukcija vozila na »vazdušnom jastuku« slična je avionskoj: sanduk karoserije od lake legure, kabina pod pritiskom itd. Nošenje vozila »vazdušnim jastukom« omogućava dobar raspored tereta između vozila i pruge i olakšava primenu lakih konstrukcija. Izvođenje skretnica izgleda moguće, ali je vrlo teško. Nužnost skretnica nije za sada dokazana. U okolini Orleana predviđena je izgradnja jedne eksperimentalne pruge koja bi, u drugoj fazi gradnje, povezala Orlean sa Parizom. Vozilo će imati 84 sedišta, 14 redova po 6 sedišta. Motori i ventilatori biće zvučno izolovani. Ukupna instalisana snaga biće 3 200 KS, a težina pod opterećenjem nešto manja od 20 tona. Pruga će biti, kao i prva eksperimentalna pruga, izrađena od betona, ali će izvesne deonice, ispitivanja radi, biti od čelika.

NEPREKIDNI TRANSPORT

Neprekidni transport koristi se prvenstveno za prevoz rastresitog materijala, a zatim i za prevoz putnika, i to na relativno kraćim rastojanjima (od nekoliko desetina metara do nekoliko kilometara). Ovaj sistem postiže znatne kapacitete na račun brzine koja, uglavnom, ostaje veoma mala.

Treba razlikovati:

— *Transport beskrajnom trakom*, čiji kapacitet je stotine, čak i hiljade tona na čas. »Putnička« varijanta ove vrste transporta je »pokretni trotoar«, koji može da preveze 3 000 do 10 000 osoba na čas brzinom od oko jednog metra u sekundi. Primenom specijalnih uređaja (trake sa stepenastim povećanjem brzine) postižu se tri do četiri puta veće brzine, pa je, prema tome, i kapacitet veći. Dužina ovih traka je nekoliko kilometara.

— *Hidraulični transport* ili *transport cevima* (pipe-lines) predviđen je za prevoz tečnosti (voda, proizvodi industrije nafte itd) i čvrstih materija u obliku praha i suspendovanih u vodi sa manje ili više bentonita (ugljena prašina, ruda itd.). Dužina nekih cevovoda iznosi nekoliko hiljada kilometara.

— *Sistem žičare sa neprekidnim kretanjem* (žičare sa korpama, žičare sa sedištima vešanim na jednom kablu, žičare za skijaše), ima postrojenja dugačka i po nekoliko kilometara.

— *Transporteri ili lančani beskrajni konvejeri* sastoje se od elemenata zakačenih jedan za drugi, od kojih svaki prenosi po jedan predmet (industrijski ili građevinski transporteri), ili jednu osobu, ili elemenat vozila za prevoz putnika [transporter Batelovog (Battelle) Instituta u Ženevi, vertikalni transporteri zvani »pater-noster«]. Najčešće se za ove transportere koristi vazdušna pruga sa jednom šinom.

Osnovnu teškoću sistema neprekidnog transporta za prevoz putnika predstavlja penjanje i silaženje u pokretu. Ovaj problem rešavan je ili ubrzavanjem putnika, da bi njihova brzina bila ravna brzini transportera (pomoću pokretne platforme ili uređaja sa vozilom različite brzine, kao u sistemu Batelovog Instituta), ili usporavanjem transportera (sistem »Carveyor«, sačinjen od malih nezavisnih kolica koja se kreću po putanji od pokretnih valjaka).

Prevela **Olga Oka** **Pierre PATIN**

O. E. L. III — 49.

AUTOMOBIL

PARA, PRVI POKRETAČ AUTOMOBILA. U toku razvoja automobilskog pogona i u prvim poduhvatima mogao je doći u obzir samo jedan izvor energije — para. Čim se, sto godina kasnije, pojavio gasni motor, odmah je postao opasan takmac pari i uspeo je da je za kratko vreme sasvim istisne.

Nema nikakve sumnje da prvenstvo za konstrukciju prvog parnog motornog vozila pripada Nikoli Žozefu Kinjou (Nicolas Joseph Cugnot). Kinjo je kao vojni inženjer projektovao traktor na tri točka za vuču topova i municije. Prednji točak je bio pogonski i upravljački, a energiju je dobijao iz parnog kotla koji se nalazio ispred samog traktora. Kinjoov traktor je doživeo tri verzije: prvu je ostvario belgijski mehaničar Brezen (Brezin) 1763. godine u Briselu; u svojoj drugoj verziji, izrađenoj 1769. na zahtev generala De Gribovala (de Gribeauval) ovaj traktor je mogao da preveze četiri putnika brzinom od 10 km/h, ali slab pritisak pare u kotlu dopuštao je vožnju od samo 15 minuta, te je trebalo čekati daljih 15 minuta da se pritisak ponovo digne; treća verzija je, u stvari, produženje druge; u ovoj verziji traktor je mogao povući 4 do 5 tona brzinom od 12 km/h. Traktor je konstruisan u pariskom vojnom arsenalu. Probnom vožnjom je utvrđeno da se veoma teško upravlja ovim vozilom. Da bi, naime, traktor bolje prianjao na kolovoz, konstruktor je nasadio na pogonske točkove prave zupce, razume se, na štetu pokretljivosti vozila.

Posle pionirskih radova Kinjoa sledio je niz pokušaja da se para prilagodi drumskoj vuči. U stvari, to su bile pre »lokomotive« na drumu nego kola u pravom smislu. Kola koja je konstruisao Merdok (Murdock) 1784. imala su tri točka, od kojih su dva zadnja bili pogonski točkovi; automobil Simingtona (Symington) iz 1786. godine imao je četiri točka, a »lokomotiva« je bila pozadi; Trevitikov (Trevithick) automobil iz 1801. imao je parni kotao sa visokim pritiskom i mogao je da savlada uspone do 20%; Grifitova (Griffith) parna kola (1821) imala su takođe četiri točka, motor sa dva cilindra postavljen pozadi i karoseriju na poluelip-tičnim gibnjevima; godine 1818. Džems Nevil (James Neville) prijavio je patent kako se može povećati prianjanje točka na usponu; patent je Nevil primenio 1823. godine na parnim kolima.

Henkoku (Hancock) je 1827. posle nekoliko neuspelih pokušaja, pošlo za rukom da sagradi parni motor i kotao sa više komora za sagorevanje; komore je međusobno pričvrstio zavrtnjima, što mu je omogućilo da konstruiše tricikl faeton za četiri putnika (1829) i nekoliko parnih poštanskih kola, među kojima *infant I* (1831) i *enterprajz* (Enterprise, 1835), koja su obavljala redovni saobraćaj delom između Stratforda i Londona, a delom između Londona i Brajtona.

Gurnej (Gourney) je 1825. pronašao parni kotao sa cevima, a tri godine kasnije (1828) konstruisao je parna kola samo sa jednim pogonskim točkom, koja su se mogla pretvoriti i u vozilo sa dva pogonska točka.

Sva ova ostvarenja imala su isti nedostatak: vozila nisu bila sposobna da se kreću većom brzinom pri oštrim zaokretima i u krivinama; pogonski točkovi, naime, nisu bili podešeni tako da se svaki točak može okretati različitom brzinom. Bilo je raznih predloga, ali nijedan nije predstavljao konačno rešenje ovog problema. Predloženo je bilo, na primer, da se svaki točak postavi na nezavisno vratilo, ili da se samo jedan točak osloni na pogonski most, dok bi se drugi točak spregnuo sa njim posredstvom neke spojnice, ili, naposletku, da se usvoji sistem na tri točka, od kojih bi samo prednji bio pogonski.

ISTORIJA NASTANKA AUTOMOBILA

Rešenje je pronašao Francuz Onezifor Peker (Onésiphore Pecqueur), koji je 1827—1828. prikazao diferencijalni prenosnik sastavljen od zupčanika i satelita i konstruisao diferencijal koji je omogućio da se točak na unutrašnjoj strani krivine okreće sporije od spoljnog točka. Točak na spoljnoj strani krivine treba da pređe duži put, mora, dakle, da se okreće brže. Nekoliko godina kasnije Roberts (Roberts) je pronašao sličan uređaj i primenio ga kod lokomotive za drumski saobraćaj (1833).

Usavršavanje parne vuče je i dalje napredovalo. Naročito zaslužni u ovoj oblasti bili su: Rasel (Russel, 1834), čija su kola mogla da pređu 12 km za 40 minuta, i Revel (Revel), koji je za loženje kotla upotrebio naftu. Vrhunac razvoja u parnoj vuči postigao je Amedej Bole Otac (Amédée Bollée); on se smatra tvorcem »turističkih kola«, koja su zamenila dotadanje parne diližanse, spore, teške i nepodesne za manevrisanje. Bole je 1873. projektovao i jedan racionalni sistem upravljanja: dva točka se zakreću na krajevima krute osovine i istovremeno održavaju položaj upravan na poluprečnik opisane krivine; to je, u stvari, princip na kome počiva današnji sistem upravljanja automobila. Novi sistem upravljanja Bole je primenio kod svojih prvih kola — koja je nazvao *obeisant* (Obéissante), tj. poslušna kola. Kola su bila teška 5 tona. Pošto ih je isprobao u okolini svog rodnog mesta Mansa, Bole ih je prikazao na putu od Le Mana do Pariza; rastojanje od 230 kilometara prešao je za 18 sati (1875) i uspostavio stalnu vezu Pariz—Bordo. Sa svojim novim kolima *mansel* (Mancelle) — kočijama tipa »Viktorija« sa diferencijalnim prenosnikom — Bole je dao osnovu za standardni oblik automobila (1878). Nešto kasnije, on je za potrebe armije konstruisao kola *Mari-An* (Mary-Anne), jednu vrstu drumske lokomotive, sa komandnim uređajem pozadi; lokomotiva je mogla vući dva topa od 155 mm i jedan top od 138 mm. Bila je sama teška 36 tona, a korisna vučna sila je bila 150 tona po ravnom putu i 36 tona na usponu od 6%. Vozilo je imalo šest točkova, od kojih su četiri zadnja bili pogonski. Sa *Mari-An* Amedej Bole je prevalio put Le Man — Ark-sir-Arijež (Le Mans — Arc-sur-Ariège) od 725 km za 74 časa (1879).



Serpoleov tricikl (1891).



Automobil De Dion-Butona (1899).

Ipak, eri parne vuče na drumu bližio se kraj. Markiz De Dion (de Dion), u saradnji sa Butonom (Bouton) i Treparduom (Trépardoux), konstruisao je parni četvorotočkaš i opremio ga specijalnim parnim kotlom; kotao se sastojao od cevi koje su se mogle vaditi u slučaju opravke, a bio je postavljen ispred vozila (1883); od istog konstruktora potiče i niz kola na tri točka. Međutim, čim se pojavio gasni motor, ubrzo je došlo do izražaja njegovo preimućstvo nad parnom vučom. Uzalud je Serpole (Serpollet) pokušao da se suprotstavi novom motoru. On je 1887. pronašao kotao sa tankim cevima u kome se voda tako reći odjednom pretvara u paru; kotao je postavio na tricikl, za koji je dobio i prvu vozačku dozvolu izdatu u Francuskoj. Shodno slovu dozvole, Serpole je imao pravo da vozi po Parizu maksimalnom brzinom od 15 km/h, a na otvorenim drumovima bez ograničenja brzine. Iste godine pojavljuju se dva nova modela — jedan tricikl sa dva sedišta i jedan četvorotočkaš. Ovaj poslednji je konstruisao Arman Pežo (Armand Peugeot) u svojoj fabrici u Odenkuru (Audincourt). Na izložbi u Salonu 1889. Pežoov četvorotočkaš nije postigao nikakav uspeh.

VLADAVINA GASNOG MOTORA. Gasni motor je pronašao Etjen Lenoar (Etienne Lenoir), belgijski inženjer i naturalizovani Francuz »za zasluge koje je pružio Francuskoj za vreme opsade Pariza«, u toku rata 1870—1871. Prvi patent je dobio 24. januara 1860. za »motor koji radi na principu širenja gasova«.

U patentu se ne pominje benzin kao gorivo; u to vreme ovaj ugljovodonik bio je skoro nepoznat, ali patent ipak predviđa njegovo korišćenje u budućnosti; naime, u patentu se izričito navodi da »motor radi na osnovu smeše gasa i vazduha koja se električnim putem pali«. Tu se takođe ističe da će »karburator« pripremati smešu, a paljenje će obezbediti Rumkorfova bobina (indukcioni kalem) zajedno sa »svećicom« od porculana. Svećica se u ovom patentu prvi put pominje u istoriji paljenja gasnog motora. Ovaj sistem paljenja bio je primenjen još 1883. kad je Leonar prikazao svoj novi gasni motor, koji je radio po četvorotaktnom ciklusu: usisavanje, sabijanje, paljenje-širenje, izduvavanje, čiji je princip još 1862. postavio Bo de Roša (Beau de Rochas). U borbi za priznanje prioriteta Lenoar je morao da izdrži dva procesa: prvi proces je pokrenuo Markus, koji je prikazao svoj benzinski motor tek 1873,

Fot. Roger-Viollet, Giraudon.

a druga osoba koja je Lenoaru odricala pravo prvenstva bio je Oto (Otto), koji je stvarno konstruisao motor na istom principu ciklusa kao što je bio ciklus Boa de Roša i nazvao ga svojim imenom *Otov ciklus* — ali tek 1863.

U Nemačkoj je Karl Benc (Benz), pošto je najpre napravio motornu dresinu, prikazao 1880. svoj dvotaktni motor, a 1885. sagradio tricikl sa gasnim četvorotaktnim motorom. Sledeće godine (1886) Benc je projektovao novi motor koji je kao gorivo koristio pare nekog isparljivog sredstva; motor je ugradio u svoj tricikl i to je, u stvari, bilo prvo vozilo sa benzinskim motorom.

Dajmler (Daimler), koji je u početku sarađivao sa Otom, patentirao je 1883. motor na »gas ili ulje«, zatim je konstruisao motor sa jednim vertikalnim cilindrom i veće specifične snage. On je 1885. ugradio ovaj monocilindrični motor na bicikl i tako ostvario prvi motocikl. Radovi Dajmlera omogućili su Panardu (Panhard) i Levasoru (Levassor) da sagrade prve automobile sa benzinskim motorom (1891); prenos se vršio preko zupčanika, a vozila su imala tri stepena prenosa, dok se promena vršila posredstvom pomičnih zupčanika; to je bio i prvi automobil ove vrste.

Markiz De Dion radio je na usavršavanju benzinskog motora u saradnji sa Lekerom (Lecoeur) i prijavio je veliki broj patenata za dvotaktni motor i za motor sa više cilindara (1889). Višecilindrični motor prilagodio je za tricikl sa pedalama, a kasnije za vozilo na četiri točka, čime je postavio osnove budućeg automobila.

Posle besperspektivnog pokušaja sa triciklima i Serpoleovim parnim kotlom, Arman Pežo je u fabrici Panard (1896) konstruisao četvorotočkaš i ugradio Dajmlerov benzinski motor sa rasporedom cilindara u obliku slova »V«, da bi 1896. izradio sopstveni motor, a zatim pristupa usavršavanju šasije. Njegova šasija bila je lakša i otpornija od tada postojećih modela. Godine 1899. sa motorom od 20 KS Pežo postiže brzinu veću od 75 km/h.

Luj Reno (Louis Renault) je 1897. konstruisao tricikl u koji je ugradio De Dionov motor; 1897. pronašao je direktni prenos u menjaču sa tri stepena prenosa i primenio ga kod svog prvog automobila sa kardanskim vratilom; a počev od 1899. on proizvodi svoje automobile u malim serijama. Godine 1902. Reno se pojavljuje sa prvim četvorocilindričnim motorom za trke, koji uskoro pretvara u serijski motor i time se privremeno odriče trkačkih ambicija, posle pogibije svoga brata Marsela (Marcel) na trci Pariz—Madrid (1903).

Na kraju, još jedan pionir čiji je pomen, na žalost, pao u zaborav, E. Delamar-Debutvil (E. Delamar-Debouteville) koji je još 1883. pustio u saobraćaj prvi francuski automobil opremljen motorom sa unutrašnjim sagorevanjem. U to doba pažnja javnosti bila je koncentrisana na Benca i Dajmlera, pa je ovo ostvarenje ostalo bez perspektive.

Na razvoj automobila naročito povoljno je uticao razvoj pneumatika, koje je prvi u praktičnom obliku proizveo Danlop (Dunlop, 1887—1888), a Mišlen (Michelin) usavršio uvođenjem zamenljivih naplataka.

Sve brži razvoj drumskog saobraćaja davao je podstreka za takmičenje tadanjim konstruktorima i skrenuo pažnju javnosti na novo vozilo čija je budućnost bila sasvim nepoznata; razumljivo da je ovako nagli razvoj motorizacije saobraćaja morao otvoriti put istraživanjima problema nastalih porastom brzina i mehaničke pouzdanosti delova ovog novog vozila.

Za ilustraciju brzog razvoja može da posluži podatak iz koga se vidi kako se povećavala prosečna brzina na prvim trkama i na tzv. međugradskim putevima:

1895: Pariz—Bordo 23 km/h;

1901: Pariz—Berlin 74 km/h;

1903: Pariz—Madrid (trka je prekinuta u Bordou zbog smrtnih udesa u toku trke) 105 km/h.

Posle trke Pariz—Madrid zabranjena su brzinska takmičenja na neobezbeđenim putevima Francuske.

POVREMENA KONKURENCIJA ELEKTRIČNE ENERGIJE. U jeku borbe između parnog kotla i gasnog motora pojavila se, sa izvesnim zakašnjenjem, i električna energija. Istina je da bi svaki pokušaj sa električnim pogonom bio unapred osuđen na propast da nije bilo prethodnih radova Grama (Gramme) o dinamu i Plantea (Planté) o olovnom akumulatoru. Isto tako, Britanac A. Davidson došao je na ideju da za drumski saobraćaj koristi svojstva elektromagneta koji se napaja strujom iz akumulatora; Davidson nije uspeo da postigne značajniji rezultat jer je stepen korisnosti njegove mašine bio veoma mali. Ova čudna mašina konstruisana je 1842. u Edinburgu i imala je na svojoj osovini valjak od drveta, a na valjku su bile po tri poluge od mekog gvožđa raspoređene na podjednakom rastojanju duž celog valjka. Na krajevima valjka nalazila su se četiri elektromagneta, po dva na svakom kraju. Čim bi prva poluga prošla pored prvog para elektromagneta, elektromagneti drugog para privukli bi sledeću polugu, itd.

Godine 1881. inženjer Truve (Trouvé) pronašao je prvo vozilo sa nezavisnom električnom vučom: to je bio tricikl *kaventri* (Coventry Rotary) sa pedalama. Vozilo je imalo dva mala elektromotora. Akumulatori su bili smešteni pozadi. Zajedno sa vozačem bilo je teško 160 kg; ono je 19. aprila 1881. prošlo više puta ulicom Valoa (Valois) brzinom od 10 do 12 km/h. Mada su ovi počeci bili veoma skromni, ipak su podstakli duh takmičenja kod istraživača. U samom početku oni su se suočili sa jednom ozbiljnom teškoćom električne vuče: preteranom težinom olovnih akumulatora. Ubrzo su se suprotstavile dve škole: škola koja se po uzoru na Truvea opredelila za tricikl zbog njegovih manevarskih sposobnosti i male težine i škola koja je poklanjala veću pažnju vozilu na četiri točka, pravdajući njegovu znatnu težinu sposobnošću vozila da preveze veći broj putnika. Ovoj školi pripadao je Rafar (Raffard), koji je konstruisao omnibus sa krovom. Njegov omnibus je mogao da primi 50 putnika. Ovaj omnibus, nazvan »tramkar« (Tramcar), imao je bateriju (akumulatore) od 3 tone i vozio je na liniji Prestoni trg (Place du Trône)—Versaj, dugoj 47 km, brzinom od 8 km/h. Međutim, ovom je bila uskraćena saobraćajna dozvola pod izgovorom »da bi električet mogao da smeta putnicima«!

Podstaknut postignutim rezultatima, Žanto (Jeantaud) je uz Rafarovu podršku konstruisao 1881. jedan laki dvosed čije je doterivanje predstavljalo delikatan posao, pa je zato konstruisao još jedno vozilo sa motorom *Rechnicwski* od 10,5 KS. Motor se napajao strujom iz grupe od 38 akumulatora, a svaki akumulator je bio težak 15 kg. Postignuta je prosečna brzina od 24 km/h. Od 1893—1895 Žanto je vršio poslednja poboljšanja i provere svog vozila da bi ga zatim prijavio za trku Pariz—Bordo—Pariz. Na žalost, u Bordou je morao da odustane od trke zbog kvara na osovini; nije dobio nikakvu nagradu, pa ga je to obeshrabrilo za dalji rad. U jednom drugom slučaju postupljeno je sasvim drukčije: američkom konstruktoru vozila *elektrobat* (Electrobat), koji je učestvovao 1894. u sličnoj trci od Pariza do Bordoa, dodeljena je zlatna medalja mada nije završio celu trku.

U Sjedinjenim Američkim Državama osnovano je više organizacija koje su se prvenstveno posvetile usavršavanju lakih električnih vozila. U Engleskoj je »Elektrik Moutiv Pauer« (Electric Motive Power) nastavila razvoj Rafarovih zamisli o električnom omnibusu, a preduzeće »Greit Horsles Keridž« (Great Horseless Carriage) konstruiše za svoje modele »cabs« i »landaus« uređaj za zaštitu putnika od izliva elektrolita: ovom preduzeću uspela je stabilizacija elektrolita dodavanjem jedne rasprašene materije.

U Francuskoj Kriger (Krieger) pristupa rešavanju problema gradskog električnog vozila. Od jednog fijakera kompanije »Pčela« (l'Abeille) on je napravio kočije tipa »Viktorija« sa ugrađenim električnim motorom u oba prednja točka. Krigerove kočije postavljaju na liniji Pariz—Šatelro (Chatellerault), dugoj 507 km, rekord u trajanju vožnje bez ponovnog punjenja akumulatora.

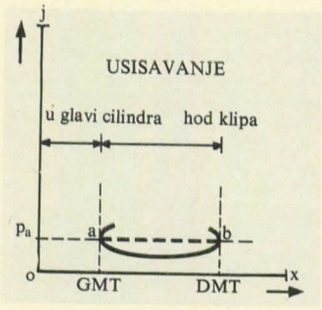
Žanto projektuje tip vozila sa originalnom karoserijom ne kopirajući ništa od konjskih trkačkih kola (što su obično činili njegovi prethodnici) i sprema se da se takmiči za rekord u brzini. Ali *»nikad zadovoljna«* (Jamais—Contente), kola belgijskog konstruktora Jenatzija (Janatzy), koji je prvi došao na ideju da karoseriju oblikuje u vidu granate (aerodinamički oblik), pobeđuje svog takmaca, Žantoa, 1. maja 1899. u Ašeru (Achères). Na ovoj trci postavljen je prvi zvanično priznati svetski rekord brzine, sa prosekom od 105,85 km/h.

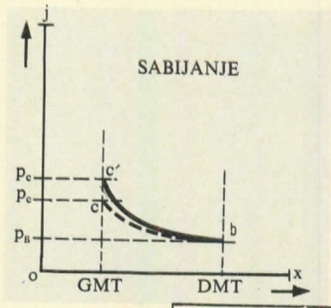
Mada je, na osnovu ovih izuzetnih rezultata postignutih na trkama, električna vuča u drumskom saobraćaju privukla pažnju javnosti, ipak je ova reklama pričinila više štete nego stvarne koristi. Ne shvatajući da se, u stvari, radi o izuzetnim vozilima čiji je vek trajanja kratak, ljudi su se čudili odakle tolika razlika kod vozila na tržištu. Tako se električna vuča posle toliko lepih i velikih obećanja nije mogla više da bori sa gasnim motorom, koji je potvrdio svoju nadmoćnost.

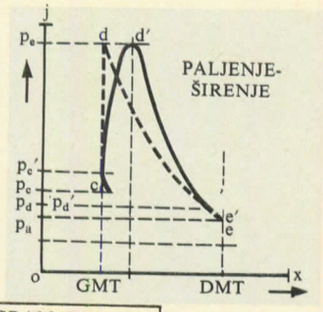
Drugi svetski rat dao je novi podsticaj razvoju električnih vozila u Francuskoj. Počinje bitka da se nađe neka zamena deficitarnom pogonskom gorivu i pomišlja se na električnu energiju. Modeli vozila koja su se već nalazila na francuskom tržištu trpe niz izmena. Naročito je to slučaj kod automobila simka 8. Drugi proizvođači orijentišu se na lake materijale (aluminijum), koji se mogu naći na tržištu. Pežo lansira V. L. V. sa motorom safi; ovim vozilom bilo je moguće voziti i do 80 km bez ponovnog punjenja akumulatora i brzinom od 30 km na čas; baterija je težila 160 kg. Pozajmljujući tehnička rešenja automobila kadrilet (Quadrilette) iz godine posle prvog svetskog rata, Pežo je na svom električnom vozilu jako približio zadnje točkove i tako izbegao diferencijal. Pošto su, međutim, Nemci zabranili svaku proizvodnju električnih automobila, odnosno pregradnju postojećih vozila u vozila sa električnom vučom, nastupio je potpuni zastoj razvoja, i krajem rata ponovo stupa u prvi plan benzinski motor. Danas je električni automobil ponovo aktuelan u nadi da će gorivna ćelija omogućiti da se reše dosad nerešeni problemi njegovog električnog pogona.

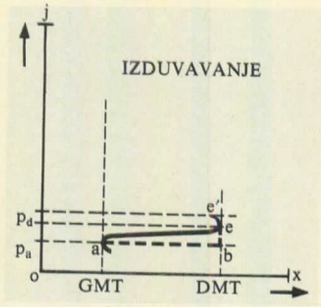
Opšti opis

Automobil se sastoji od dva glavna sklopa: od *šasije* (okvira), koju čine dva paralelna *uzdužna nosača* vezana poprečnim nosačima čime ceo sklop dobija dovoljnu krutost, i od *karoserije* ili kabine, koja je preko sistema elastičnih oslona spojena sa šasijom; karoserija je sklop automobila za smeštaj putnika. Šasija je oslonac voznog postroja koji sačinjavaju: motor, prenosni mehanizmi (spojnica, menjač, zadnji most i osovine), mehanizam za upravljanje, kočnice, elastični osloni. Ova koncepcija automobila postepeno je ustupila mesto koncepciji školjke koja istovremeno obuhvata šasiju i karoseriju u jedinstvenu celinu. Do ove nove orijentacije konstrukcije automobila došlo se, s jedne strane, zbog jednostavnije serijske proizvodnje primenom tehnološkog procesa oblikovanja presovanjem delova od lima i njihovog spajanja električnim zavarivanjem, a s druge strane, zbog potrebe veće otpornosti i krutosti ovako oblikovanog sklopa.

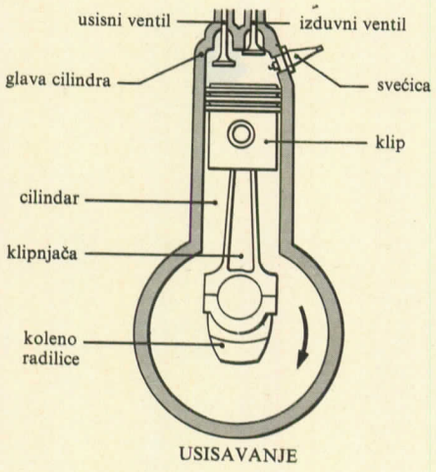




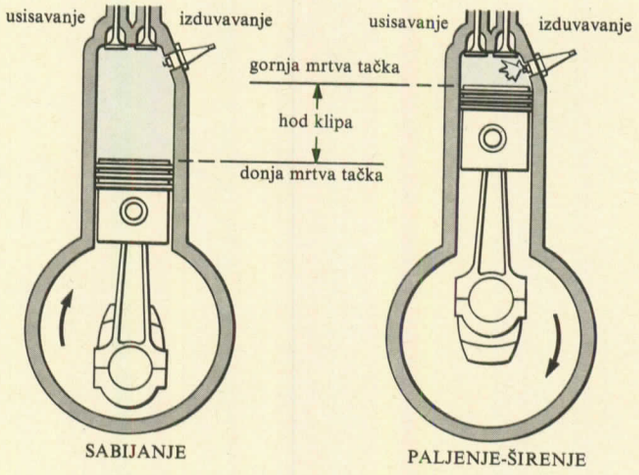




PARCIJALNI DIJAGRAM CIKLUSA

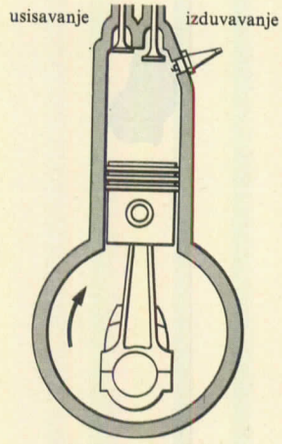


USISAVANJE



SABIJANJE

PALJENJE-ŠIRENJE



IZDUVAVANJE

Rad četvorotaktnog motora

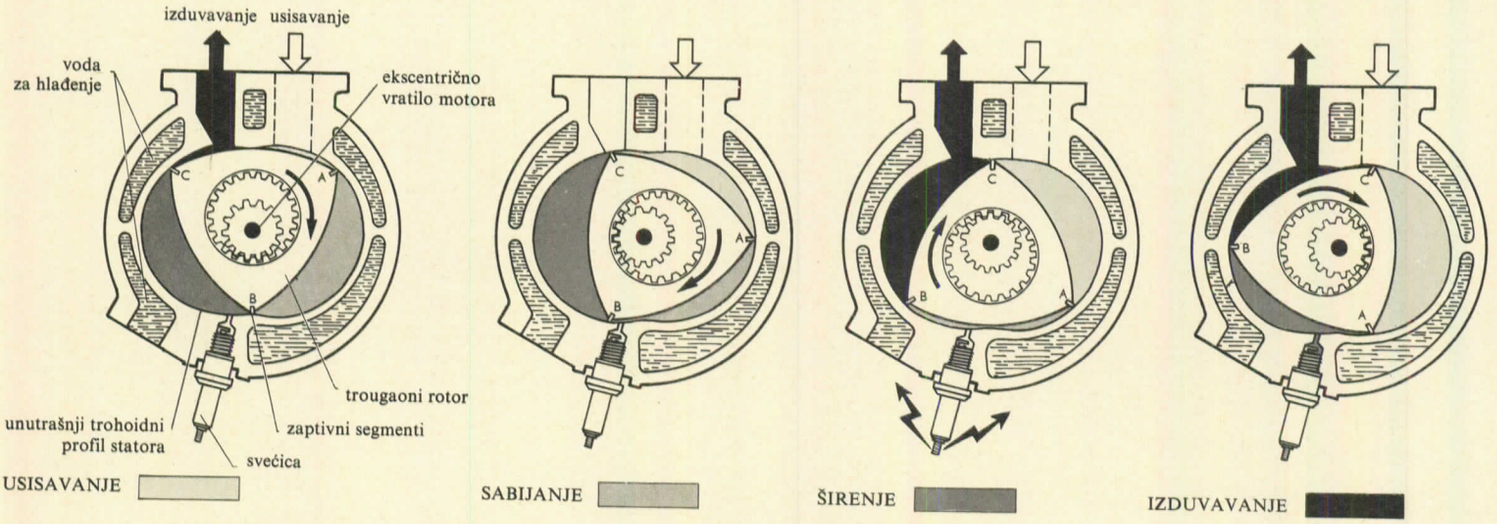
Usisavanje — Usisni ventil je otvoren, a izduvni zatvoren. Klip se nalazi u gornjoj mrtvoj tački GMT i kreće se u cilindru naniže do svoje donje mrtve tačke DMT, te stvara potpritisak u cilindru za usisavanje smeše iz karburatora. Teorijski, dijagram se svodi na pravu *ab*, koja se dobija kada se na apscisu prenese hod klipa, a na ordinatu odgovarajući pritisci. Ova horizontalna linija ima kao ordinatu vrednost atmosferskog pritiska *pa*. Pošto se usisni ventil otvara nešto ranije, za nekoliko stepeni u odnosu na ugao zaokreta radilice (oko 10°), a zatvara kasnije (oko 40°), stvarni dijagram predstavlja kriva *ab*, koja se celim tokom nalazi ispod horizontale.

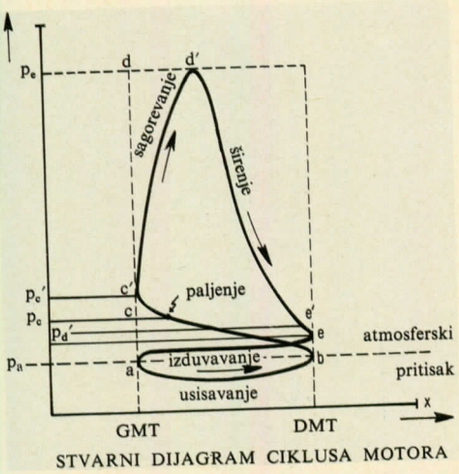
Sabijanje. — Oba ventila (usisni i izduvni) su zatvoreni. Klip, hodom naviše, sabija smešu koja se nalazi u cilindru. Teorijski, dijagram je predstavljen krivom *bc*. Tačka *c* označava momenat paljenja na kraju teoretskog pritiska sabijanja p_c.

Pošto se paljenje vrši nešto ranije, stvarni dijagram predstavljen je krivom *bc'* koja pokazuje da je, po završenom taktu sabijanja, pritisak p_c veći od pritiska p_c.

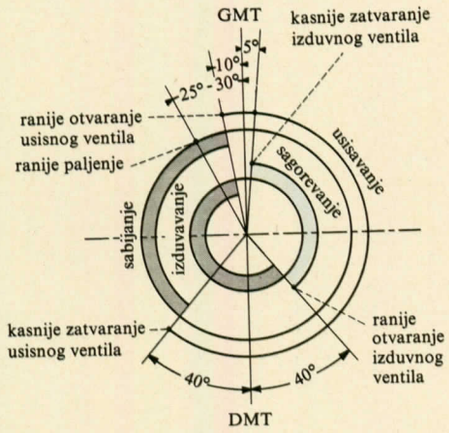
Paljenje-širenje. — Oba ventila su zatvorena. Klip se nalazi u gornjoj mrtvoj tački GMT. Sabijena smeša se pali varnicom sa svećice; naglo povećanje zapremine gasova pri sagorevanju potiskuje klip naniže. Teorijski, dijagram se sastoji od vertikale *cd*, koja predstavlja porast pritiska od p_c na kraju takta sabijanja do pritiska p_e u momentu paljenja, i od adijabatske krive *de*, gde tačka *e* predstavlja momenat otvaranja izduvnog ventila i pritisak p_d na kraju takta širenja. Pošto se izduvni ventil otvara nešto ranije, a zatvara nešto kasnije, stvarni dijagram je kriva *c'd'e'*, gde tačka *c'* označava ranije paljenje, tačka *d'* položaj klipa u cilindru na kraju pritiska sagorevanja p_d, a tačka *e'* otvaranje izduvnog ventila pod pritiskom $p_{d'}$, većem od teorijskog pritiska širenja (ekspanzije) p_d.

Izduvavanje. — Usisni ventil je zatvoren. U hodu naviše klip potiskuje sagorele gasove iz cilindra. Teorijski, dijagram se sastoji od vertikale *eb* koja predstavlja pad pritiska širenja od p_d do atmosferskog pritiska p_a. Iz grafičkog prikaza razvoda vidi se da izduvni ventil otvara ranije (ranije otvaranje 40°) a kasnije zatvara (kasnije zatvaranje 5°). Stvarni dijagram predstavlja kriva *ea*, i nalazi se iznad horizontale koja predstavlja atmosferski pritisak.





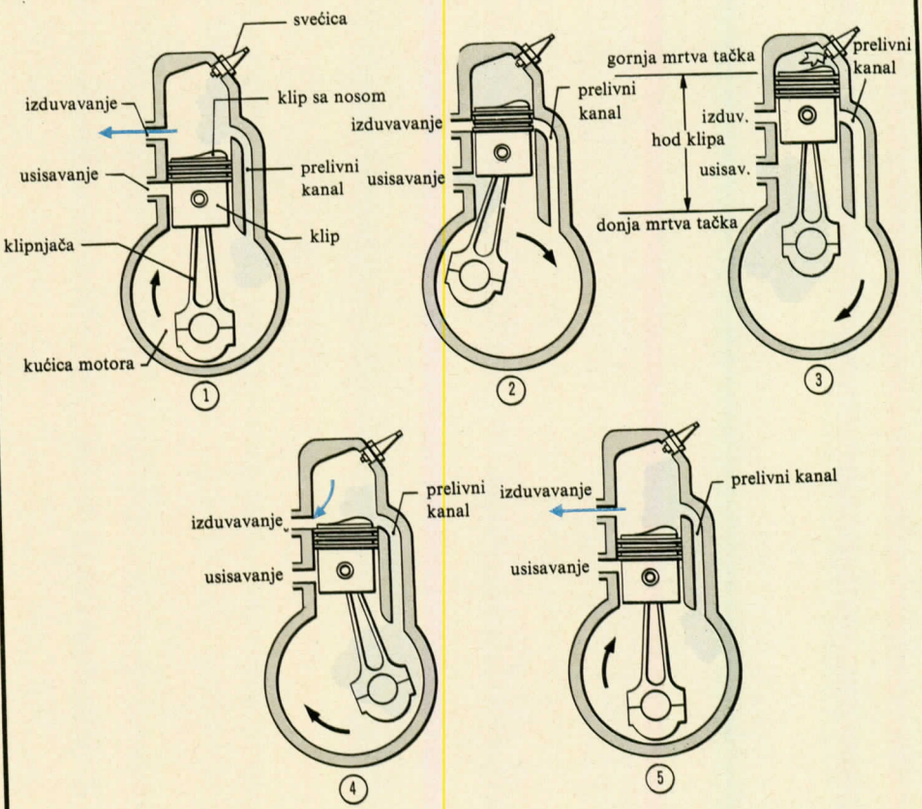
STVARNI DIJAGRAM CIKLUSA MOTORA

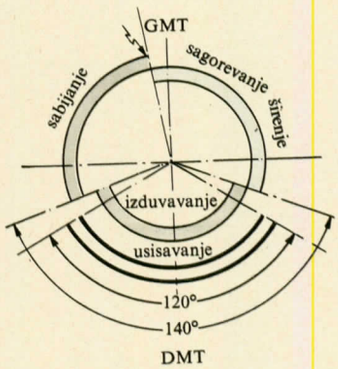


DIJAGRAM RAZVODA

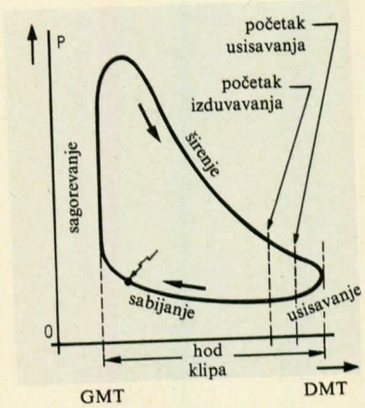
N. S. U. — Vankelov motor sa obrtnim klipom

Teme CA klipa otvara usisni otvor u momentu kada se zatvara izduvni otvor. Prostor usisne komore raste progresivno do izvesnog maksimuma. Istovremeno teme AB sabija prethodno usisanu smešu smanjujući zapreminu komore. Širenje gasova posle sagorevanja potiskuje teme BC, koje omogućava izlazak sagorelih gasova čim vrh C otkrije odgovarajući otvor. Ono započinje i novi ciklus usisavanjem, odmah po završenom izduvavanju.





DIJAGRAM RAZVODA



DIJAGRAM CIKLUSA

Rad dvotaktnog motora

Prvi takt. — Klip se kreće naviše. Klip se nalazi na donjoj mrtvoj tački DMT. Izduvni kanal je otvoren, pa sagoreli gasovi završavaju isticanje u atmosferu. Prelivni kanal je otvoren, a kućica je puna smeše, usisane u toku prethodnog hoda klipa naniže ①. U daljem hodu naviše klip stvara izvestan pritisak (depresiju) u kućici motora. Usisni kanal je otvoren, smeša prodire u kućicu motora ②. Izduvni i prelivni kanal su zatvoreni. Klip svojim temenom sabija smešu, koja je prethodno usisana u cilindar. Paljenje počinje nešto pre nego što klip dospe u gornju mrtvu tačku GMT ③.

Drugi takt. — Klip se vraća naniže. Hodom naniže klip lagano sabija smešu koja se nalazi u kućici. Smeša se usmerava ka prelivnom kanalu ④. Teme klipa otvara prelivni kanal i gasovi prodiru u cilindar. Istovremeno otvara se izduvni kanal i sveža smeša iz prelivnog kanala potiskuje sagorele gasove napolje: to je takt ispiranja ⑤.

Motor

Motor se smatra dušom automobila. To je organ koji pokreće pogonske točkove preko prenosnog mehanizma. Bitni deo motora je *cilindar* u kome se kreće *klip*; klip se kreće pod dejstvom pritiska na klip u momentu kad električna varnica upali smešu goriva i vazduha; električnu varnicu izaziva *uređaj za paljenje*. Smeša goriva i vazduha se obrazuje i dozira ili u *karburatoru*, ili *ubrizgavanjem* goriva u prostor za sagorevanje (neposredno ubrizgavanje), ili u usisnu cev (posredno ubrizgavanje). Klip vrši naizmenično kretanje. Klip je spojen sa *klipnjačom*, a klipnjača sa *radilicom* (kolenastim vratilom). Klipnjača pretvara naizmenično pravolinijsko kretanje klipa u kružno kretanje, koje se dalje prenosi na pogonske točkove automobila.

VRSTE MOTORA

DVOTAKTNI I ČETVOROTAKTNI MOTORI. Postoje dva sistema motora sa unutrašnjim sagorevanjem: četvorotaktni motor i dvotaktni motor. I jedan i drugi rade na principu ciklusa koji je postavio Bo de Roša (Beau de Rochas). Radni ciklus motora čine četiri uzastopna takta: 1. usisavanje smeše goriva i vazduha u cilindar; 2. sabijanje smeše; 3. paljenje, sagorevanje i širenje smeše — — ovaj takt je, u stvari, jedini radni takt ciklusa, dok ostala tri takta predstavljaju otpor radu motora; 4. izduvavanje sagorelih gasova u atmosferu. Razvod četvorotaktnog motora vrši se ventilima; za svaki cilindar postoje obično po dva ventila, jedan za usisavanje smeše a drugi za izduvavanje sagorelih gasova u atmosferu. Svaki takt ciklusa je potpuno odvojen jedan od drugog, a klip odnosno njegov gornji deo vrši rad tokom celog ciklusa.

Kod dvotaktnog motora, međutim, teme i dno klipa rade istovremeno; umesto ventila na zidu cilindra nalaze se otvori — kanali. Načelno postoje tri kanala: usisni, izduvni i tzv. prelivni kanal, koji omogućava prethodno sabijenoj smeši u kućici motora da se prelije u gornji deo cilindra.

DIZEL-MOTOR. Dizel-motor koristi kao gorivo teška ulja, naftu itd. Ovaj motor radi takođe na principu ciklusa Boa de Roša. Dizel-motor, kao i benzinski motor, može biti dvotaktni i četvorotaktni. Za razliku od benzinskog motora, paljenje kod dizel-motora je spontano (samopaljenje), pa nema potrebe ni za kakvim dopunskim uređajem za paljenje. Dovoljan je visoki pritisak vazduha u cilindru da bi se izazvalo paljenje u trenutku kad brizgaljka, tačno odmerenu količinu goriva rasprši neposredno u prostoru za sagorevanje i ista pomešana sa vazduhom postane zapaljiva.

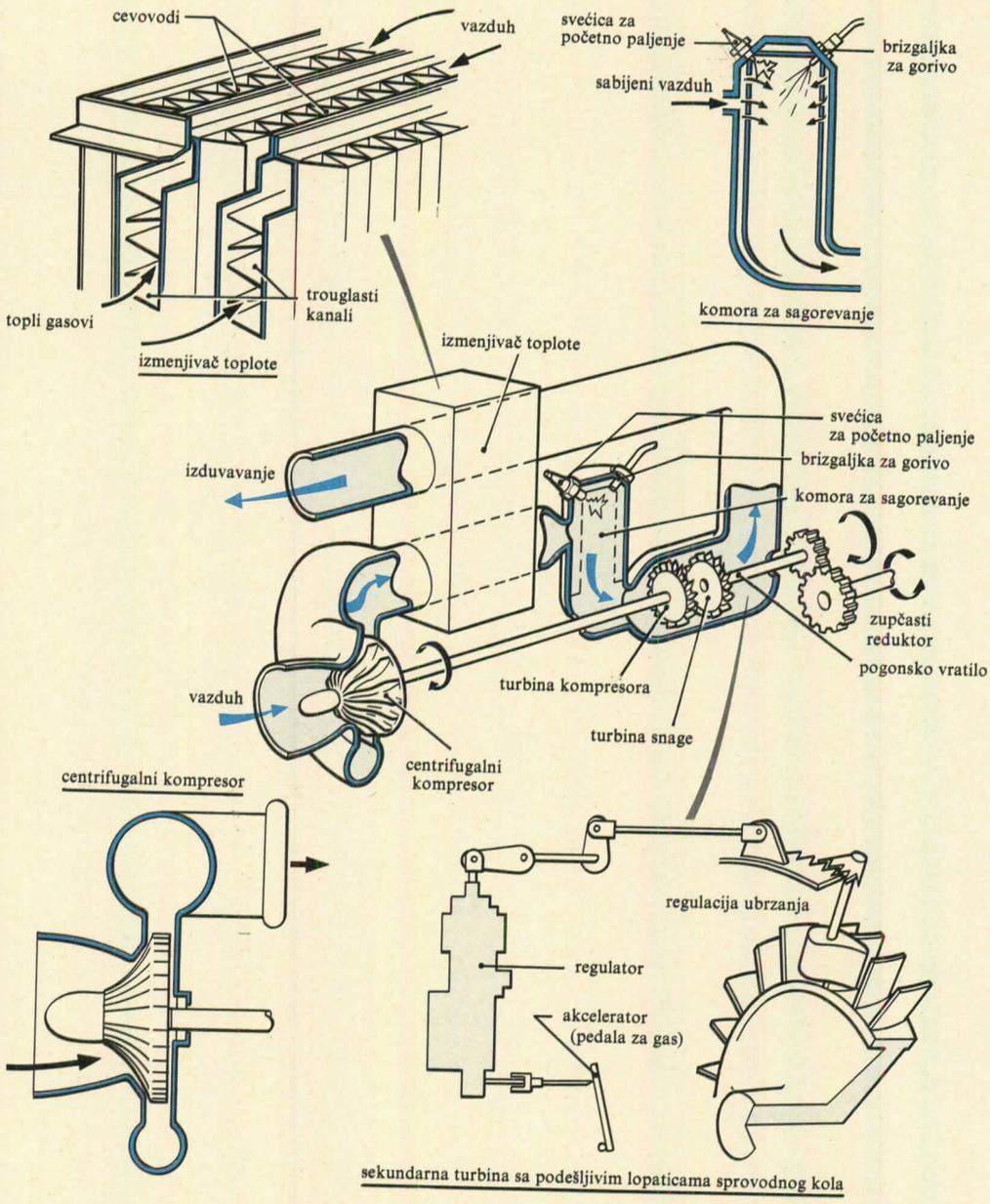
SPECIJALNI MOTORI. Naizmenično pravolinijsko kretanje klipova u cilindrima predstavlja problem uravnoteženja; ovaj problem se nikad ne može potpuno rešiti; čak ni oblici koji izgledaju najpodesniji u pogledu savršene uravnoteženosti ne rešavaju problem zbog promene položaja klipnjače. Ako se umesto naizmeničnog sistema kretanja usvoji takav sistem koji će imati samo kružno kretanje, tada postoji mogućnost potpunog uravnoteženja svih elemenata i pri velikim brojevima obrtaja. Motori koji počivaju na ovom principu su, s jedne strane, motori sa obrtnim klipom (koje ne treba mešati sa nekadašnjim rotacionim motorima davno primenjivanim u vazduhoplovstvu), od kojih se kao prvi na tržištu pojavio N. S. U.—Vankelov motor, dok se ostali nalaze još u eksperimentalnoj fazi, a s druge strane, tu je gasna turbina koju Rover, Krajzler i Dženeral Motors nastoje da prilagode zahtevima vožnje na drumu.

Motor sa obrtnim klipom. N. S. U-Vankelov sistem motora ima kućicu (stator) kružnog oblika; u kućici se kreće rotor u obliku trougla čija je svaka strana, u stvari, deo kružnog luka. Rotor je sa unutrašnje strane nazubljen; svojim zupcima on se uzubljuje u centralni ekscentrični zupčanik, pa se istovremeno i sam okreće oko ovog ekscentričnog vratila. Vrhovi rotora su u stalnom kontaktu sa unutrašnjom površinom kućice, pa radi toga je ova posebno izvedena u obliku, tzv. »trohoide«, krive iz porodice cikloida. Pomeranjem vrhova rotora, usled njegovog ekscentričnog obrtanja, obrazuju se komore promenljive zapremine, u kojima se obavljaju svi taktovi poznatog radnog ciklusa Boa de Roša.

Osa rotora je zajednička sa vratilom motora; na rotoru se nalaze zamajac i protuteg za uravnoteženje. Razvod je rešen na klasični način; sva četiri takta radnog ciklusa vrše se jedan za drugim klasičnim redosledom, s tim što na svaki obrtaj rotora dolazi jedno paljenje. Vankelov motor je, u stvari, četvorotaktni motor (svaki takt radnog ciklusa je jasno odvojen od sledećeg) koji radi kao dvotaktni motor, pošto na svaki obrtaj motora sledi jedno paljenje smeše (vidi sliku na prethodnoj strani).

Gasna turbina. Shema gasne turbine, koja se može primeniti u automobilu, u opštim crtama izgleda ovako: kompresor (jednostepeni centrifugalni za male turbine) usisava spoljni vazduh i potiskuje ga u izmenjivač toplote, gde se zagreva do visoke temperature. Proces zagrevanja se obavlja u dva razdela: najpre sagoreli gasovi koji dolaze iz sekundarne turbine odaju deo toplote komprimovanom vazduhu (koji je sabio kompresor), zatim se sabijeni vazduh meša sa gorivom u komori za sagorevanje; u komori se raspršeno gorivo pali zbog jako sabijenog vazduha, izuzev prvog paljenja za koje je potrebna varnica iz svećice.

Pošto dostignu visoku temperaturu a time i veliku brzinu, sagoreli gasovi pokreću lopatice primarne turbine visokog pritiska; ovu turbinu ponekad nazivaju *turbinom kompresora*. Turbina dobija od gasova dovoljno energije da obezbedi rad vazdušnog kompresora. Najveći deo početne energije širenja gasova koristi se za pogon sekundarne turbine niskog pritiska ili takozvane *turbine snage* (turbina pogona). Turbina snage okreće pogonsko vratilo i preko zupčastog reduktora pokreće pogonske točkove. Pošto su lopatice sprovodnog kola ove turbine pokretne, može im se pedalom ili ručicom za gas menjati korak. Podešavanjem koraka lopatica reguliše se dovod gasova prema tome da li je cilj postići veću snagu, ili štedeti gorivo, ili koristiti turbinu kao kočnicu. S druge strane, pošto izduvni gasovi imaju još dosta visoku temperaturu pa bi



Rad gasne turbine

bilo neracionalno ispustiti ih u atmosferu, oni se dovode u izmenjivač toplote, gde se njihova toplota koristi za zagrevanje komprimovanog vazduha i goriva. U tu svrhu primenjuju se dva tipa izmenjivača toplote: nepomični, koji radi na istom principu kao i hladnjak motora sa unutrašnjim sagorevanjem, i pokretni, u vidu diska, koji se polako okreće i čij se zidovi greju izduvnim gasovima. Postoji i kombinovano rešenje: motor sa slobodnim klipovima spregnut sa radnom turbinom.

Po načinu obavljanja taktova radnog ciklusa, razlikuju se tri vrste motora sa unutrašnjim sagorevanjem: motor sa klasičnim klipom, motor sa obrtnim klipom i turbina. Po načinu rada, međutim, nema ničeg zajedničkog između turbine i druga dva sistema motora jer kod turbine posebni organi vrše usisavanje, sabijanje, paljenje sa širenjem i izduvavanje.

Prednosti i slabe strane različitih motora sa unutrašnjim sagorevanjem. Pored usavršene uravnoteženosti motora sa obrtnim klipom i turbine (na kućicu motora može se na primer uspraviti kovani novčić da stoji na svojoj ivici; pri radu motora neće se poremetiti njegova ravnoteža), dakle, pored činjenice da kod ovih motora nema nikakvih vibracija, postavlja se pitanje koje su njihove ostale prednosti?

Motor sa obrtnim klipom sastoji se od veoma malog broja delova sa kružnim kretanjem. Prema tome, pod uslovom jednake snage njegova zapremina i težina manje su nego kod klasičnog motora.

I dalje, u razvodnom sistemu, koji je sličan sistemu razvoda kod dvotaktnog motora, nema dejstva inercijalnih sila. Prema tome, od motora sa obrtnim klipom može se očekivati veći stepen korisnosti utoliko pre što su sva četiri takta radnog ciklusa potpuno odvojena, dok su kod dvotaktnog motora združeni a njihov razvod zavisi, kod uobičajenog tipa motora (prethodno sabijanje u kućici, razvod kroz tri kanala, usisavanje, izduvavanje i preliv), jedino od inercije gasnog stuba. Zbog svog odličnog rešenja razvoda, motor sa obrtnim klipom ne zahteva visokooktansko gorivo. Međutim, ostaju dva problema koja je veoma teško rešiti: problem zaptivanja i problem podmazivanja.

Turbina ima iste osobine kao i motor sa obrtnim klipom: veću snagu uz istu težinu, nije, dakle, potrebna relativno teška gradnja; potpuno je nezavisna od isparljivosti goriva, nema, dakle, opasnosti od požara; ima veliki obrtni moment pri niskom režimu rada (zbog velike elastičnosti nije potrebna spojnica); ima širok opseg režima rada pri konstantnoj snazi, pošto lopatice obeju turbina obrazuju neku vrstu spojničkog fluidnog sistema uz izvesno klizanje; postoji mogućnost da se klasični menjač zameni nekim reduktorom. Međutim, takav reduktor koji treba da smanji broj obrtaja od 40000 o/min na 5000 o/min vrlo je teško napraviti. Potrošnja goriva na niskom režimu rada je visoka; ubrzanja na startu su zavisna i, na kraju, turbina se ne može ručno pokrenuti. Za izradu turbine potrebni su specijalni materijali veoma otporni na toplotu. Na rešavanju problema turbine radi se već više od pedeset godina; predloga za rešenje bilo je mnogo, a bilo ih je raznih.

ELEKTRIČNI MOTOR. Toplotni ili termički motor je složena celina koja obuhvata blok u kome struje topli gasovi od preko 1000°C. Na svim delovima motora (klipovi, klipnjače, ventili, komandni organi razvodnog sistema) oseća se uticaj naizmeničnih kretanja. Poznato je da svako naizmenično kretanje podleže silama inercije, koje se mogu samo delimično uravnotežiti. Za dopunske funkcije (priprema smeše — karburacija, podmazivanje, hlađenje) potrebni su složeni uređaji. Zbog toga je proizvodnja toplotnog motora skupa, za održavanje izvedenog motora potrebne su mnoge operacije, a periodični pregledi su dosta česti.

Električni motor nema nijedan od ovih nedostataka. Shematski posmatran, električni motor se svodi na jedan jedini okretni elemenat — rotor. Za njegov rad staraju se komandna kutija sa kontaktnim prekidačima i baterija koja ne zahteva neko posebno održavanje; dovoljno je naliti destilisane vode i ponovo je puniti svaki dan (punjenje se vrši noću jer je tada električna struja najjeftinija). U proizvodnji električnih motora korišćena su sva napredna rešenja mehanike: kuglični ili valjkasti ležaji, novi materijali, kao što su magnetni limovi, sintetički izolatori, elektrolitički bakar, itd. Elektromotor je postao tako otporan da može podneti struju preopterećenja četiri puta veću od uobičajene i dva puta veći broj obrtaja od normalnog.

Automobil sa električnim pogonom pobudio je u svoje vreme velike nade, ali se ta očekivanja nisu ostvarila; naime, nije bilo takvog izvora energije koji bi redovnim snabdevanjem omogućio dobre performanse motora. Prve baterije olovnih akumulatora bile su male snage u odnosu na sopstvenu težinu; akumulatori se nisu smeli do kraja prazniti bez bojazni da potpuno propadnu; autonomija kretanja električnog automobila nije prelazila dva časa vožnje. Izvesno poboljšanje nastalo je pojavom akumulatora kadmijum-nikl; ovi akumulatori duže su trajali, mogli su se više puta uzastopce puniti, a mogli su dosta dugo da ostanu bez punjenja. Danas Dženeral Motors proučava model električnog automobila (»Electrovair«) kod koga kao izvor energije služi baterija srebro-cink; baterija ima snagu od 100 KS. U poređenju sa »Corvair«-om sa toplotnim motorom, »Electrovair« ima sledeće performanse:

	Electrovair	*Corvair*
Ubrzanje od 0 do 95 km/h	16 s	16 s
Najveća brzina	130 km/h	140 km/h
Autonomija kretanja	85-130 km	400-480 km

Performanse ova dva vozila mogu se međusobno porediti, ali je očigledno da je autonomija kretanja »Electrovair«-a mala. Dve vrednosti o pređenom putu odnose se na kretanja pri konstantnoj maksimalnoj brzini shodno normalnim uslovima na putu. Ima izgleda da bi jedan novi izvor energije mogao rešiti problem električnog automobila. Reč je o takozvanoj gorivnoj ćeliji, koja se koristi u aparatima za vasionske letove. Gorivna ćelija daje električnu struju trošeći metal od kojeg je napravljena anoda. Zbog povratnog dejstva elektrohemijskih reakcija do kojih dolazi na negativnim pločama, gorivna ćelija može se ponovo puniti. Njena snaga po jedinici mase je velika.

Dženeral Motors nastavlja sa ispitivanjima automobila »Electrovair«: ispituju se mogućnosti pogona sa gorivnim ćelijama vodonik-kiseonik. Ćelije proizvodi firma Junion Karbid Komp. (Union Carbide Co.). Sa 32 baterije dobija se jednosmerna struja od 43 KS, a vršna snaga ide i do 228 KS. Ovakav pogonski uređaj ne samo što je glomazan već i veoma težak, a primenjen je iz jednostavnog razloga što je to danas jedini takav uređaj koji može normalno da funkcioniše. Ukupna težina »Electrovana« iznosi 3 230 kg, od čega 1 600 kg pada na motor. Ako se poredi sa kamionom GMC, čija je težina samo 1 480 kg, a na čiji toplotni motor otpada svega 395 kg, dobijaju se sledeći podaci:

	Electrovan	*GMC*
Ubrzanje od 0 do 95 km/h	30 s	23 s
Najveća brzina	113 km/h	115 km/h
Autonomija kretanja	160-240 km	320-400 km

Kompanije Dženeral Dajnemik (General Dynamic) i Edison Elektrik Komp. (Edison Electric Co.) predlažu bateriju cink-vazduh; kod takvih baterija snaga po jedinici mase je pet puta veća nego kod olovnih baterija. Nedostatak ovog akumulatora je što zahteva dopunske, i to složene uređaje (posude sa elektrolitom, izmenjivač, pumpu i sistem za prečišćavanje). Francuska kompanija SAFT se prihvatila zadatka da ceo sistem pojednostavi.

Svi su izgledi da se praktična primena električnog automobila mora ograničiti na gradsku i prigradsku vožnju, gde će doći do izražaja njegova pokretljivost i ekonomičnost. Mnogobrojni projekti se danas nalaze u fazi proučavanja; cilj je da se proizvede električni automobil koji će biti lakši od 450 kg, koji će se kretati brzinom od 70 km/h i čija će autonomija kretanja biti od 250 do 300 km.

SKLOP MOTORA

Motor je u početku imao samo jedan cilindar. Ubrzo zatim došlo se do saznanja da je potrebno povećati broj cilindara. Za ovo postoji više razloga. Klip se u cilindru kreće naizmenično pravolinijski i promenljivom brzinom; ovako kretanje izaziva reakcije inercijalnih sila koje prouzrokuju stalne vibracije. Uravnoteženje sila inercije ostvaruje se postavljanjem protivtegova na radilicu. Povećanjem broja cilindara postiže se bolje uravnoteženje inercije.

Kod klipnog motora osnovni je zahtev da se ceo radni ciklus obavlja što pravilnije. Jedan cilindar ima samo jedan radni takt na dva obrtaja radilice. Kod jednocilindričnog motora nema ciklične pravilnosti. Kod motora sa više cilindara, računajući sa paljenjem u svakom cilindru, može se dobiti ili jedan radni takt po svakom obrtaju radilice (slučaj dvocilindričnog motora) ili više radnih taktova u toku svakog obrtaja radilice. Ciklična pravilnost je utoliko veća ukoliko je radna zapremina cilindra raspoređena na veći broj cilindara.

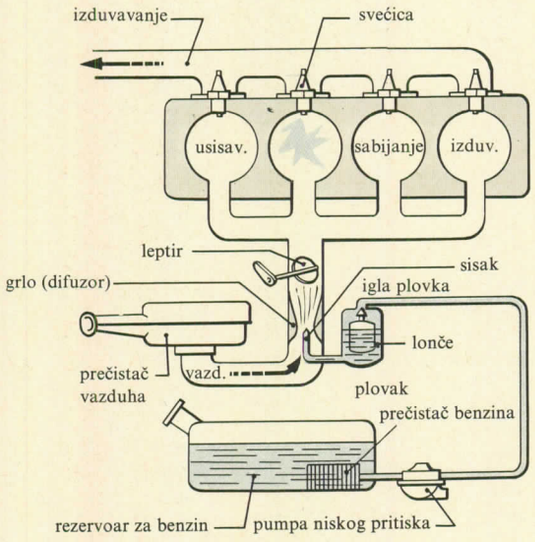
Teorijski je mogućno povećati broj cilindara. U praksi, kod četvorotaktnih motora broj cilindara je ograničen na 2, 4, 6, 8 ili 12 cilindara, od kojih se ovaj poslednji koristi samo u trkačkim automobilima. Raspored cilindara zavisi, s jedne strane, od zahteva uravnoteženja a, s druge strane, od uslova proizvodnje. Motor sa dva cilindra kod koga su cilindri postavljeni nasuprot jedan drugom, tzv. »flat-twin«, bolje je uravnotežen nego linijski motor sa dva cilindra; zato se u praksi više koristi motor čiji su cilindri postavljeni jedan nasuprot drugom. Isti raspored može se primeniti i kod motora sa četiri, kao i kod motora sa šest cilindara; tako postoje motori »flat-four« i »flat-six«, isto kao i linijski motori sa četiri ili šest cilindara. Kod motora sa šest cilindara, kao i kod motora sa osam i dvanaest cilindara, izbegavaju se suviše duge radilice, jer ih treba statički i dinamički uravnotežiti; zato se one izvode po parovima. Tako se dobijaju motori sa rasporedom cilindara u obliku slova V; prednost im je u tome da se mogu lakše smestiti u vozilu.

OSTVARENJE SMEŠE (karburacija)

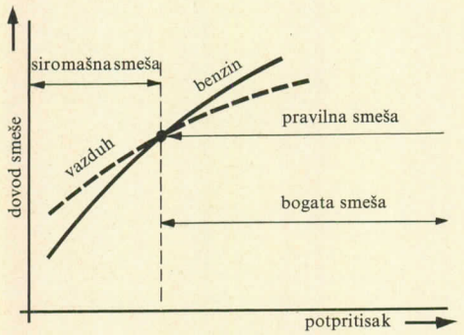
Radni takt motora je onaj u kome se prethodno sabijena (komprimovana) smeša u cilindru pali i širi. Smeša je, u stvari, ujednačena mešavina vazduha i benzina u odnosu 15,3 do 20 grama vazduha na 1 gram benzina. Smeša se priprema u karburatoru, onom delu opreme motora na čiju je upotrebu u svoje vreme ukazao Lenoar.

KARBURATOR I NJEGOVO USAVRŠAVANJE. Najjednostavniji karburator se sastoji od lončeta u kome se nalazi benzin čiji nivo treba da bude stalan. Kada se nivo benzina u lončetu spusti, spusti se i plovak koji povlači iglu, igla otvara cevčicu kroz koju protiče benzin u lonče sve dok se ne uspostavi raniji nivo. Iz lončeta vodi cev u suženje, tzv. grlo (difuzor) karburatora; na kraju cevi i u grlu postavljen je sisak; kroz cev protiče benzin do grla kroz koje struji i vazduh. Kada klip u cilindru krene naniže (takt usisavanja), u usisnoj cevi se stvara potpritisak (depresija) i vazduh se usisava. Vazduh prolazi pored siska, raspršava benzin i obrazuje smešu.

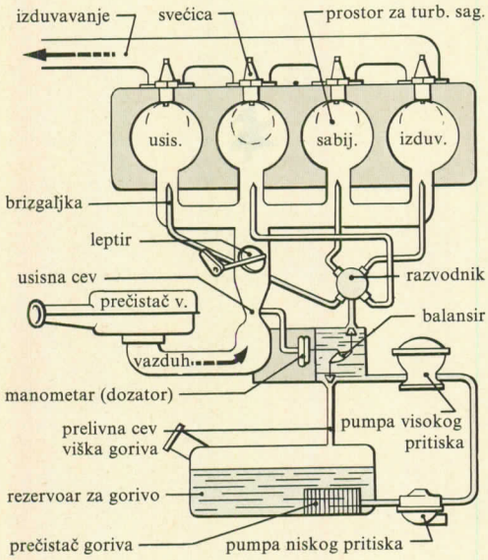
Ovakav karburator ne može da ostvari ispravnu smešu benzina i vazduha u zavisnosti od režima rada motora. Dovod vazduha zavisi najpre od kvadratnog korena vrednosti potpritiska. Kriva priticanja vazduha ima oblik paraboličnog luka. S druge strane, priticanje benzina proporcionalno je vrednosti depresije. Teorijski, njena promena može se predstaviti jednom pravom. Ove dve linije se seku u tački koja pokazuje trenutak ispravno dozirane smeše. Kada se kriva benzina nalazi ispod krive vazduha, smeša je suviše siromašna (ima previše vazduha), i obrnuto.



Napajanje gorivom karburatorskog motora sa unutrašnjim sagorevanjem.



Odnos benzina i vazduha kao funkcija potpritiska usisavanja.



Ubrizgavanje goriva kod motora sa unutrašnjim sagorevanjem.

Da bi se ovaj nedostatak otklonio, karburatoru se dodaju uređaji koji automatski uspostavljaju pravilno doziranje smeše. Ako je karburator podešen za slab potpritisak, tada se predviđa uređaj za dovod dopunskog vazduha (kompenzacioni sistem). koji osiromašuje smešu kad potpritisak raste. I obrnuto, ako je karburator podešen za visoki potpritisak, tada će pri manjem potpritisku smeša biti siromašnija, pa mu se zbog toga dodaje još jedan sisak koji će obogatiti smešu. Kod karburatora ponekad postoji i još jedan sisak, to je takozvani »potopljeni«; on se postavlja uvek nešto niže nego što je nivo benzina u lončetu. Potopljeni sisak radi istovremeno pod uticajem potpritiska i razlika nivoa; uticaj razlike nivoa je veći kada je potpritisak manji.

Postoje karburatori sa više grla (difuzora). Svako grlo stupa u dejstvo sukcesivno i preuzima na sebe jedan opseg režima rada. Na niskom režimu koristi se samo jedno usko grlo; u tom slučaju potpritisak je veliki. Na visokim režimima rada više grla služe istovremeno kao dovodni elementi, i tako se povećava protočni presek za prolaz smeše.

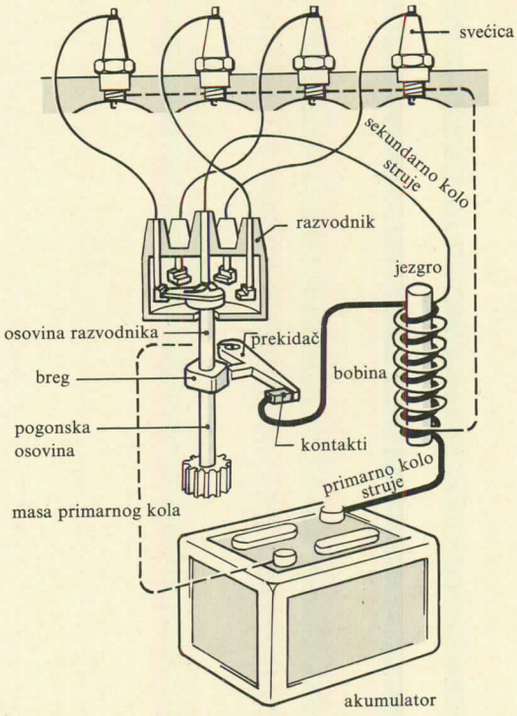
NEPOSREDNO I POSREDNO UBRIZGAVANJE GORIVA. I pored raznih usavršavanja, karburator predstavlja, u stvari, kompromisno rešenje; karburator nije u stanju da obezbedi tačno doziranje vazduha i benzina pri svakom režimu rada motora, niti može dobro da raspršri gorivo. Zbog toga su konstruktori došli na ideju da benzin ubrizgavaju u vazduh u trenutku paljenja smeše u cilindru, kao što je to slučaj kod dizel-motora. Potpritiskom u cilindru usisava se prečišćeni vazduh kroz grlo usisne cevi. Potpritisak dejstvuje i na dozator, koji dozira količinu ubrizganog goriva. Pumpa niskog pritiska potiskuje benzin iz rezervoara u pumpu visokog pritiska a ova u razvodnik. Razvodnik razvodi benzin sukcesivno u brizgaljke pojedinih cilindara. Višak goriva vraća se u rezervoar kroz prelivnu cev. Na ovaj način postiže se pravilno doziranje i raspršavanje goriva. Teškoće koje treba rešiti u sistemu ubrizgavanja goriva mehaničkog su karaktera. Pri svakom ubrizgavanju ubrizga se veoma mala količina goriva, i zato pumpa mora biti veoma precizna da bi mogla da obavlja ovu delikatnu funkciju. Izrada pumpe je skupa a njeno podešavanje veoma osetljivo.

Ova teškoća dolazi do izražaja naročito kada se ubrizgavanje vrši neposredno u cilindre, jer brizgaljke tada rade pod velikim pritiskom. Zbog toga se više pribegava rešenju da se gorivo doprema u usisnu cev, pri čemu se postiže stalni dovod goriva iz brizgaljki pod malim pritiskom. Ovaj sistem ubrizgavanja — *posredno ubrizgavanje* — primenjen je danas samo kod motora trkačkih automobila, ali postoji interes i kod nekih proizvođača (Pežo. Mercedes) da se uvede i kod serijskih automobila.

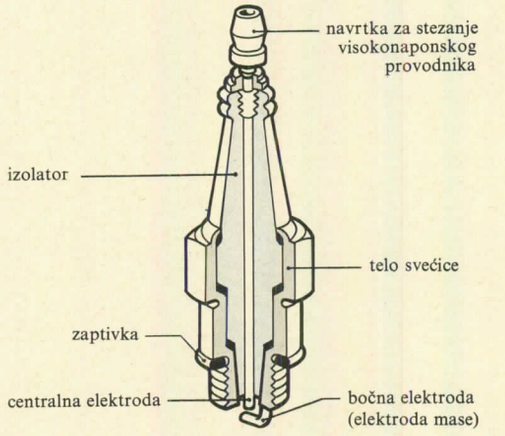
PALJENJE

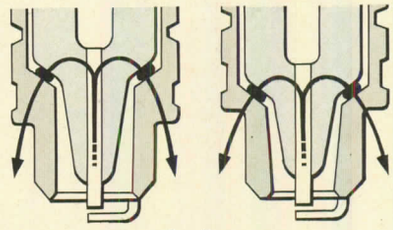
PRINCIP PALJENJA. Cilj uređaja za paljenje je da na kraju takta sabijanja upali smešu u komori za sagorevanje. Prvi uređaj za paljenje sastojao se od cevi koja je na jednom kraju bila zatvorena; na tom kraju je gorionik održavao cev u usijanom stanju; na drugom kraju cev je bila otvorena i ulazila u komoru za sagorevanje. Sveža smeša bi potisla sagorele gasove iz cevi, zatim ispunila cev i zapalila se u dodiru sa usijanim krajem cevi. Momenat paljenja je zavisio od položaja gorionika u cevi i od pritiska gasova, te je bio veoma neodređen.

Radovi Faradeja (Faraday) i Rumkorfa (Rumkorff) o indukovanoj struji omogućili su da se dođe do današnjih uređaja za paljenje: paljenje smeše obavlja električna struja koja izaziva varnicu između elektroda svećice. Ideju je dao Lenoar 1883, a postupak je kasnije usavršen primenom



Baterijsko paljenje





Svećice

Topla svećica — Hladna svećica

indukcionog kalema (bobine) sa vibratorom; prvi put je ovaj sistem paljenja primenjen kod motora Dionovog tricikla.

Francuz Andre Budvil (André Boudville) pronašao je 1900. godine magnet za paljenje visokog napona. Budvilov pronalazak je Boš (Bosch) 1902. iskoristio u proizvodnji svog »lučnog« uređaja za paljenje. Bošov sistem paljenja izgubio je primat tek 1925. godine kada je u primenu prodrlo *baterijsko paljenje*. Baterijsko paljenje je među prvima uvela američka kompanija Delko-Remi (Delco-Remy).

I jedan i drugi sistem paljenja (magnetsko i baterijsko paljenje) počivaju na istom principu. Električna struja niskog napona prolazi kroz kalem sa namotajem od debele izolovane žice, *primarno kolo*, i stvara magnetsko polje. Oko primarnog kola nalazi se drugi kalem od tanke izolovane žice sa više namotaja, *sekundarno kolo*. Sekundarno kolo se nalazi u magnetnom polju primarnog kola pod uticajem njegovih magnetskih sila sve dotle dok se ne prekine struja u primarnom kolu. Prekidanje struje vrši prekidač. Brza promena magnetnog fluksa izaziva u sekundarnom kolu indukovanu struju koja nastoji da se suprotstavi ovim promenama. Odnos napona u primarnom i sekundarnom kolu odgovara broju namotaja: broj namotaja u kalemu sekundarnog kola veći je nego u primarnom. Indukovana struja je struja visokog napona; ona izaziva varnicu između elektroda svećice.

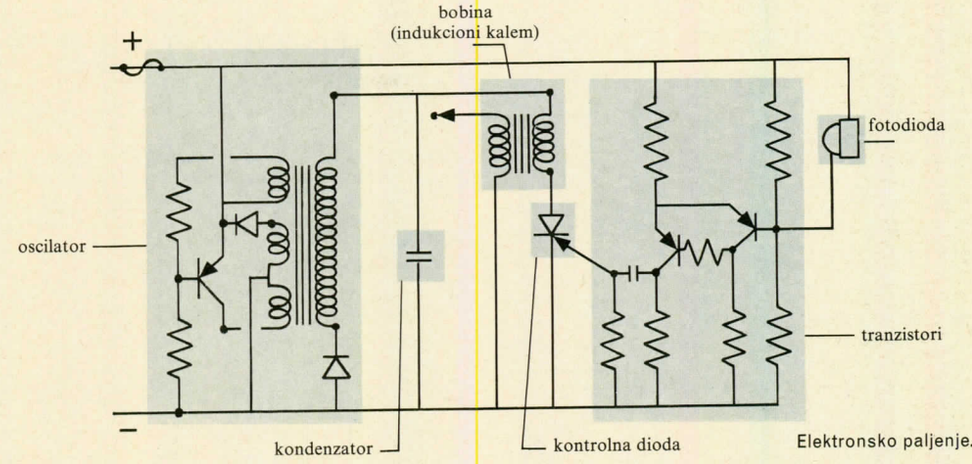
Svećica se sastoji od dve metalne elektrode koje su veoma dobro izolovane. Centralna elektroda je u izolatoru; ona dobija struju visokog napona iz sekundarnog kola bobine (indukcionog kalema). Elektroda mase, ili bočna elektroda, ugrađena je u telo svećice, koje je od čelika. Na telu svećice postoji navoj za uvrtanje u glavu cilindra, sa zaptivkom od bakra. Bočna elektroda je, dakle, u spoju sa masom motora; kada struja prođe kroz centralnu elektrodu, varnica kresne između obe elektrode i pali sabijenu smešu u cilindru. Za svaku svećicu karakteristična je njena toplotna vrednost koja označava veću ili manju sposobnost svećice da odvede primljenu toplotu pri sagorevanju smeše. *Topla svećica* odvodi polako toplotu jer je podnožje njenog izolatora prilično dugo. *Hladna svećica* ima kratko podnožje izolatora pa veoma brzo odvodi toplotu.

RAZVOJ PALJENJA. Stalno povećanje režima rada motora i radne zapremine cilindra zahtevalo je visoki stepen sabijanja smeše pre paljenja, pa logično da je moralo doći do izmena u samom sistemu paljenja.

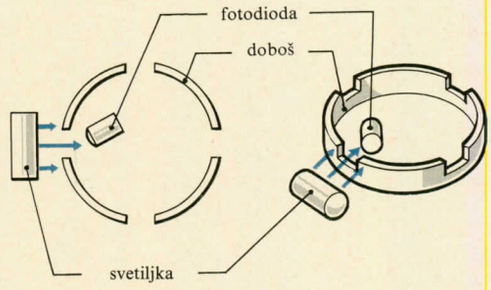
Dvojno paljenje. Sistem dvojnog paljenja primenjuje se u izuzetnim slučajevima; današnja izuzetna primena mogla bi u budućnosti da utre put opštoj primeni ovog sistema. Ako prostor za sagorevanje u glavi cilindra ima oblik polukugle, svećica se može smestiti skoro u sredini prostora za sagorevanje, pa čak i u samu sredinu ako se u glavi nalaze četiri ventila. Ovakav položaj predstavlja idealno rešenje za brzo širenje plamena. Međutim, takav raspored nije moguć kod »turbulentnih« prostora za sagorevanje; kod njih je svećica postavljena bočno, pa je dužina puta plamena skoro jednaka prečniku cilindra. Ukoliko je prečnik cilindra veći, širenje plamena je sporije; zbog toga se po cilindru ugrađuje još po jedna svećica i postavlja nasuprot prvoj, sa zadatkom da pali smešu na suprotnom kraju. Postupak je zanimljiv, ali je teško postići da obe varnice kresnu istovremeno, jer svaka svećica ima svoje strujno kolo.

Svećica. Zbog većih toplotnih naprezanja kojima je svećica izložena, dolazi do otvrdnjavanja svećice. Naime, posle svakog paljenja povećava se udeo toplote u svećici. Pogrešno je misliti da bi se rešenje moglo naći kraćim podnožjem svećice; na žalost, time bi se skratio i put odvoda struje do mase motora, a istovremeno smanjila bi se i sposobnost svećice da sagori nataložene materije (zauljenje svećice), pa bi izostalo paljenje, drugim rečima, svećica bi postala neupotrebljiva.

Svećica gubi svoja svojstva iz dva razloga. Na prvom mestu zbog *erozije elektroda*. Elektrode napadaju proizvodi sagorevanja, koji su korozivne prirode. Osim toga, i sama električna varnica na neki način razara elektrode. Korozija elektroda se javlja u momentu kad strujni napon izvora napajanja ima tendenciju da slabi pojavu varnice. Korozija zavisi od broja varnica po pređenom kilometru. Pored toga, na svećicama se talože naslage koje su provodnici struje. Pri sagorevanju, u prostoru za sagorevanje obrazuje se ugljenik, s druge strane,



Elektronsko paljenje.



Fotodioda

ulje i gorivo se pretvaraju u poluprovodnička hemijska jedinjenja. Svi ovi proizvodi se talože na svećici. Nataložene materije su uzrok smanjenju otpora izolatora svećice u odnosu na masu motora, utoliko pre kad je njen toplotni koeficijent suprotan toplotnim koeficijentima naslaga i taloga sagorevanja. Još do nedavno moglo se računati na sposobnost svećice da se sama čisti od naslaga. Danas, u uslovima nenormalnog saobraćaja, svećica je izgubila svojstvo samočišćenja. U gradskoj vožnji, sa usporenim hodom zbog zakrčenosti saobraćaja, opada temperatura u glavi cilindra. Samočišćenje svećice prestaje isto tako kad se na otvorenom putu ili autostradi vozi velikom brzinom, jer povećana temperatura u unutrašnjosti cilindarske glave deluje na nagomilane naslage za vreme usporenog hoda u gradskoj vožnji i pretvara ih u staklastu poluprovodničku materiju; debljina ove staklaste naslage je tolika da svećica nije u stanju da je potpuno sagori.

Dejstvo ovih dveju pojava na svećicu je suprotnog karaktera. Erozija elektroda zahteva sve veći napon struje da bi svećica mogla da ostvari varnicu a, s druge strane, sve veće naslage nataloženih materija smanjuju otpornost izolatora i dovode do pada napona na izvoru električne struje.

Stručnjaci nastoje da reše problem a da pri tome zadrže današnji sistem paljenja sa bobinom i prekidačem. Pronađeno je nekoliko različitih načina, ali ipak svi oni imaju jednu zajedničku crtu: spoljni izgled svećice je, u stvari, ostao nepromenjen, pa tehnički neupućeni zaključuju da u pogledu usavršavanja svećice nije postignut nikakav uspeh. Među raznim novim rešenjima treba pomenuti sledeća. Kod Lodža (Lodge) je u izolatoru ugrađen visokofrekventni pretvarač, koji se sastoji od malog valjkastog kondenzatora od specijalnog keramičkog materijala spojenog sa metalnim kapicama koje formiraju varničar i omogućuju da varnica kresne kad napon na krajevima kondenzatora dostigne 4 kV. Otpor elektroda na zauljavanje je četiri puta veći nego kod klasičnih svećica. Osim toga, varnica prelazi dva intervala u seriji, jedan odvaja bočnu elektrodu (mase) od izolatora, a drugi centralnu elektrodu od izolatora. Uvođenjem čvrstog izolirajućeg materijala između elektroda smanjuje se otpor varničenja i osetljivost svećice na pritisak, pa je moguć znatniji razmak elektroda. Glava centralne elektrode velikog prečnika i raspored bočnih elektroda (elektroda mase) obezbeđuju njihovo funkcionisanje pri niskom naponu, tako da erozija nastaje ispod vrha. Habanje elektroda se praktično smanjuje i ne utiče na promenu napona prekidača. Kad se centralna elektroda pohaba, samo se proširi razmak između svećice i izolatora, ali se rastojanje bočne elektrode od izolatora ne menja. Baš ovo rastojanje između bočnih elektroda izaziva znatno povećanje napona: ako se razmak poveća za 0,3 mm (od 0,6 na 0,9), dobija se povećanje napona od 4 kV; međutim, ako se isto toliko poveća rastojanje centralne elektrode od izolatora, dobiće se povećanje napona od samo 1,5 kV.

Kod A.C svećica pošlo se od tehnološkog postupka: izolator je od 92% aluminijum-oksida (velike električne otpornosti i visoke toplotne provodljivosti); oblik izolatora je posebno proučavan da bi se dobio veći napon pri kratkom spoju u svećici, a podnožje »Amplithermie« sa veoma tankim zidovima od keramike podešeno je tako da tačno prati promene temperatura koje se dešavaju u prostoru za sagorevanje.

Koriste se i legure na bazi retkih metala (isovolt za A.C, platina za Bošove svećice i svećice KLG i Eyquem) za izradu centralne elektrode. Elektrode od pomenutih legura su otporne na habanje i na zauljavanje. Maršal (Marchal) takođe koristi plemenite metale (nikl, mangan), ali naročitu pažnju obraća ne samo strukturi izolatora koja mora biti veoma fina i, prema tome, veoma otporna na prodor gasova kroz sitnozrnastu strukturu, već i na samu proizvodnju tela svećice, koja se dobija hladnim kovanjem u kalupu. Izolator je od aluminijum-oksida tačno odmerene sadržine kako bi se dobila ravnoteža veće toplotne provodljivosti. (Hladna svećica lakše se prlja i manje je provodljivosti, topla svećica može izazvati samopaljenje).

Svećica je tipičan primer velikih dostignuća koje je teško sagledati samo površnim posmatranjem.

Elektronski sistem paljenja. Prekidač baterijskog paljenja (sistem akumulator-bobina), zbog sopstvene inercije, ne može besprekorno da sledi ritam rada koji zahtevaju visoki brojevi obrtaja savremenog motora. To je samo jedan od razloga što se težilo i teži da se usavrši mehanizam za paljenje.

Dobijanje naizmenične struje visokog napona zasniva se na mogućnosti da se jednosmerna struja niskog napona koja prolazi kroz primarni namotaj bobine, tako reći, isecka na deliće. Oko primarnog namotaja nalazi se drugi namotaj, tzv. sekundar, od tanje žice i većeg broja namotaja. Svaki put kada prekidač prekine struju u primaru, u sekundaru se pobuđuje indukovana struja visokog napona. Odnos između napona u primarnom i napona u sekundarnom kolu jednak je odnosu namotaja u jednom i drugom kalemu. Ako, na primer, primarno kolo ima 100 namotaja kroz koje prolazi struja od 6 V, a sekundarno kolo 10 000 namotaja, tj. $\frac{10\,000}{100} = 100$ puta

više namotaja, indukovana struja u sekundarnom kolu biće:

$$6 \times 100 = 600 \text{ V}.$$

Pri usporenom hodu jačina primarne struje je oko 3 A pod uslovom da se prekidač otvara veoma brzo, a najveći napon struje koja nastaje u primarnom kolu samoindukcijom je 200 V. Napon od 200 V u primaru odgovara u sekundarnom kolu bobine indukovanoj struji od 20 000 V pod pretpostavkom da je odnos namotaja 100 prema 1. Napon od 10 000 V je dovoljan da preskoči varnica između elektroda svećice. Višak napona se koristi za naknadu eventualnih gubitaka napona u starim ili zaprljanim svećicama. Međutim, prekidač se ne ponaša uvek pravilno. Najpre iz mehaničkih razloga gornja granica prekidanja je ograničena na 400 u sekundi. Prekidi su u vezi sa režimom rada motora. Na gornjoj granici, prekidač motora sa četiri cilindra može se obrtati sa 12 000 o/min a V-motora sa osam cilindara sa 6 000 o/min. Prema tome, povećanje režima ne predstavlja neku ozbiljnu smetnju dobrom funkcionisanju prekidača.

Drugi su uzroci koji predstavljaju smetnje u radu prekidača. Na prvom mestu to su: zagrevanje kontakata prekidača pri prolazu veoma jake primarne struje. Usled zagrevanja na kontaktima se obrazuje veoma tanak sloj metalnog oksida, koji predstavlja izolator na površini prekidača; habanje kontakta i njihova deformacija dovode do povećanog zagrevanja i do stvaranja mostova ili lukova koji sprečavaju potpuni prekid u trenutku kada se kontakti međusobno razmaknu; nepotpuni prekid ima za posledicu promenu napona u sekundarnom strujnom kolu; nepravilan zazor i habanje samog mehanizma prouzrokuju nepravilan rad kontakata itd.

Ovi nedostaci prekidača mogu se otkloniti ako se u sistemu paljenja uvedu poluprovodnici.

Tranzistor dopušta prolaz struje bez posredstva neke mehaničke komande; za njegov rad dovoljna je slaba komandna struja, tzv. *upravljačka struja*. Ima tranzistora koji mogu da regulišu protok struje od 15 A i napona od 100 V, pod uslovom da im se kao zaštita doda Cenerova dioda, koja će se paralelno postaviti da bi se napon na tranzistoru ograničio na oko 80 V. Ako se primeni tranzistorski sistem paljenja, nije teško zamisliti bobinu koja će imati odnos pretvaranja od 400 prema 1; ovakav odnos omogućava da se odmah u početku dobije veoma visok napon paljenja. Dovoljno je imati primarnu struju od oko 7 A, koja će, smanjivši otpor bobine, mnogo brže povećati struju u sekundaru. I, na kraju, indukciono polje u primarnom kolu postiže se u vremenu od nekoliko hiljaditih delova sekunde, a održava svoju punu vrednost i kod visokih režima rada.

Danas postoje dve vrste uređaja za električno paljenje; razlikuju se po dovodu impulsne struje za tranzistor. Prekidač paljenja ostaje i dalje u uređaju, ali sada dobija struju od tranzistora; primajući komandu od tranzistora, prekidač radi u mnogo povoljnijim uslovima pa je i njegov vek trajanja osetno duži nego kod prekidača klasičnog uređaja; prekidač i dalje radi mehanički, ali su pokreti daleko blaži. Uređaj je pokretan i može se naknadno montirati na svaki postojeći motor. preko oscilatora sa transformatorom. Oscilator pretpostavlja da se prekidač potpuno odbaci i da se komandna struja za tranzistor dobije iz nekog generatora impulsa. Pri elektronskom paljenju postoji kondenzator koji se puni strujom od 200 V preko oscilatora sa transformatorom. Oscilator pretvara jednosmernu struju od 12 V u naizmeničnu struju. Naizmenična struja se transformiše na 200 V, ispravlja se i puni kondenzator, koji se prazni u naročitu bobinu sa zatvorenim magnetskim kolom i slabim primarnim kolom. Pražnjenje se reguliše preko kontrolne diode koja prima signal od fotodiode. Fotodioda se nalazi u svetlosnom prekidaču koji zamenjuje klasični prekidač. Pošto je signal slab za deblokiranje, pojačava se preko dva tranzistorska pojačivačka stepena. Fotodioda se nalazi u dobošu koji ima proreze. Ovi prorezi preuzimaju ulogu brega kod prekidača. Lampica stalno osvetljava doboš. Kada se prorez u dobošu pojavi pred lampom, svetlosni zrak deluje na fotodiodu u dobošu; dalji postupak paljenja teče na uobičajeni način.

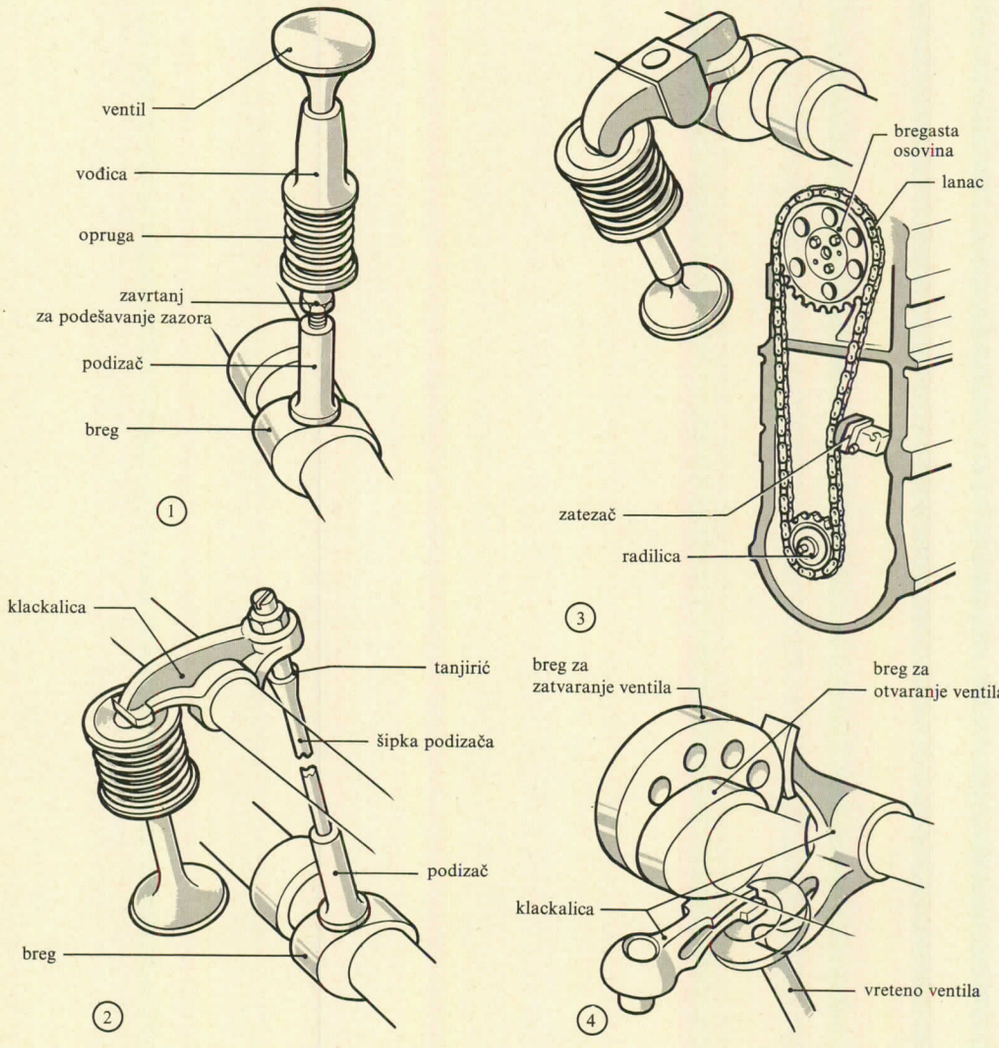
Alternator i dinamo. Za elektronsko paljenje neophodno je dobro provetravanje, jer svaki tranzistor u toku svog rada oslobađa izvesnu količinu toplote. Osim toga, tranzistor mnogo slabije radi ako se ne održava u određenim granicama toplote. I potrošnja električne struje je velika. Klasični dinamo koji služi i za punjenje akumulatora ne zadovoljava u sistemu elektronskog paljenja.

Problem generatora električne struje nije još konačno rešen. Postoje za to dva glavna razloga: prvo, uslovi rada generatora stalno se menjaju u sve intenzivnijem saobraćaju u kome vožnja sa minimalnim brojem obrtaja motora postaje sve duža i češća; drugo, na savremenom automobilu ima mnogo instrumenata i uređaja koji koriste struju iz akumulatora. Zbog toga je nekadašnji magnet za paljenje, koji je, u stvari, bio nezavisni generator za proizvodnju struje visokog napona za potrebe paljenja, morao ustupiti mesto sistemu akumulator-bobina. Do ove promene moralo je doći čim se umesto zastarelog ručnog stavljanja motora u pokret (startovanje) uvelo pokretanje motora pomoću električnog pokretača (elektrostartera). Odmah je bilo jasno da akumulatoru treba nadoknaditi struju koju potroši, i to stalnim ponovnim punjenjem. Tu ulogu preuzeo je dinamo.

Dinamo dobija pogon sa radilice motora i proizvodi jednosmernu struju. Sastoji se od nepokretnog dela (statora) — magneta — koji stvara magnetno polje. U magnetnom polju okreće se indukovani deo, jezgro od metala oko koga je namotana žica koja provodi struju (rotor). Obrtanje rotora u magnetnom polju (kada je namotaj zatvoren) proizvodi električnu struju, čija jačina varira u zavisnosti od položaja rotora prema statoru. Ova struja je takozvana »indukovana struja«. Na dinamu se nalazi i skupljač (kolektor) struje po kome klize četkice i skupljaju indukovanu struju.

Napon na izvodima dinama, od koga zavisi vrednost struje, stalno se menja. Stoga se ugrađuje tzv. regulator induktorskog fluksa; u strujno kolo pobude ugrađuje se, naime, otpornik, koji automatski održava stalan napon u induktorima. Ako se elektromagnetski rele napaja strujom sa naponom aparata, dobija se *regulator napona* koji može biti jednostepen ili dvostepen. Ako se napaja ukupnom strujom, onda je to *strujni regulator*. Obično se ova dva regulatora spoje u jedan uređaj. Osim toga, ugrađuje se jedan *automatski prekidač* koji prekida strujno kolo kada je elektromotorna sila dinama manja od elektromotorne sile akumulatora.

Jačina struje koju proizvodi dinamo zavisi od broja obrtaja i od odnosa broja obrtaja dinama i broja obrtaja radilice motora. Ovaj odnos je srazmeran broju obrtaja motora. Kod savremenih motora režimi rada su sve veći, stoga se morala povećati i granica najmanje upotrebne brzine. Kada je maksimalni broj obrtaja bio 5 000 o/min, mini-



Razvodni mehanizmi ventila:
1. Bočni (stojeći) ventil; 2. Ventil u glavi cilindra; 3. Ventil sa bregastom osovinom u glavi; 4. Dezmodromski razvodni mehanizam.

malni je mogao biti 1.400 o/min, razlika je, dakle, bila 3.600 o/min. Pošto savremeni motori dosežu maks. brojeve obrtaja i 8.500 o/min, minimalni broj obrtaja ne može biti ispod 2.400 o/min. Mada se opseg obrtaja promenio od 3.600 o/min na 6.100 o/min, najmanji upotrebljivi broj obrtaja nije dovoljan da dinamo puni akumulator pri minimalnom broju obrtaja motora.

Alternator koji se danas primenjuje za motore umesto dinama radi na istom principu sa razlikom što je indukt nepokretan a induktor se okreće. Pošto su priključci generatora nepomični, nisu potrebne četkice koje bi klizile preko kolektora kao kod dinama. Struja koju alternator proizvodi je naizmenična, stoga je treba ispraviti. Pretvaranje u jednosmernu struju obavlja se poluprovodnicima (diode), koji propuštaju struju samo u jednom smeru, od alternatora prema akumulatoru. Pošto se struja ne može vratiti u suprotnom smeru, tj. od akumulatora u alternator, nije potreban ni prekidač. Struja pobude prolazi kroz prstene preko kojih klize ugljene četkice. Ova struja je u velikoj meri konstantna, a jačina joj je otprilike deset puta manja od struje koja prolazi kroz četkice dinama.

Za alternator je potreban samo regulator napona. Strujno ograničenje ostvaruje se u funkciji reakcije indukta. Namotaji generatora imaju impedancu čija je vrednost srazmerna učestanosti struje koja prolazi kroz namotaje i zavisi od brzine obrtanja alternatora. Baš ove promene vrednosti impedance obezbeđuju automatsko regulisanje struje. Regulator napona može imati i dva tranzistora: jedan koji po potrebi smanjuje dovod struje iz alternatora i drugi koji smanjuje potrebnu energiju za tranzistor. Regulatoru se dodaje Cenerova dioda i temperaturni kompenzator (Maršalov alternator SEV-Motorola). Može se primeniti takođe i jedan jednostavni mehanizam u kome dva kontakta ostvaruju ili uklanjaju otpor u strujnom kolu pobude alternatora.

Prednost alternatora je u tome što može da proizvodi dovoljno jaku struju (10 do 12 A) i pri malom broju obrtaja motora (1.000 do 1.200 o/min). Pošto je maksimalni broj obrtaja upotrebe veoma visok (oko 10.000 do 12.000 o/min), nije teško predvideti odnos broja obrtaja motora i alternatora, pa tako obezbediti punjenje akumulatora već i pri veoma niskom režimu rada motora (400 do 500 o/min). Osim toga, alternator je lakši i zauzima manje prostora nego dinamo, a to je važna osobina jer je prostor u automobilu veoma ograničen.

RAZVOJ MOTORA

Za razvoj savremenog motora karakterističan je sistematski istraživački rad u cilju postizanja maksimalne snage motora, ali bez izrazitog povećanja radne zapremine, pošto ekonomski razlozi prisiljavaju proizvođače da proizvode motore male i srednje radne zapremine.

Mada je radna zapremina retko ispod 800 cm^3, obično ne prelazi 2000 cm^3, bar ne u Evropi, dok Amerika ostaje verna osetno većoj zapremini. Poreski organi, kao i osiguravajuća društva, ne uzimaju u obzir stvarnu snagu motora već takozvanu *fiskalnu snagu* (poresku snagu); sam ovaj naziv nije najpogodniji: naime, radna zapremina predstavlja glavni član formule kojom se izračunava ova posebna snaga; ova formula nema, u stvari, nikakve analogije sa formulom na osnovu koje se određuje stvarna snaga.

Osim toga, i gorivo je relativno skupo, naročito ako se koristi »super« benzin, tj benzin sa visokim oktanskim brojem, a »super« se mora koristiti čim stepen sabijanja (stepen kompresije) dostigne vrednost pri kojoj nastaje detonacija. Iz ovih razloga proizvode se uglavnom motori sa relativno malom radnom zapreminom. Pošto kupce ne zadovoljava automobil koji ima ograničene performanse, došlo se do takozvanog »forsiranog« motora sa svim njegovim dobrim stranama, ali i obavezama, od kojih svakako najmanju predstavlja potreba česte promene stepena prenosa. Naime, sposobnost motora da razvije širok opseg režima rada pri istom prenosnom odnosu nije u skladu sa karakterističnom, vrlo strmom krivom snage.

Veća specifična snaga može se dobiti povećanjem broja obrtaja motora ili stepena sabijanja. Poslednjih godina konstruktori su pošli ovim putem i uspelo im je, u nekim slučajevima, da kod serijskih motora dobijaju specifičnu snagu (snagu po litru radne zapremine cilindra) od 50 KS/l; pre dvadesetak godina tolika specifična snaga smatrala se privilegijom trkačkih modela. Povećanje specifične snage predstavlja stvarni napredak u razvoju motora, ali su se istovremeno pooštrili i uslovi primene. S druge strane, od pre izvesnog vremena mogla se uočiti tendencija u suprotnom pravcu, povećanje radne zapremine bez, sa tehničke tačke gledišta posmatrano, nekih poboljšanja performansi motora.

POVEĆANJE BRZOHODNOSTI. Sistematskim proučavanjem iskustava u eksploataciji sa brzohodim motorima i motorima sa većim stepenom sabijanja došlo se do strukturnih izmena u motoru. Veliki broj obrtaja zahteva da se sve veća pažnja posveti silama inercije koje napadaju pokretne delove motora, a naročito one koji se kreću naizmenično pravolinijski. Velika brzohodnost motora ne može se postići bez izvesnog rizika, osim ako se klipni mehanizam, tj. klip-klipnjača (koji se kreće naizmenično) učini što lakšim, dakle, ako se kao materijal za njegovu izradu upotrebe lake legure velike otpornosti, na primer, na bazi aluminijuma. Sile inercije koje izaziva kretanje klipa i klipnjače srazmerne su, s jedne strane, kvadratu brzohodnosti a, s druge strane, težini ovog mehanizma. Ako se poveća brzohodnost, treba, dakle, smanjiti težinu.

Razvodni mehanizam. Uticaj inercijalnih sila je znatan i kod razvodnog mehanizma. Prilikom otvaranja i zatvaranja ventila pojavljuje se, takođe, izvesno dejstvo inercije; bez inercije nije ni uređaj koji upravlja radom ventila, naročito kad se ventil vraća na svoje sedište. Kad su bočni ventili zamenjeni visećim ventilima u glavi cilindra, cilj je, u stvari, bio da se poboljša oblik cilindarske glave; tendencija je bila da se prostor za sagorevanje što više približi obliku polukugle kako bi se postiglo što veće toplotno iskorišćenje. Vrlo brzo su se pokazale dobre strane ovog rešenja; međutim, nedostaci su se pojavili tek posle dužeg vremena. Za razvod ventila u glavi potrebna je bočna bregasta osovina, podizač ventila sa bregom koji ga podiže i klackalica koja dejstvuje na vreteno ventila i tako ga otvara. Zatvaranje ventila vrši se oprugom. Svi ovi elementi izloženi su dejstvu sila inercije; sile inercije rastu sa povećanjem brzohodnosti. Očigledno je da svi ovi elementi moraju biti lakši, i to su konstruktori uradili, a zatim su skratili podizače ventila ili su njihove šipke izradili od duraluminijuma. Skraćivanje podizača je postignuto najpre postavljanjem bregaste osovine iznad kućice motora, a zatim neposredno iznad glave cilindra, i tako se pojednostavio razvod ventila. Novinu usavršavanja motora ne predstavlja postavka bregaste osovine u glavu (takav raspored se već pedeset godina nalazi u primeni kod trkačkih motora) već prilagođavanje ovog rešenja za motore serijske proizvodnje. Smatra se da je ovako rešenje skupo; međutim, ne bi trebalo da bude skuplje od ma kog drugog rešenja; pored veće preciznosti u radu, ovim rešenjem se postiže jednostavnije podešavanje: kada se, na primer, demontira glava cilindra, nije potrebno ponovo podešavati odnos radilica-razvodni uređaj.

Ostaje, međutim, problem kako smestiti bregastu osovinu u glavu. Moguća su tri rešenja. Prvo rešenje, da se postavi spreg zupčanika sa pravim zupcima, nije praktično, pa ni stepen korisnosti takvog rešenja nije naročit; osim toga, problem buke ostaje i dalje nerešen. Drugo rešenje, sa lancem koji pokreće radilica, zanimljivo je, ali je skopčano sa izvesnim teškoćama pri podešavanju a osim toga, potreban je i zatezač; ipak, ovo rešenje našlo je u praksi najširu primenu. Kod trećeg rešenja, umesto lanca primenjuje se nazubljeni gumeni kaiš pojačan čeličnom žicom, kaiš je izvan bloka, dovoljno je gibak, ali se ipak ne ističe. Izgleda da je ovo rešenje najpovoljnije, ali se nerado primenjuje u Evropi, dok se u Sjedinjenim Državama sreće kod trkačkih motora.

Čak i sa bregastom osovinom u glavi problem nije u potpunosti rešen. Treba obezbediti kontinuitet rada razvodnog sistema i odstraniti šumove koji se pojavljuju na oprugama pri višim brojevima obrtaja. Zahteve koji se postavljaju ovim oprugama skoro je nemoguće ostvariti: opruga mora posedovati veliku krutost i ne sme imati veliku zapreminu ni veliku frekvenciju; međutim, frekvencija je utoliko veća ukoliko je veća krutost opruge. Zbog ovih protivrečnih zahteva ne može se od opruge očekivati da odgovori svakom režimu rada motora. Jedino rešenje predstavlja dezmodromski razvod koji stalno komanduje ventilom, kako pri otvaranju tako i pri zatvaranju. Nije reč o nekom novom sistemu: još pre prvog svetskog rata ovo rešenje je primenjeno na motoru balo (Ballot). Međutim, nade koje su polagane u ovo rešenje nisu se odmah ostvarile; tek kad ga je Mercedes primenio na svom trkačkom motoru, ono je ponovno privuklo pažnju stručnih krugova. Dezmodromski razvod omogućava mnogo brže podizanje ventila, odnosno pri istom podizanju znatno veći protok gasova, dok je kod klasičnog sistema razvoda profil brega zaobljen, kako bi se ventil mogao postupno otvarati. Dezmodromski razvod predstavlja, svakako, savršeniji sistem za motore visoke specifične snage.

Povećanje snage motora zahteva proučavanje i istraživanje problema punjenja cilindra. Osnovni problem nije teorijski kapacitet cilindra već količina smeše koja se može usisati za vreme takta usisavanja. Ova količina zavisi od nekoliko činilaca, na prvom mestu od režima rada, zatim od međusobnog položaja elemenata u sistemu razvoda, oblika i dužine usisnih cevi. Iskustvo je pokazalo da se pravilno rešenje mora potražiti u međusobnom usklađivanju usisnih elemenata, kao što je to, na primer, ostvareno sa cevima kod orgulja. Pravilnim usklađivanjem postiže se poboljšanje koje može da premaši 10%. Međutim, takvo rešenje se ne može uvek ostvariti u serijskoj proizvodnji. Fabrička obrada delova predstavlja veliku teškoću. Stoga proizvođači nastoje da izliju što kompaktnije blokove motora, a usisne kanale da postave u glavu cilindra. Pri tome se pretpostavlja da su kanali tako proračunati da mogu besprekorno da rade na određenim režimima. Međutim, svako naknadno doterivanje je veoma teško s obzirom na to da su preseci veoma precizno sračunati; ako se ukaže potreba za naknadnim bušenjem, ovo se mora obavljati veoma oprezno. U slučaju greške u proračunu punjenja, treba preraditi kalupe, što u velikoserijskoj proizvodnji predstavlja uvek ozbiljnu smetnju.

Povećanje snage skopčano je sa još jednim ograničenjem. Povećanje neposredno utiče na brzinu kretanja klipa. Brzina klipa ne sme da pređe granicu iznad koje nastaju naprezanja koja ugrožavaju mehaničku sigurnost i vek trajanja motora. Kod trkačkog motora mogu se proračunati dimenzije klipa i klipnjače i pri tom odrediti neki koeficijenat sigurnosti. Međutim, bespredmetno je upoređivati vek trajanja elemenata motora trkačkog automobila sa vekom trajanja koji se postavlja serijskom motoru. Kod serijskih motora jedini način da klip ne pređe gornju granicu brzine je da se skrati njegov hod. Do nedavno klipovi su imali veliki hod; smatralo se, naime, da je širenje gasova — — jedini radni takt u ciklusu — efikasnije ako traje što duže. Savremeni motori, naprotiv, imaju kratak hod klipa. Od »kvadratnog« tipa motora čiji je prečnik klipa iste veličine kao i hod prešlo se na »superkvadratni« tip kod koga je hod kraći od prečnika. Drugim rečima, ono što se izgubilo u dužini dobilo se u površini.

Veći prečnik klipa znači povećanje rastojanja između osa cilindara. Stručnjaci su brzo uočili dobre strane

koje im pruža ovo povećanje prečnika. Svakim povećanjem prečnika klipa povećava se i njegova površina, dakle, povećavaju se i sile koje deluju na klip, a njihovo dejstvo može dostići i nekoliko tona. Ovu silu moraju da prime ležišta koja su sem toga izložena naprezanjima i drugih sila na klipu, a koja su utoliko veća ukoliko je režim rada motora viši. Savremeni motori sa četiri cilindra imaju radilicu sa pet ležišta, dok je nekad radilica bila oslonjena samo na tri ležišta, koja su teško podnosila naprezanja pri visokim režimima rada motora.

POVEĆANJE STEPENA SABIJANJA I DETONACIJA. Povećanje stepena sabijanja utiče i na stepen punjenja radne zapremine cilindra. Visok stepen sabijanja omogućava visoku specifičnu snagu motora, dok, s druge strane, u pogledu pojave detonacije predstavlja veliki nedostatak. Čim se poveća stepen sabijanja, odmah se javljaju teškoće; ovakva promena funkcije neminovno utiče na strukturu sastavnih delova motora.

Ako nisu predviđene posebne predostrožnosti, povećanje stepena sabijanja može imati dve negativne pojave: detonaciju i samopaljenje.

Detonacija, je, u stvari, nepravilno sagorevanje, koje nastaje ako se sagorevanje ubrza, a ponekad i spontano. Detonacija izaziva porast pritiska na kraju takta sabijanja. Detonacija se karakteriše udarom; u stvari, udar je posledica naglog povećanja pritiska pri brzom sagorevanju.

Samopaljenje i detonacija su dve različite pojave mada im je poreklo skoro isto. Samopaljenje nastaje usled naglog povećanja temperature pri brzom porastu pritiska. Ako u motoru već postoje »topla mesta« ili ako motor ima tendenciju da se greje, to utiče na temperaturu na kraju takta sabijanja, pa se smeša pali pre nego što kresne varnica. To je, u stvari, samopaljenje.

Obe ove pojave zavise delimično od oktanskog broja goriva. Ukoliko je oktanski broj veći, utoliko se ove pojave dešavaju znatno kasnije. Zbog toga se pojava goriva sa većim oktanskim brojem, nego što ga ima obični benzin, može smatrati napretkom. Međutim, i za benzin kvaliteta »super« postoji izvesna granica. Pravo rešenje nije, dakle, u oktanskom broju; to je samo privremeno rešenje. Samopaljenje i detonacija mogu se otkloniti ako se smanji temperatura smeše i ako joj se omogući dovoljno vrtloženje. Što se tiče prvog uslova — temperature — tu nema velikih nada: da bi benzin dobro isparavao, smeša mora imati temperaturu od najmanje 55° do 60°C.

Jedino praktično sredstvo protiv detonacije i samopaljenja je vrtloženje smeše pre eksplozije. Obično se prostoru za sagorevanje u glavi cilindra daje takav oblik koji će omogućiti vrtloženje; ventili jedan pokraj drugog i »bočni« prostor za sagorevanje glavna su obeležja glave cilindra podešena za bolje vrtloženje. Ovi oblici se nalaze samo kod motora putničkih automobila kod kojih je važnije obezbediti pouzdanost nego maksimalnu specifičnu snagu. Međutim, van svake sumnje, da je za postizanje maksimalne specifične snage najpogodniji poluloptasti oblik prostora za sagorevanje. Ali pošto ovaj oblik nije podesan za vrtloženje i pošto je povećanje pritiska veoma veliko, ostaje i dalje, kao nužno zlo, da se koriste specijalna visokooktanska goriva.

Prenosni mehanizmi

Kao i kod ranijih automobila, i danas se sistem prenosa sastoji od: 1. *spojnice* koja omogućava da se, kad god je to potrebno, prekine prenos snage motora na ostale prenosnike, 2. *menjača* kojim se, raznim kombinacijama zupčanika, može izabrati stepen prenosa koji najbolje odgovara brzini kretanja vozila i promeni uslova opterećenja motora, 3. *prenosnog vratila* (kardanskog vratila) i 4. *pogonskog mosta*. Most se sastoji od sprege konusnih zupčanika (glavni prenosnik) određenog prenosnog odnosa (za razliku od promenljivih prenosnih odnosa u menjaču) i od diferencijalnog prenosnika koji omogućava da se, u krivini ili pri zaokretu vozila, njegovi pogonski točkovi ne okreću istom brzinom.

U ovoj oblasti nije zabeležen neki naročiti napredak; poboljšanja se svode uglavnom na veće ili manje olakšice rukovanja raznim organima prenosnog mehanizma; najviše je urađeno na poboljšanju spojnice i menjača. Razvojni rad u oblasti prenosnih mehanizama obećavao je u početku mnogo; međutim, uskoro je došlo do izrazitog zastoja. Danas se ponovo može konstatovati izvesno obnavljanje istraživanja, pa treba očekivati da će doći do praktične primene novih dostignuća i kod serijskih automobila srednje klase.

SPOJNICA

Spojnica služi za odvajanje radilice motora od spojničke osovine menjača i za postepeno uključivanje ove dve osovine pri svakoj promeni stepena prenosa u menjaču.

MEHANIČKA SPOJNICA. Shematski predstavljena, mehanička spojnica se sastoji od jednog vodećeg organa (konusa i ploče) na radilici motora i jednog vođenog organa spregnutog sa prenosnim vratilom. Kada se ova dva organa uključe, opruge ih održavaju u spoju. Kad se potisne pedala spojnice, elementi spojnice se međusobno odvajaju, pa se obrtno kretanje radilice ne prenosi na točkove. Pritisak na pedalu je potreban kod svake promene stepena prenosa u menjaču, kao i na polasku vozila iz mesta.

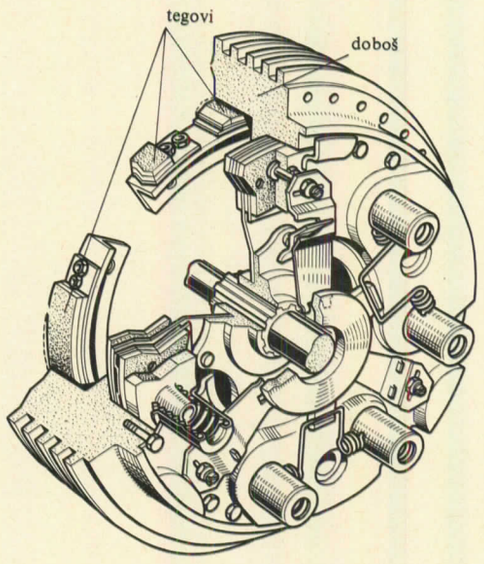
AUTOMATSKA SPOJNICA. Automatsko uključivanje i isključivanje spojnice može se izvesti na razne načine.

Centrifugalni sistem. Prvo rešenje je, u stvari, kompromisno rešenje. Centrifugalna spojnica sastoji se od segmenata frikcionih tegova na glavčini spregnutoj sa radilicom motora. Usled obrtanja, centrifugalna sila nastoji da razmakne tegove i da ih dovede u spoj sa dobošom na prenosnom vratilu. Kad vozilo miruje ili se kreće minimalnim brojem obrtaja motora (praznim hodom), broj obrtaja glavčine nije dovoljan da omogući spoj između tegova i doboša. Povećanjem broja obrtaja radilice raste i dejstvo centrifugalne sile, te posle određenog režima (obično 700 o/min) tegovi se trenjem o doboš spajaju sa njim tako čvrsto da se tada na doboš prenosi kretanje glavčine. Ova spojnica se ne može automatski isključiti. Kada vozač želi da promeni stepen prenosa, mora da isključi spojnicu na uobičajeni način.

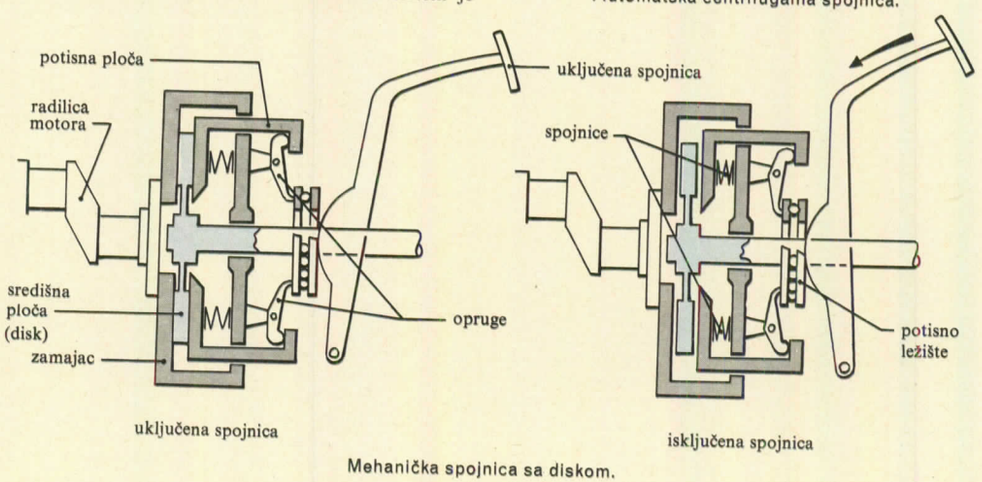
Kombinacija centrifugalnog i elektromagnetnog sistema. Spojnica gravina je, u stvari, kombinacija dva komandna sistema. Prvi komandni sistem je centrifugalna spojnica sa tegovima, koja automatski isključuje kad motor radi sa minimalnim brojem obrtaja, kada se vozilo zaustavi i pri kraju kočenja. Ona uključuje čim se pritisne pedala akceleratora (gasa). Druga komanda pruža mogućnost vozaču da menja stepene prenosa a da pri tom ne mora da isključuje spojnicu. Prekidač ugrađen u ručici menjača uključuje elektromagnet čim se ručica aktivira, to zaustavlja tegove i spojnica se isključuje. Po izvršenoj promeni stepena prenosa, tegovi počinju ponovo da se okreću i spojnica se automatski uključuje.

Manumatic spojnica se uključuje postupnim dejstvom centrifugalnih masa, koje se okreću istom brzinom kojim se okreće radilica motora. Za isključivanje spojnice služi sistem poluga na koji dejstvuje potpritisak u motoru; potpritisak deluje na membranu spregnutu sa viljuškom za isključivanje. Od ovog uređaja postoji nekoliko varijanti, među kojim varijante njutondrajv (Newtondrive) i saksomat (Saxomat), izvođenje Fihtel (Fichtel) i Saks (Sachs). Kod ovih spojnica uključivanje na polasku vrši se pomoću centrifugalne spojnice sa papučom.

Elektromagnetski sistem. Postoji veliki broj elektromagnetskih spojnica. Kod spojnice ferlek (Ferlec) kompanije Ferodo (Ferrodo) elektromagnet priključen na dinamo aktivira vođeni disk. Kada se dinamo okreće na praznom hodu motora, pritisak na disku je mali, pa se spojnica isključuje. U trenutku kada vozač pokretom ručice menjača menja stepen prenosa prekida se struja u elektromagnetu i spojnica se ponovo isključi. Isti princip je primenjen kod spojnice simkamatik (Simcamatic) firme Simka.



Automatska centrifugalna spojnica.



Mehanička spojnica sa diskom.

Elektromagnetska spojnica sa prahom. Elektromagnetska spojnica sa prahom, koji ima osobinu koagulacije, tipa jeger (Jaeger), po licenci firme Smit (Smith), nema frikcionih delova. Spojnica radi pomoću specijalnog praha koji se lako zgruša da predstavlja čvrstu masu, što spaja vodeći (pogonski) i vođeni element, pa se na taj način ostvaruje uključivanje spojnice. Prah se nalazi u magnetnom polju elektromagneta; električnu struju daje dinamo; čim dinamo prestane da daje struju i da pobuđuje elektromagnet, prah postaje ponovo fluidan i spojnica se isključuje.

Hidraulična spojnica. Hidraulična spojnica sastoji se od kola sa pravim radijalnim lopaticama. Nasuprot ovom kolu — *turbopumpi* — nalazi se istovetno kolo — *turbina*. Kućica u obliku prstenaste posude sadrži 80% do 100% ulja. Turbopumpa dobija pogon od motora. Kada se turbopumpa okreće, nastaje kruženje ulja između lopatica pumpe i turbine i turbina počinje da se okreće. Kad motor radi usporeno, otporni moment transmisije nije toliki da bi se motor ugasio. Kada se motor ubrza, obrtni moment na izlaznom vratilu spojnice raste dok ne dostigne vrednost otpornog momenta. U tom trenutku vozilo kreće. Hidraulična spojnica se ne može isključiti pri promeni stepena prenosa. Zbog toga je potrebno da postoji ili epicikloidni prenosnik ili dodatna normalna spojnica (neautomatska) koju aktivira vozač. Pošto se prenos energije od pumpe na turbinu vrši kad je brzina pumpe veća od brzine turbine, nastaje klizanje i gubitak snage.

Kad su se pojavile automatske spojnice, bilo je ogromno interesovanje za njih, pa je izgledalo da će ubrzo doći do njihove opšte primene u praksi. Međutim, ništa od toga se nije desilo; sve se svelo na to da su fabrike u većini slučajeva isporučivale automatsku spojnicu tek po želji kupca; jedini izuzetak predstavlja slučaj kad je menjač automatizovan, pošto je tada spojnica automatska.

MENJAČ

Promena stepena prenosa u stvari je neophodna kod motora sa unutrašnjim sagorevanjem. Motor sa unutrašnjim sagorevanjem ne može da krene pod opterećenjem, kao što je to slučaj, na primer, sa parnom mašinom ili elektromotorom. Stoga motor mora da radi na praznom hodu pre nego što automobil krene. Njegov najveći obrtni momenat je veoma mali pri niskom broju obrtaja; moment treba, dakle, povećavati. S druge strane broj obrtaja pogonskih točkova u proseku je uvek manji od broja obrtaja motora; točkovi će se, na primer, okretati sa 800 o/min da bi se vozilo kretalo brzinom od 100 km/h, a motor će morati da okreće sa 4.000 o/min da bi razvio snagu koja je potrebna da bi se vozilo kretalo brzinom od 100 km/h. Prema tome, moraju se ispostaviti prenosni odnosi tih kretanja.

SMANJENJE (REDUKCIJA) BROJA OBRTAJA I POVEĆANJE OBRTNOG MOMENTA SPREGOM ZUPČANIKA. Promena stepena prenosa u menjaču temelji se na dva zakona. Ako su spregnuta dva zupčanika sa različitim brojem zubaca:

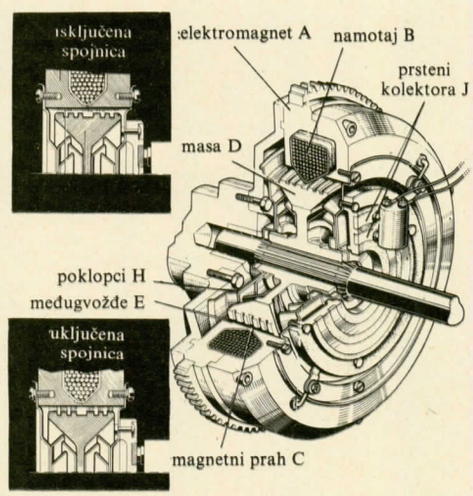
- brzina jednog zupčanika u odnosu na brzinu drugog zupčanika stoji u obrnutom odnosu sa brojem njihovih zubaca; ako pogonski zupčanik ima 10 zuba a gonjeni zupčanik 20 zuba i ako se pogonski zupčanik okreće sa 400 obrtaja, gonjeni zupčanik će se okretati samo sa 200 obrtaja; to je redukcija;
- obrtni momenti na vratilu svakog zupčanika su u istom odnosu kao i njihov broj zuba. U prethodnom primeru, ako je obrtni moment na vratilu pogonskog točka 2 kpm, na vratilu gonjenog zupčanika obrtni moment biće 4 kpm.

Na osnovu ova dva zakona može se rešiti problem vuče: smanjenjem broja obrtaja motora i povećanjem obrtnog momenta na točkovima shodno uslovima kretanja. Iz ovoga proizlazi da se mogu ostvariti različiti prenosni odnosi ako se postupno uključuju različiti spregovi zupčanika; kod savremenih automobila obično postoje četiri stepena prenosa. U praktičnoj primeni mogu se sresti više rešenja različitih kombinacija zupčastih prenosnika.

Levasorov (Levassor) menjač. Levasor je prvi uveo promenu stepena prenosa pomoću zupčanika kod automobila panar (Panhard) sa Dajmlerovim motorom. Do tada se u praksi prenos vršio lancima ili kaiševima preko stepenastih remenica. Levasorov menjač se sastoji od takozvanog *spojničkog vratila* (primarnog) koje pokreće motor preko spojnice. Na spojničkom vratilu se nalaze žlebovi po kojima klize zupčanici. Zupčanike pomera *naglavak*. Na drugom vratilu — *glavnom vratilu menjača* (sekundarnom) — nalazi se isti broj zupčanika kao i na spojničkom vratilu. Naglavak pomiče jedan zupčanik na spojničkom vratilu i spreže ga sa odgovarajućim zupčanikom na glavnom vratilu; na taj način se vrši promena stepena prenosa i stavlja u pokret glavno vratilo menjača koje je spojeno sa pogonskim točkovima. Raspored zupčanika je takav da se istovremeno može spregnuti samo jedan par zupčanika.

Renoov (Renault) direktni stepen prenosa. Levasorov menjač ima tu slabu stranu što zahteva spregu dva zupčanika kad je ugaona brzina oba vratila menjača ista, što ima za posledicu izvestan gubitak snage. Bolje rešenje našao je Luj Reno sa takozvanim direktnim prenosom. U Renoovom menjaču spojničko vratilo (primarno) sastoji se iz dva dela. Prvi deo je u vezi s motorom i predstavlja, zapravo, spojničko vratilo u pravom smislu kao i u prethodnom primeru; na ovom se nalaze zupčanici koje klizni naglavak spreže sa zupčanicima na glavnom vratilu, koje se u ovom slučaju zove prenosno vratilo. Drugi deo spojničkog vratila je nastavak prvog dela i može se s njim spojiti pomoću kandži, tako da oba dela predstavljaju celinu. Prenosno vratilo ima na kraju *kandžu*, vrstu venca sa spoljnjim ozubljenjem. Vođeno vratilo ima *kandžu* sa unutrašnjim ozubljenjem koje odgovara spoljnom ozubljenju pogonskog vratila. Spojem kandži uspostavljeni spreg vrši prenos snage u potpunosti. U direktnom stepenu prenosa nema redukcije, oba vratila se okreću istim brojem obrtaja (*direktni prenos*). Drugi deo spojničkog vratila je, u stvari, glavno vratilo.

Renoovo rešenje predstavlja vidan doprinos usavršavanju menjača; u direktnom stepenu prenosa nema, naime, gubitka snage pri prenosu. Međutim, rešenje ima i slabu stranu: vratila menjača moraju biti prilično duga kako ne bi došlo do istovremenog sprega dva para zupčanika. Zbog svoje velike dužine, vratila nisu u stanju da se odupru radijalnim pritiscima koji su prisutni među zubima zupčanika i pri tom se deformišu, usled čega nastaju šumovi pri radu menjača, a smanjuje se i mehanički stepen korisnosti.



Elektromagnetska spojnica sa prahom.

Dvostruki Majbahov naglavak. Da bi se uklonio ovaj nedostatak, inženjer Majbah (Maybach) iz kompanije Dajmler motor izmislio je promenu stepena prenosa pomoću dvostrukog pomičnog naglavka, slično ranijim, s tom razlikom što je on naglavak podelio na dva dela. Ručica menjača vrši kretanje u dva pravca: napred — nazad i upravno na ovo prvo kretanje; ovo kretanje u dva pravca omogućava uključivanje odgovarajućeg naglavka.

Savremeni menjači imaju više pomičnih naglavaka i tri prenosna vratila: spojničko, glavno i prenosno vratilo.

Ovakav sistem menjača funkcioniše samo ako se zupčanici mogu da pomiču po pravolinijskim žlebovima na spojničkom vratilu, drugim rečima, zupčanici moraju imati prave zube. Takav sistem uzubljenja dosta je bučan zbog udara koji nastaju između zuba jednog i drugog zupčanika. Da bi se buka smanjila, zube treba ukositi (tzv. helikoidalni zupčanici), čime se smanjuje pritisak među njima; kod ovih zuba postoji veća mogućnost uzubljenja nego kod pravih. Međutim, sprezanje zupčanika sa helikoidalnim zupcima može se obaviti, samo ako i naglavci klize po kosim žlebovima. S obzirom na proizvodne teškoće, usvojena je, kao povoljnije rešenje, stalna sprega zupčanika i njihovo uključivanje pomoću kandži.

Menjač sa stalno spregnutim zupčanicima i uključivanjem pomoću kandži. Menjač sa četiri stepena prenosa ovog tipa ima:

— spojničko vratilo sa zupčanikom koji je stalno spregnut sa zupčanikom na glavnom vratilu menjača:

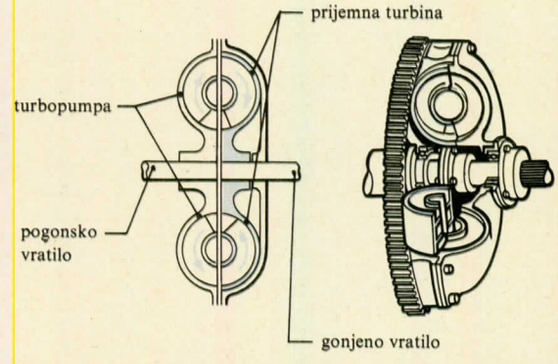
— prenosno vratilo sa tri zupčanika sa helikoidalnim zubima; zupčanici su klinovima spojeni na vratilo i okreću se zajedno s njim (direktni prenos);

— glavno vratilo na kom se nalaze tri zupčanika stalno spregnuta sa pomenuta tri zupčanika na prenosnom vratilu. Ovi zupčanici imaju dve vrste zuba, helikoidalne zube, koji su spregnuti sa odgovarajućim zubima na prenosnom vratilu, i prave zube kandži. Pomični zupčanik klizi po žlebovima spojničkog vratila i bira jedan od tri stepena prenosa; pomoću kandži spaja se glavno vratilo sa prenosnim i ostvaruje prenosni odnos koji vozač želi.

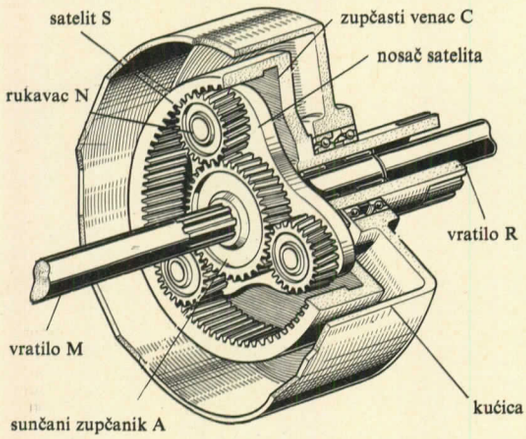
Za kretanje unazad potreban je obrnuti smer kretanja pogonskih točkova. Kada su zupčanici spregnuti u parovima, konačno kretanje uvek je obrnutog smera od prvobitnog kretanja; ako je broj zupčanika neparan, oba kretanja su istog smera. Ako se umetne treći zupčanik između zupčanika na prenosnom vratilu i odgovarajućeg zupčanika na glavnom vratilu, glavno vratilo će se okretati u obrnutom smeru.

Kad je motor smešten na zadnjem delu vozila ili kad je pogon na prednje točkove, diferencijal se nalazi između motora i menjača. Pošto se ulazno i izlazno kretanje nalaze na istoj strani, kod ovakvog menjača nema direktnog stepena prenosa.

Sinhronizacija prenosa između zupčanika. Menjač sa stalno spregnutim zupčanicima radi bešumnije od menjača sa pomičnim zupčanicima. Ipak, i kod ovog menjača kod koga se razni stepeni prenosa



Hidraulična spojnica.



Planetarni prenosnik

Prenosnik se sastoji od vratila M na kome se nalazi sunčani zupčanik A koji preko jednog ili više zupčanika satelita S okreće sa unutarnje strane ozubljeni zupčasti venac C. Sateliti se istovremeno uzubljuju u sunčani zupčanik i u zupčasti venac. Satelit S se slobodno okreće na rukavcu N koji se nalazi na kraku nosača, koji je spojen sa vratilom R. Zupčasti venac se slobodno okreće na šupljoj glavčini kroz koju prolazi vratilo M, a, kao i svi ostali elementi ovog mehanizma, venac se može kočiti. Zavisno od toga koji se element koči, planetarni prenosnik može da ostvari više prenosnih odnosa.

ostvaruju kandžastim spojem rad je bešuman samo ako oba zupčanika koji treba da se spoje imaju istu brzinu. U protivnom, postoji opasnost da se zubi polome, a na stranu šum koji prati svaku promenu stepena prenosa. Da bi se ovi nedostaci otklonili, pronađen je uređaj, *sinhronizator*, koji radi u dva razdela: najpre izjednačava brzine oba zupčanika zatim ih uključuje.

Princip je veoma jednostavan. Pogonsko vratilo ima na kraju kolo sa unutrašnjim ozubljenjem i muškim frikcionim konusom. Vođeno vratilo ima zupčanik sa spoljnim ozubljenjem na ploči unutar koje se nalazi konus (ženski) istih karakteristika kao i muški konus. Čim se obe osovine približe, muški konus jednog vratila postepeno ulazi u konus drugog vratila; u stvari, to je isti princip na kome se zasniva klasična spojnica; broj obrtaja oba vratila postepeno se izjednačava; zupčanici se spajaju, kandže se uključuju; kandže se uključuju tek kad su brzine jednog i drugog vratila sinhronizovane. Danas kod svih menjača, čak i serijskih automobila, prenosi su sinhronizovani.

Overdrajv (Overdrive). Direktni prenos može se preneti na neki niži stepen prenosa — na primer treći, ako menjač ima četiri stepena prenosa. U tom slučaju ovaj stepen prenosa će biti najviši. Ovakav stepen prenosa je od posebnog interesa jer se za istu brzinu vozila motor sporije okreće i tako se smanjuje potrošnja goriva i habanje delova. Međutim, taj stepen prenosa nije pogodan na neravnom putu, pa treba voziti u direktnom stepenu prenosa, jer bi motor inače radio pod vrlo nepovoljnim režimom i ne bi bio racionalno iskorišćen.

U Sjedinjenim Državama i Velikoj Britaniji primenjeno je drugo rešenje. Umesto da se ovaj stepen prenosa smatra sastavnim delom menjača, dodaje se normalnom menjaču kod koga je direktni prenos najviši stepen prenosa (dopunski brzinski prenosnik), koji se može koristiti samo ako su putni uslovi povoljni. Ovo rešenje poznato je pod nazivom »overdrajv«. Najprimenjeniji je overdrajv ili štedni hod tipa Borg Varner (Borg Warner). Iza menjača se nalazi planetarni prenosnik. Nosač satelita ovog prenosnika spregnut je sa spojničkim vratilom menjača, a glavno vratilo je klinom pričvršćeno za zupčasti venac. Kada se oslobodi pedala gasa, pobudi se elektromagnet koji podiže polužicu ispred koje se obrće ožlebljeni prsten spojen sa planetarnim prenosnikom. Overdrajv stupa u dejstvo. Da bi se ponovo uključio direktni stepen prenosa, dovoljno je da se do kraja pritisne pedala za gas. Između oba elementa, zupčastog venca i nosača satelita, uspostavlja se čvrsta veza; okrećući se kao jedinstven sistem, oni ostvaruju direktni prenos. Ovaj sistem je utoliko interesantniji što ne dozvoljava da se pređe na neki stepen prenosa ako to ne odgovara brzini vozila. Centrifugalni regulator na prenosnom vratilu ne uspostavlja kontakt za zatvaranje strujnog kola kad brzina vozila ne zadovoljava.

Automatski menjač. Za vozače kojima nije stalo da postignu neku naročitu veštinu rukovanja vozilom, promena stepena prevoza predstavljaće uvek dosadnu i mrsku radnju. Pronalazači su se potrudili da i ovu radnju automatizuju.

Prethodnici. Ideja o potpuno automatskoj promeni stepena prenosa nije nova. Menjači koje su pronašli Vilson (Wilson) 1917. god. i Kotal (Cotal) 1919. god. mogu se smatrati pretečama automatskih menjača. Otprilike 1923. god. Sanso de Lavo (Sensaud de Lavaud) i Konstantinesko (Constantinesco), a posle njih 1937. god. Robin van Rogen, pokušali su da ostvare mehaničke sisteme zasnovane na primeni potpuno automatizovanog »slobodnog hoda«. Hejz (Hayes) je 1934. pokušao sa frikcionim elementima. Međutim, tek oko 1947. godine uspelo je mehaničko rešenje pogodno za automobile, sa variomatikom firme Daf, a kod motocikla sa mobimatikom (Mobymatic) firme Motobekan (Motobécane). Ova rešenja predstavljaju frikcione menjače; mehanizam se sastoji od primarnog prenosa preko klinastog kaiša određene dužine koji se kreće preko remenice promenljivog prečnika, i to na taj način što je jedna prirubnica remenice pomična u odnosu na drugu, nepomičnu. Jedna remenica je spregnuta sa pogonskim vratilom, a druga sa poluvratilom točka. Mobimatik ima samo jednu remenicu sa pomerljivom prirubnicom, dok kod variomatika postoje dve takve remenice.

Hidrodinamički menjač. Hidraulična spojnica ne može da promeni vrednost obrtnog momenta koji prenosi pošto se ulje koje izlazi iz turbopumpe pojavljuje na lopaticama prijemne turbine pod istim upadnim uglom. Ako se između ove dve turbine postavi jedno nepomično kolo sa lopaticama kao i na turbinama, tada će ulje iz turbopumpe skrenuti na lopatice prijemne turbine i stići pod drugim upadnim uglom. Brzina i smer strujanja mlaza na izlazu iz dopunskog kola menjaće se, dakle, pri svakoj promeni brzine turbopumpe. Prema tome, na izlaznom vratilu iz prijemne turbine treba očekivati obrtni moment, koji će pod izvesnim uslovima biti veći nego obrtni moment na ulaznom vratilu. U stvari, na ovaj način se dobija pretvarač obrtnog momenta. Stepen korisnosti ovog menjača prilično je sporan. Između njegovih elemenata postoje suviše velike razlike brzina, pa nastaju vrtložna strujanja, odnosno gubitak jednog dela snage. Ovaj nedostatak može se ispraviti na nekoliko načina:

1. dodatkom jednog mehanizma slobodnog hoda na stator menjača. Uređaj radi kao menjač sve dok brzina potiskuje lopatice statora u smeru u kome ga slobodni hod sprečava da se pomeri; u protivnom, kad prestane dejstvo slobodnog hoda, lopatice se okreću u istom smeru kao i turbina. Hidrodinamički menjač postaje tada obična hidraulična spojnica. Tako se koriste prednosti automatskog uključivanja pri normalnom kretanju vozila, a na polasku se dobija povećanje obrtnog momenta pošto uređaj dejstvuje kao menjač;

2. spajanjem nekoliko hidrodinamičkih menjača u jedan uređaj pri čemu se koriste najpovoljnije karakteristike svakog od ovih menjača;

3. ugradnjom nekog reaktivnog elementa za usmeravanje lopatica.

4. spregom hidrodinamičkog menjača sa jednim planetarnim ili više planetarnih menjača. Planetarni menjači pružaju mogućnost raznih prenosnih odnosa u zavisnosti od načina sprege njihovih elemenata.

Planetarni menjači. Kod dinaflou (Dynaflow) menjača firme Bjuik (Buick) nosač satelita koji dejstvuje na sekundarno vratilo menjača pokreće jedna turbina. Druga turbina spregnuta je sa zupčastim vencem, a reaktivni element je spojen sa planetarnim prenosnikom. Na polasku radi samo prva turbina; obrtnom momentu planetarnog prenosnika pridružuje se moment hidrodinamičkog menjača. Planetarni menjač se isključuje čim druga turbina prihvati prenos prve turbine. Reaktivni element prihvata povećanje brzine turbopumpe, pa ceo uređaj radi kao hidraulična spojnica. Isto tako mogu se ugraditi više prijemnih turbina, koje se koriste za aktiviranje elemenata nekoliko planetarnih prenosnika. Takvo rešenje nalazimo kod Ševroletovog turboglajda (Turboglide). Većina američkih automatskih menjača temelji se na sličnoj koncepciji. Prenosnici sa epicikličnim zupčanicima primenjuju se mnogo više nego svi ostali zupčasti prenosnici, jer se sa njima lakše postiže automatizacija menjača.

Posebna rešenja. Reno je na nekim svojim modelima ugradio automatski menjač koji se sastoji od automatske elektromagnetske spojnice na principu Jegerovog koagulirajućeg praha i klasičnog menjača sa tri stepena prenosa. U sistemu obavezno postoji isključivač, koji bira stepene prenosa, i uključivač, koji menja stepene prenosa. Ovaj uređaj radi besprekorno.

Glavna osobina variomatika holandske firme Daf je visoki stepen korisnosti, bez gubitka usled klizanja, što nije slučaj kod američkih hidrauličnih sistema; holandski menjač, dakle, može se primeniti kod motora srednje radne zapremine, dok su drugi sistemi podesniji za motore kod kojih veća snaga dopušta manji stepen korisnosti, bez drugih smetnji i uz slabu stranu veće potrošnje goriva.

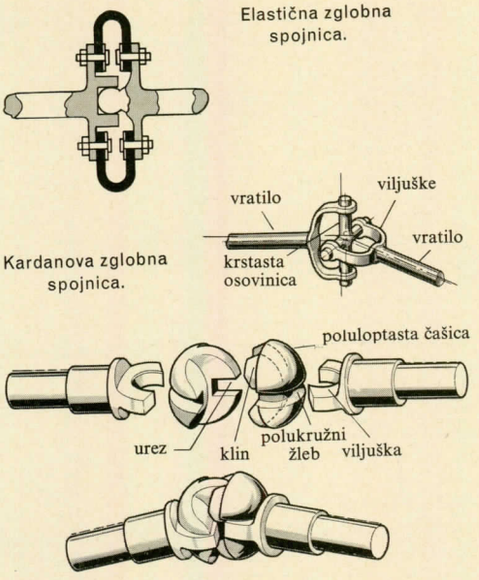
Pežo i Simka koriste hidrodinamički menjač zajedno sa planetarnim ili klasičnim menjačem (simka 1000).

ZGLOBNI PRENOSNICI

Po klasičnom rasporedu: motor napred, pogonski most pozadi, vezu između izlaznog vratila menjača i pogonskog mosta predstavlja zglobni prenosnik. Ovaj prenosnik je podeljen na dva dela, čime je omogućeno slobodno gibanje zadnjih točkova. Članovitost se ostvaruje pomoću elastične zglobne ili kardanove spojnice.

PRENOSNICI SA ELASTIČNOM ZGLOBNOM SPOJNICOM. Zglobna elastična spojnica sastoji se od dve trokrake viljuške sa ušicama, koje su zavrtnjima pričvršćene za elastični disk između njih. Disk dozvoljava manje promene ugla osa spojenih vratila. Ušice viljuške jednog vratila raspoređene su između ušica viljušaka drugog vratila, a sa obe strane elastičnog diska.

VRATILO SA KARDANSKIM ZGLOBOM. Kardanski zglob je spoj dva vratila koji dozvoljava izvesno kretanje po osi upravnoj na osu spojenih vratila.



Homokinetički zglob.

Kardanski zglob se sastoji od krstaste osnovice čiji su krajevi smešteni u ležištima sa iglicama, i dve viljuške spojene sa vratilima. Na krajevima svake viljuške nalaze se ležišta krstaste osovinice.

HOMOKINETIČKI ZGLOB. Kardanski zglob je, uopšte uzev, dovoljan da obezbedi gibanje pogonskih točkova. Međutim, kada ugao između osa dva vratila pređe desetak stepeni, brzina okretanja jednog vratila ne prenosi se potpuno na drugo vratilo, što izaziva trzaje štetne po mehanizam ovih organa. Pojava trzaja nastaje kod automobila sa prednjim pogonom kod kojih zaokret točkova u krivini može preći 35°, kao i kod vozila sa kruto postavljenim pogonskim mostom.

Homokinetički zglob predstavlja najbolje rešenje. Zglob je prvi primenio inženjer Gregoar (Grégoire) na svom automobilu trakta (Tracta), pa je i danas ovaj zglob poznat kao »trakta zglob«. Sačinjen je od dva zgloba između kojih je umetnuto jedno posredničko vratilo. Spoj se sastoji od dve polulopte; svaka polulopta ima polukružni žleb u koji hvataju viljuške. Jedna polulopta ima klin, koji u stvari, služi kao posredničko vratilo, a druga urez; klin i odgovarajući urez su upravni na ravan u kojoj je polukružni žleb. Polukružni žlebovi na poluloptama imaju istu ulogu kao rukavci kardanskog zgloba. Kad zglob miruje, viljuške su u istoj ravni. Ose primarnog i sekundarnog vratila su u istoj ravni kao i viljuške posredničkog vratila. Osim toga, ceo zglob je smešten u kućici loptastog oblika, tako da se centar okretanja sistema nalazi u centru kućice. Isto tako, trougao koji čini produžetak osa primarnog i sekundarnog vratila sa osom posredničkog vratila je ravnokraki trougao. To je, uostalom, uslov da zglob zaista bude homokinetički, što će reći da se vođeno vratilo okreće istom brzinom kao i pogonsko vratilo.

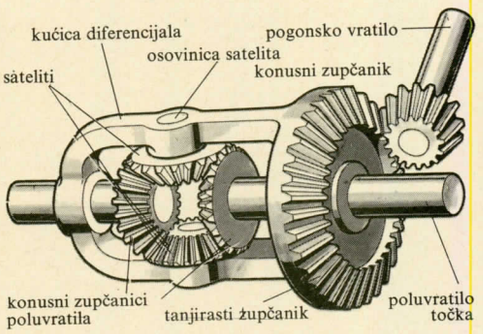
Kad je prenosno vratilo čvrsto vezano za pogonski most, na izlazu menjača nalazi se jedan kardanski zglob koji dozvoljava gibanje zadnjeg mosta. Ako se to prenosno vratilo nalazi u cevastoj oblozi (tzv. potisna cev), pričvršćenoj za zadnji most, ono je u istoj ravni sa konusnim zupčanikom. Ako je zglob slobodan, dodaje se još jedan kardanski zglob, kako bi se izbegla torziona naprezanja izazvana gibanjem zadnjeg mosta. Ako je pogon napred ili »sasvim pozadi«, tada nema prenosnog vratila. Konusni zupčanik se nalazi na produžetku sekundarnog vratila menjača.

POGONSKI MOST

Elementi kojima se prenosi kretanje na pogonske točkove nalaze se u pogonskom mostu. Pogonski most čine sledeći organi: *glavni prenosnik* koji prenosi obrtno kretanje sa uzdužne ose u kretanje upravno na ovu osu; *diferencijalni prenosnik* omogućava da se pri zaokretu i u krivini jedan točak okreće brže ili sporije od drugog i *poluvratila pogonskih točkova*.

GLAVNI PRENOSNIK. Kad se produžena osa konusnog zupčanika nalazi u istoj horizontalnoj ravni sa osom tanjirastog zupčanika, njihovi zubi su pravi, pa se kod ovakvog ozubljenja pojavljuje šum. Ako je osa konusnog zupčanika ispod horizontalne ravni ose tanjirastog zupčanika, tada su zubi kosi. Njihovo uzubljenje je bešumnije, i pošto se prenosno vratilo nalazi niže, nema potrebe za »tunelom« za prolaz ovog vratila. Međutim, za ove prenosnike moraju se koristiti posebna maziva otporna na visoke pritiske. To su, uglavnom, prenosnici sa hipoidnim zupčanicima i glizonovim uzubljenjem.

Umesto konusnog para zupčanika prenos se može vršiti pužnim prenosnicima — uzubljenjem tangencijalnog beskrajnog zavrtnja i zupčanika.



Glavni i diferencijalni prenosnik.

DIFERENCIJALNI PRENOSNIK. Diferencijal je kućicom čvrsto vezan sa tanjirastim zupčanikom; u kućici diferencijala nalaze se dva konusna zupčanika, u kojima su naglavljena poluvratila pogonskih točkova, a između njih nalaze se dva ili više manjih konusnih zupčanika, tzv. *satelita*, ili (trkača). Osovinica satelita čvrsto je uglavljena u kućici diferencijala; međutim, sateliti se mogu kotrljati po konusnim zupčanicima poluvratila.

Tanjirasti zupčanik okreće kućicu diferencijala, a kućica preko satelita okreće konične zupčanike i preko ovih poluvratila pogonskih točkova.

Na pravom putu, pod pretpostavkom da svaki točak podjednako prianja na kolovoz, zupčanici poluvratila pružaju isti otpor i okreću se istom brzinom. Sateliti se ne okreću na svojoj osovinici i ceo sklop se okreće istom brzinom.

Na pravom putu kad je jedan točak blokiran a drugi slobodan, zupčanik poluvratila blokiranog točka miruje, a sateliti se okreću na svojoj osovinici i kotrljaju po blokiranom zupčaniku prenoseći kretanje na suprotni zupčanik poluvratila, koji se okreće dva puta brže od kućice diferencijala.

Pri zaokretu i u krivinama jedan točak je delimično kočen (točak s unutrašnje strane krivine). Kućica se okreće istom brzinom, ali se zupčanik poluvratila delimično kočenog točka okreće sporije zbog većeg otpora na koji nailazi. Sateliti se kotrljaju po njemu i prisiljavaju drugi zupčanik poluvratila da se brže okreće. Spoljni točak se, dakle, pri zaokretu može brže okretati od unutrašnjeg.

Vešanje mosta. Zadnji most sa krutom osovinom predstavlja izvesnu neelastično oslonjenu masu koja nepovoljno utiče na stabilnost vozila na putu. Neki konstruktori vezuju kućište glavnog i diferencijalnog prenosnika sa šasijom; to je *vešanje pogonskog mosta*. Kod automobila sa klasičnim pogonom (motor napred, pogonski točkovi nazad) ovakav most je zavrtnjima neposredno pričvršćen za šasiju. Kad se motor nalazi pozadi ili kada je pogon vozila na prednje točkove, kućište glavnog i diferencijalnog prenosnika čini celinu sa menjačem i blokom motora. U jednom i u drugom slučaju, poluvratila kojima se prenosi kretanje na pogonske točkove izvedena su kao zglobni prenosnici. Kod De Dionovog mosta na svakom poluvratilu nalaze se po dva zgloba, jedan na izlazu diferencijalnog prenosnika a drugi blizu točka.

Kod pogona »sve napred« ili »sve pozadi« primenjuju se i klatnasta vratila. Sa svake strane kućišta glavnog i diferencijalnog prenosnika nalazi se po jedna zglobna spojnica na koju se nadovezuje cevima zaštićeno poluvratilo, a cevi na svom suprotnom kraju nose kočne ploče. Svako poluvratilo ima kardanski zglob u unutrašnjosti kućišta, tako da su centri zgloba i poluloptastog dela zaštitne cevi zajednički.

Kočnice

ISTORIJAT

Istorijat kočnice kroz vekove pokazuje da je tokom razvoja uvek preovladavalo nastojanje da se poveća dejstvo kočnica uporedo s povećanjem brzina vozila. Čim su se pojavili prvi pneumatici 1889. i omogućili veće brzine vozila (do 100 km na čas), kočnica koja je do tada tehnički odgovarala zaprežnim vozilima morala je da pretrpi izmene. Tada se pojavila trakasta kočnica: preko doboša postavljena je traka pričvršćena na nekoj nepomičnoj tački. Ova kočnica se postepeno usavršavala: krajevi trake su povezani sa komandnom polugom kojom rukuje vozač. Kočenje u ovom slučaju moguće je u oba smera.

Herbert Frud (Herbert Froode) je 1909. pronašao kočni element koji se sastojao od azbestne tkanine protkane mesinganim nitima izukrštanim i natopljenim smolom: to je poznata obloga ferodo (Ferrodo). Kočnica sa spoljnim papučama ustupa mesto kočnici sa dobošem i unutrašnjim papučama.

Sve do 1907. godine primenjivan je sistem kočenja na prenosnom vratilu; komanda je bila nožna; sistem je dopunjavala kočnica na zadnjim točkovima i sa ručnom komandom. Međutim, počev od 1904. godine konstruktori su počeli da traže rešenja za kočenje prednjih točkova. Sistem kočenja koji je zamislio Englez Renouf, praktično su 1910. ostvarili Fraskini (Fraschini) u Italiji, Anri Pero (Henri Perrot), Dž. Raberi (J. Ruburi) i Argils (Argylls) u Velikoj Britaniji. Sistem kočenja na sva četiri točka pojavio se na automobilu argils. Kod ovog modela kočenje prednjih točkova je pedalom, a zadnjih ručicom. Malo kasnije, 1912. godine, Argils je prikazao kola sa integralnim sistemom kočenja. Komanda je bila podjednako pedalom i ručno. Ovaj sistem kočenja predvideo je Pero još ranije.

Od Peroa potiče, takođe, servo-kočnica koja pomaže vozaču da manjom silom dejstvuje na pedalu kočnice (1919). Čarls Vasejdž (Charles Waseige), glavni inženjer kod Farmana, postavio je 1920. princip kočnice »duo-servo«, koju i danas primenjuju američki proizvođači.

Posle mehaničkih komandi pomoću užadi i poluga primenjena je hidraulična komanda. Hidrauličnim sistemom komandovanja počeli su se stručnjaci baviti još 1903. Međutim, do praktične primene došlo je tek 1922. u Sjedinjenim Državama, kod kompanije Lokid (Lockheed). Svi američki proizvođači usvojili su ovaj sistem osim Forda, koji ga je primenio tek 1938, dok su ga Matis i Sitroen koristili u Francuskoj još od 1934.

Pošto su se u međuvremenu povećale brzine vozila, kočnica sa dobošem pokazala se u mnogim slučajevima nepodesnom, mada je stalno usavršavana. Pažnju istraživača privukla je kočnica sa diskom. Posle drugog svetskog rata počeli su je primenjivati Lamber i Krajsler u Sjedinjenim Državama, Danlop, Girling i Mesije u Evropi. Posle sjajne demonstracije jaguara u 24-časovnoj trci u Le Manu 1953. godine, Sitroen je 1955. počeo serijsku proizvodnju kočnica sa diskom za svoje modele DS 19, a malo kasnije i za ID 19.

PROBLEMI KOČENJA

Bilo na kom principu počivala, zadatak kočnice je da apsorbuje kinetičku energiju vozila, da ga uspori i konačno zaustavi. Apsorbovanje kinetičke energije postiže se trenjem između nekog organa spregnutog sa točkom, dakle, pokretnog organa, i nekog nepokretnog. Kinetička energija se pretvara u toplotu koja se gubi u vazduhu okoline. Odvod toplote u vazduh okoline ne vrši se trenutno i zbog toga se kočnica greje; zbog zagrevanja nastaju promene geometrijskih i fizičko-hemijskih osobina elemenata koji se međusobno taru.

RASPODELA OPTEREĆENJA. Najveću teškoću pri rešavanju kočenja predstavlja problem na koji način raspodeliti opterećenja po osovinama u momentu kočenja. Pri kočenju svedoci smo pojave koja je suprotna pojavi na polasku vozila. Na polasku prednji deo vozila se rasterećuje a zadnji opterećuje. Ovu pojavu možemo lako da uočimo ako posmatramo teško natovareni kamion: na polasku prednji gibnjevi se izvijaju a zadnji se ugibaju.

Pri kočenju dolazi do obrnute pojave. Horizontalna sila inercije usmerena u pravcu kretanja nastoji da produži kretanje vozila napred. Vozilo bismo mogli da uporedimo sa nekim teškim pokretnim telom u čijem težištu u momentu kočenja deluju dve sile koje se komponuju da bi dale rezultantu nagnutu u odnosu na horizontalnu ravan.

Vozilo ima samo svoju sopstvenu težinu P u težištu G. Težina je ravnomerno raspoređena na obe osovine i iznosi $P\frac{CB}{AB}$ za prednju, a $P\frac{CA}{AB}$ za zadnju osovinu, gde AB predstavlja razmak osovina. Na početku dejstva sile kočenja javlja se komponenta inercije GI, koja se slaže sa GP i daje rezultantu DM sa presekom tla u tački D. Raspodela opterećenja po osovinama biće:

$$P\frac{DB}{AB}=P\frac{DC+CB}{AB}$$ na prednjoj osovini,

$$P\frac{DA}{AB}=P\frac{AC-DC}{AB}$$ na zadnjoj osovini.

Pri kočenju opterećuje se prednja, a rasterećuje zadnja osovina. Zbog ovakve raspodele opterećenja potrebno je da svaka osovina različito koči.

UTICAJ NA STABILNOST VOZILA. Pri kočenju dolazi do raznih pojava koje utiču na stabilnost vozila. Pojave su izrazitije pri naglom kočenju, kao i u slučaju lošeg dejstva kočnica na pojedinim točkovima.

Ako samo zadnji točkovi blokiraju, oni više ne prianjaju za kolovoz; zadnja osovina nastoji da se pomeri u pravcu kretanja vozila. Prednji točkovi, nastavljajući kotrljanje, kreću se po svojoj ravni. Na vozilo deluju, dakle, dve sile koje međusobno nisu paralelne i čiji se sistem može rastaviti na jednu jedinu silu i jedan momenat.

Momenat nastoji da odvoji vozilo od kolovoza, i ono se zanosi, a zadnji deo vozila nastoji da priđe prednjem delu.

Ako samo prednji točkovi blokiraju, zadnji točkovi se dalje kotrljaju i kreću paralelno po svojoj ravni; prednji deo se pomera paralelno u pravcu kretanja vozila. Rezultujući momenat dejstvuje na vozilo u smislu njegovog ispravljanja.

Ako istovremeno blokiraju sva četiri točka, celo vozilo se pomera paralelno sa samim sobom. Obe sile koje deluju na vozilo paralelne su i istosmerne. Stanje je »neodređeno«, a jedino moguće kretanje vozila je bočno klizanje, koje može imati teške posledice ako postoji opasnost da se vozilo sudari sa nekom preprekom.

Sila kočenja prvenstveno treba da dejstvuje na prednje točkove. Rešenje koje predviđa dva različita sistema kočenja, tj. zadnjih točkova kočnicama sa dobošima a prednjih diskosnim kočnicama, predstavlja, dakle, odlično rešenje i to zbog toga što je sila kočenja kod sistema sa diskom veća nego kod sistema sa dobošem. Neki konstruktori dodaju usporače sile kočenja na zadnje točkove.

OCENJIVANJE PUTA ZAUSTAVLJANJA. Mada je kod savremenih mehanizama za kočenje učinjen veliki napredak, on će efikasno dejstvovati samo ako vozač ume da oceni potrebno odstojanje za zaustavljanje vozila. U tom se mnogo greši, a greške dovode često do tako teških udesa da je potrebno da se i na ovom mestu pobliže objasni pojam vremena i puta kočenja.

Put zaustavljanja jednak je zbiru puteva predenih za vreme usporenja i vremena reagovanja pri kočenju.

Usporenje je ona veličina brzine koja se gubi u datom momentu. Ako se vozilo kreće brzinom od 80 km/h i ako se normalnim kočenjem uspori toliko da mu brzina padne na 60 km/h u toku jedne sekunde, tada je vozilo usporilo 20 km/h u sekundi. Vreme zaustavljanja će u ovom slučaju biti 4 sekunde. Usporenje se u praksi računa u m/s². Ova veličina zavisi od koeficijenta prianjanja pneumatika na kolovozu i od stanja kočnica. U najpovoljnijim uslovima usporenje ne prelazi 6 m/s² ili 21,6 km/h u sekundi.

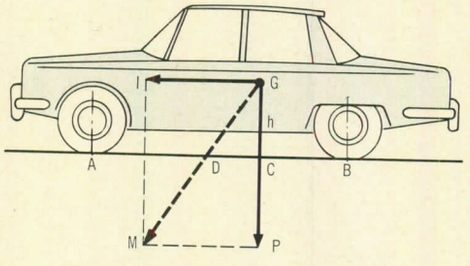
Vreme reagovanja pri kočenju je ono vreme koje protekne od trenutka kad je vozač doneo odluku da koči pa do trenutka kad se vozilo potpuno zaustavi. Ovo se vreme sastoji od dva vremena: od *vremena reagovanja vozača*, tj. vremena koje protekne od trenutka kad je vozač odlučio da koči pa do trenutka kad počne da koči, kao i od *vremena odziva kočnice*, tj. vremena koje protekne od trenutka kad noga pritisne pedalu kočnice i trenutka kada frikcioni elementi počnu da dejstvuju. Vremena reagovanja pri kočenju kreću se od pola sekunde kod iskusnog probnog vozača pa do 3/4, pa čak i cele sekunde kod prosečnog vozača.

Put zaustavljanja za vreme usporenja dva puta je veći od promene brzine. Ako se vozilo koje se kreće sa 60 km/h zaustavi na 23,2 m, put zaustavljanja pri 120 km/h (pri dva puta većoj brzini) biće četiri puta veći od prethodnog, tj. oko 93 m. Put prevaljen u toku vremena reagovanja proporcionalan je brzini vozila.

Sabiranjem ova dva puta mogu se dobiti tablice kočenja za razne brzine kretanja vozila.

VRSTE KOČNICA

KOČNICA SA DOBOŠEM. Rad kočnice sa dobošem zasniva se na trenju između kočnih delova — papuča sa oblogom, nepokretno pričvršćenih na osovine, odnosno šasiju, i pokretnih delova — doboša, pričvršćenih na točkovima.



Raspodela opterećenja prednje i zadnje osovine pri kočenju.

Širina doboša je relativno mala u odnosu na prečnik. Sile trenja deluju upravno na osu obrtanja točka. Doboš se izrađuje od specijalnog liva, koji je dovoljno elastičan da može izdržati deformacije nastale neravnomernim zagrevanjem pri kočenju i temperature koje rastu i do oko 250° C. Kod brzih automobila temperatura je često i viša. Zbog velike toplote nastaju deformacije doboša, koje prouzrokuju promene njegovih performansi.

Deformacija zbog toplote. Kod kočnih elemenata nastaju promene unutrašnje strukture i hemijskog sastava, što ima za posledicu promenu koeficijenta trenja između papuča i doboša. Osim toga, nastaju promene dimenzija sastavnih delova kočnice. Kod doboša postoji tendencija da se širi, drugim rečima, da povećava prečnik, dok kod papuča, praktično uzev, nema promene prečnika. U tom slučaju papuče koče samo svojim srednjim delom, pa je sila kočenja svakako manja.

Ako se u ovakvim uslovima često koči, obloga kočnice se neravnomerno troši po sredini, dok njeni krajevi ostaju nedirnuti. Kada se doboš ohladi, ponovo se vraća na svoj raniji prečnik; međutim, poluprečnik papuča se ne vraća na prvobitnu vrednost već ostaje onakav kako je istrošen u toku kočenja sa deformisanim dobošem. Takva kočnica je nepouzdana i predstavlja opasnost pri kočenju.

Primenjena su razna rešenja kako bi se eliminisale posledice zagrevanja kočnica. Da bi se bar donekle olakšao odvod toplote sa doboša, koriste se razne obloge, na primer, obloge sa armaturom od olovnih niti, koje povećavaju toplotnu provodljivost.

U istu svrhu primenjuju se doboši od aluminijumskih legura i livenog gvožđa. Na kraju za dvometalne doboše primenjen je Alfin postupak za prekrivanje lake legure na površinama od livenog gvožđa. Spoj između doboša sa rebrima za hlađenje od lake legure i unutrašnjeg prstena doboša od livenog gvožđa obezbeđen je livenjem sa vezivnim metalom, koji je otporniji na temperature od metala od kojeg je izrađen doboš.

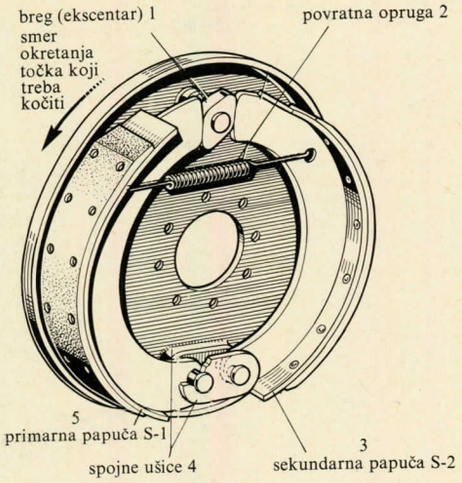
Provetravanje doboša jačim strujanjem vazduha spolja ili iznutra takođe doprinosi odvodu toplote. Drugi način je da se kočnice odvoje od točkova i postave na šasiju, a veza uspostavi preko zglobnih prenosnika. Ovo rešenje se primenjuje kod kruto vešanog pogonskog mosta. Tu su kočnice postavljene na izlazu iz mosta, tj. na mestu gde je lakše postići hlađenje nego u točkovima.

Razvoj oblika kočnice. Pored pomenutih dostignuća na odvođenju toplote u samom kočnom sistemu vršene su izmene i doterivanje.

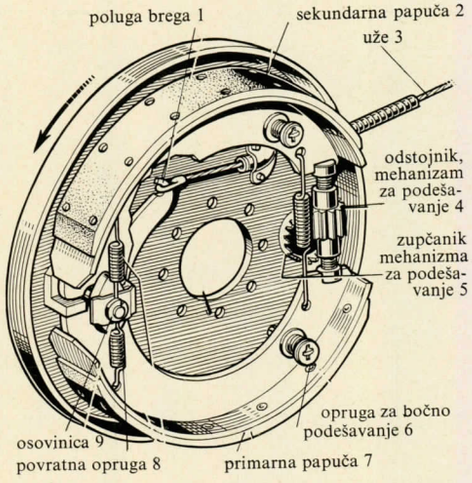
Kočnica sa papučama. U klasičnom i primitivnom obliku kočnica je bila sa papučama postavljenim u dve oslone tačke; svaka papuča je pokretna oko jedne oslone tačke. Njihovo razmicanje je vršeno pomoću brega (ekscentra), a vraćanje pomoću zatezne opruge. Osnovni nedostatak ovog sistema je nejednako dejstvo papuča. Jedna od papuča (primarna) se sabija i nastoji da se sama podesi. Druga papuča, nazvana »sekundarna«, se isteže i njena sposobnost samopodešavanja je manja. Obloge papuča se, dakle, ne troše podjednako.

Kočnica sa slobodnim papučama. Umesto da se zadovolje privremenim rešenjima, na primer primenom duže primarne papuče od sekundarne, ili primenom različitih obloga za svaku papuču, konstruktori su se opredelili za uklanjanje oslonih tačaka i zamenili ih graničnikom za oslon slobodnih papuča. To je sistem kočnica sa slobodnim papučama i automatskim podešavanjem.

Kočnica sa samopodešavanjem i duo-servo-kočnica. U ovoj postavci papuče se ne podešavaju same, jer je pritezanje utoliko veće ukoliko je veća brzina vozila. Kod ovih kočnica sa samopodešavanjem papuče su, umesto na oslonim tačkama, postavljene



Samopodešavajuća kočnica.



Duo-servo-kočnice.

Papuče 3 i 5 postavljene su na slobodnim osovinicama i spojene jednom ušicom, papuče su nezavisne u odnosu na nosač kočnice. Pod dejstvom brega (ekscentar) 1 primarna papuča, povučena obrtanjem doboša na koji naleže celom svojom površinom, oslanja se jedino na spojnu ušicu. Ova dalje potiskuje sekundarnu papuču 3 do oslona na breg 1. Papuča naleže na doboš na isti način kao i primarna.

Pomični breg kojim se upravlja preko poluge 1 i užeta 3 ima osovinicu u oslonoj tački na nosaču papuča. Breg obuhvata ovaj oslon, ali je ne dodiruje. U svom kretanju breg nastoji da razmakne papuče. Pošto je opruga primarne papuče 7 slabija od opruge sekundarne papuče 2, primarna papuča prva stupa u dodir sa dobošem i potiskuje sekundarnu papuču posredstvom odstojnika 4. Sekundarna papuča sa oslonom u nepomičnoj tački naleže uz doboš.

na slobodnim osnovicama i nezavisne su od nosača papuča. Obe osovinice spojene su ušicama. Kad primarna papuča nalegne uz doboš, ona se osloni na spojnu ušicu, a ova potiskuje drugu sekundarnu papuču. Ova papuča je takođe samopodešavajuća.

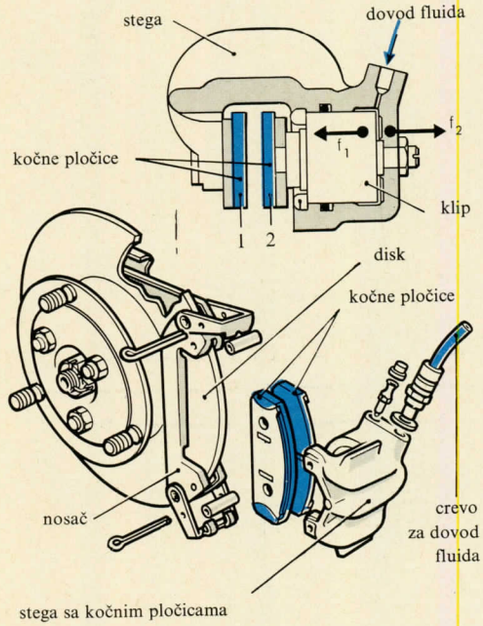
Samopodešavajuća kočnica je prilično »tvrda«. Da bi se otklonio ovaj nedostatak, primenjen je sistem »duo-servo« — kočnice, koji se sreće kod većine američkih automobila. Sistem »duo-servo« je sistem sa pomičnim ekscentrom čija je osovinica zamenjena oslonom tačkom koju breg okružuje bez dodira. Breg se održava u svom položaju pritiskom koji vrše povratne opruge papuča. Opruge nisu jednake, povratna opruga primarne papuče je slabija. U momentu kočenja breg nastoji da razmakne papuče. Prvo se aktivira primarna papuča. Povučena od doboša, ova potiskuje sekundarnu papuču preko jednog posebnog uređaja za podešavanje, takozvanog *regulatora*. Sekundarna papuča oslonjena u nepomičnoj tački, a koju istovremeno potiskuje regulator, priljubljuje se uz doboš i sama se podešava.

Na papuče se može dejstvovati i pomoću cilindara. Kočnica sa cilindrima ima veću silu kočenja pri istom pritisku i hodu pedale. Istrošenje obloga jedne i druge papuče je podjednako.

KOČNICA SA DISKOM. Kada se koči diskosnom kočnicom, sile trenja dejstvuju paralelno osi okretanja točkova. Zatvorene disk-kočnice, koje se nalaze samo kod nekih vozila sa prednjim pogonom i kod nekih teretnih automobila, imaju kućište spregnuto sa točkom. U kućištu su smešteni kočni organi.

Kočnica sa spoljnim diskom sastoji se od diska postavljenog na glavčini točka. Trenje nastaje između diska i uređaja koji je delom vezan za šasiju vozila. Kočenje se vrši samo na jednom ograničenom delu diska; ostali delovi izloženi su uticaju spoljnog vazduha.

Disk-kočnice nisu novi pronalazak; postojale su još od 1909. godine, samo su bile ugrađivane na prenosnom vratilu. Na razvoj sistema diskosne kočnice uticali su avioni i trkački automobili. Kočenje je samo s jedne ili sa obe strane diska, što zavisi od izbora sistema. Kod jednostranog kočenja hidraulična komanda aktivira nekoliko cilindara koji se nalaze s jedne strane diska i koji nose frikcione elemente (kočne pločice). Reakcija stege se koristi da se dobije protivsila na drugoj strani diska. Stega mora biti slobodna da bi se mogla pomerati paralelno sa osom okretanja kako bi se kompenziralo pomeranje kočnog klipa. U drugom slučaju (dvostruko kočenje) svaki krak stege koji je pričvršćen za noseću ploču nosi kočne cilindre. Pod dejstvom klipova kočne pločice se pomiču simetrično sa obe strane diska tako da se disk ne mora pomerati aksijalno.



Nagib osovinice rukavca i bočni nagib točka

Kod disk-kočnice tipa Girling kod koje je primenjen ovaj princip kočne pločice su u stalnom kontaktu sa diskom, pošto se u hidrauličnoj komandi održava mali zaostali pritisak. U toku vožnje trenje je veoma malo, pa nema opasnosti da se kočne pločice pregreju.

Dobre i slabe strane kočnice sa diskom. Disk-kočnice otvorenog tipa (slobodan pristup okolnog vazduha) imaju nekoliko prednosti.

- Pritisci su ravnomerno raspoređeni s obe strane diska. Istrošenje je ravnomerno. S druge strane, ovi pritisci su u ravnoteži, što poništava potiske i reakcije, izuzev torzije stege i njegovog oslonca.
- Pošto je površina izložena hlađenju velika, nema deformacija. Eventualno radijalno širenje ne utiče na ravan diska. Širenje po debljini može dovesti samo do približavanja kočnih pločica, dok bi kod kočnice sa dobošem efekat bio suprotan.
- Disk-kočnica brzo dejstvuje; pod pretpostavkom da diskosna i kočnica sa dobošem imaju istu silu kočenja, diskosna kočnica je lakša. Međutim, kod disk-kočnice potreban je veći pritisak na pedali nego kod kočnice sa dobošem, pa zahteva neku pomoćnu komandu, kočnica sa diskom nije samopodešavajuća.
- Za izradu diska upotrebljava se ili hromirani čelik ili neki vrlo sitnozrnasti liv. Za kočne pločice, koje pri kočenju deluju malom površinom, potreban je veoma tvrdi liveni materijal. Za izradu kočnih pločica u SAD primenjuju se tehnološki postupci pozajmljeni iz vazduhoplovne industrije; tamo se izrađuju »keramičkometalne« kočne pločice; ovi metalokeramički materijali sličnu su porculanu.

MEHANIZMI KOČNIH SISTEMA

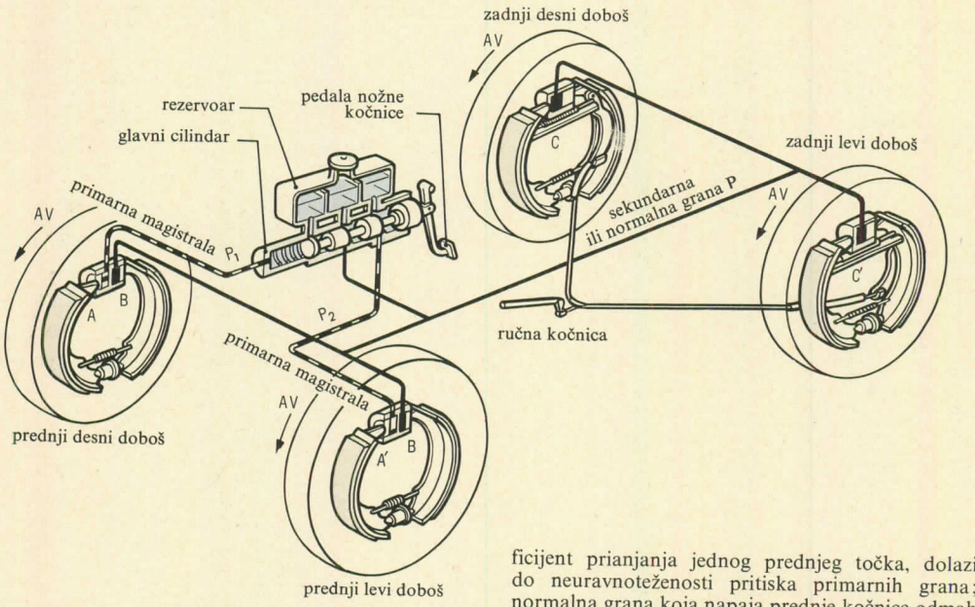
Postoje dva načina komandovanja kočnicama: kočenje isključivo pritiskom noge na pedalu kočnice, ili se za kočenje koristi neki pomoćni energetski izvor.

HIDRAULIČNA KOMANDA. Danas se kočenje pritiskom noge na pedalu vrši isključivo hidrauličnim putem. Pritiskom noge na pedalu vozač stvara pritisak u glavnom *cilindru*; pritisak u glavnom cilindru prenosi se na kočne cilindre; za svaku kočnicu postoji po jedan kočni cilindar. Kočni cilindri aktiviraju kočnice. Pošto se pritisak tečnosti prenosi ravnomerno na sve površine, hidrauličnom komandom se postiže istovremeno i postupno kočenje svih točkova. Zbog veće sigurnosti, danas se u automobile ugrađuje takozvani *dvograni sistem kočenja*, kod koga je hidraulična magistrala za kočenje prednjih točkova potpuno nezavisna od magistrale zadnjih točkova. Na izlazu iz glavnog cilindra nalazi se ventil. Ako nastupi kvar u jednoj grani i pritisak padne, ventil automatski zatvara ulaz u oštećenu granu; u tom slučaju pritisak iz glavnog cilindra prenosi se samo na neoštećenu granu. Dvograni sistem ne rešava problem automatske stabilnosti vozila pri kočenju kad neki točak naiđe na tlo čiji se koeficijenat prianjanja razlikuje od koeficijenta prianjanja ostalih točkova. Momenti usporenja u kočnim cilindrima se ne menjaju i zbog toga se vozilo ne nalazi više u ravnotežnom stanju.

Kod Ferodovog sistema »autostabl« postoje tri grane kojima se komanduje iz glavnog cilindra sa

Kočnica sa diskom tipa Lokid Bendiks (Lockheed Bendix).

U kućištu stege nalazi se kočni cilindar. Kada se u cilindru obrazuje pritisak, klip se pomeri u pravcu strelice f_1 i kočna pločica 2 stupa u dodir sa diskom. Stega se, po klipu, pomeri u pravcu strelice f_2 i kočna pločica 1 nalegne uz disk. Kočenje je ravnomerno raspoređeno na obe kočne pločice.



Kočnica »Autostable«.

tri pregrade. Svaka kočnica sa dobošima prednjih točkova spojena je sa nezavisnim primarnim kolom vezanim sa glavnim cilindrom, i sa normalnom granom koja dejstvuje na sva četiri kočna cilindra; dok celim kočnim mehanizmom komanduje treća grana, takozvana *sekundarna* ili normalna grana. Prednje kočnice su posebnog tipa. U vožnji napred one automatski koče odnosno otkočuju, a oba dejstva reguliše pritisak u primarnoj grani. U vožnji unazad više je izraženo prvo dejstvo. Sile kočenja na prednjim točkovima su u ravnoteži sa reaktivnim silama, pa momenat kočenja ne zavisi od koeficijenta trenja kočnih elemenata; nema, dakle, neuravnoteženosti. Sem toga, ako se menja koeficijent prianjanja jednog prednjeg točka, dolazi do neuravnoteženosti pritiska primarnih grana; normalna grana koja napaja prednje kočnice odmah uspostavlja ravnotežu; vozač može da produži kočenjem jer vozilo zadržava stabilnost i zadnji točkovi ne mogu blokirati.

Isti princip može se primeniti i kod kočnica sa diskom.

SERVO-KOČNICA. Komanda iz nekog pomoćnog izvora energije, takozvana *servo-kočnica*, ima za cilj da potpuno ili delimično zameni napor koji vozač vrši pritiskom na pedalu, dejstvom nekog *servo-uređaja*. Servo-uređaj može koristiti kao pogonsku silu potpritisak u usisnoj cevi motora (u taktu usisavanja), a može biti i čisto hidrauličnog tipa. Kod hidrauličnog servo-uređaja postoji pumpa koja obezbeđuje cirkulaciju komandnog fluida pod pritiskom. Kada se pritisne pedala kočnice, smanjuje se presek protoka. Pošto se učinak pumpe ne menja a presek potisnog kanala smanjuje, povećava se pritisak u cevovodu (mercedes).

UTICAJ STRUKTURE VOZILA

ŠASIJA. Automobilski pioniri nisu imali dovoljno iskustva o strukturi vozila, pa su pri izradi prvih automobila koristili rešenja koja su se uspešno pokazala u drugim oblastima. Od kola sa konjskom zapregom pozajmili su okvir i prilagodili ga za potrebe automobila. Da bi tako stvorenu šasiju ojačali, dodali su joj dva bočna nosača od drveta, a da bi nosači bili čvršći, obložili su ih limom. Od bicikla i tricikla pozajmili su cevasti okvir od mekog čelika, a cevi su vezali karikama i naglavcima. Gobron Brile (Gobron Brillé) je 1903. godine za trkačka kola razvio rešetkastu šasiju od cevi koja se može smatrati pretečom savremenih okvira trkačkih i sportskih automobila. Najzad, od železnice su pozajmljeni čelični profili; protiv ovog rešenja ima dosta zamerki, jer sklop od profilisanog čelika ne samo što je bio težak već i podložan deformacijama.

Počev od 1900. godine učinjen je napredak u postupku kovanja i hladnog oblikovanja lima koji je omogućio konstrukciju šasija sa dva bočna nosača i spojnim elementima, čiji je oblik računat u zavisnosti od opterećenja. Zasluga za ova usavršavanja pripada naročito fabrici Due (Douai) u Francuskoj za automobil arbel, Mercedesu u Nemačkoj, a nešto kasnije Delonej Belvilu (Delaunau Belleville).

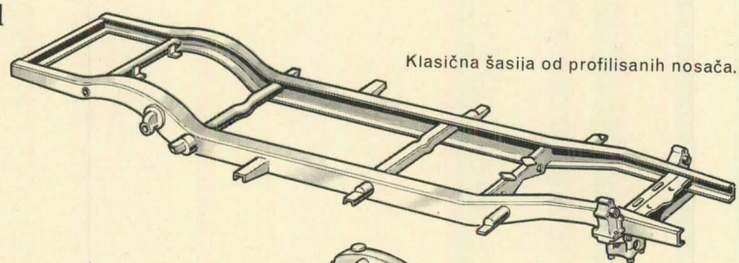
Ovaj oblik šasije postojao je sve do 1914. godine. Šasija je imala nekoliko varijanti: pomoćni okvir između nosača, takozvanu »lažnu šasiju«; svrha joj je bila da nosi motor; zatim pojačanje donjeg dela nosača metalnim pločama ispod motora i prenosnog mehanizma itd. Ovakva šasija ima niz prednosti: lako se montira, postoji mogućnost postavke raznih modela karoserija na isti okvir, otporna je na udare, lako se opravlja. S druge strane, mada se ovakva šasija smatra krutom, ipak poseduje izvesnu elastičnost, a to je nepovoljno za stabilnost vozila na putu.

U to vreme raspravljalo se o potrebi uvođenja veoma krute šasije, mada su C. T. Vejman (Weymann) i Tabito (Tabuteaux) bili predložili kompro-

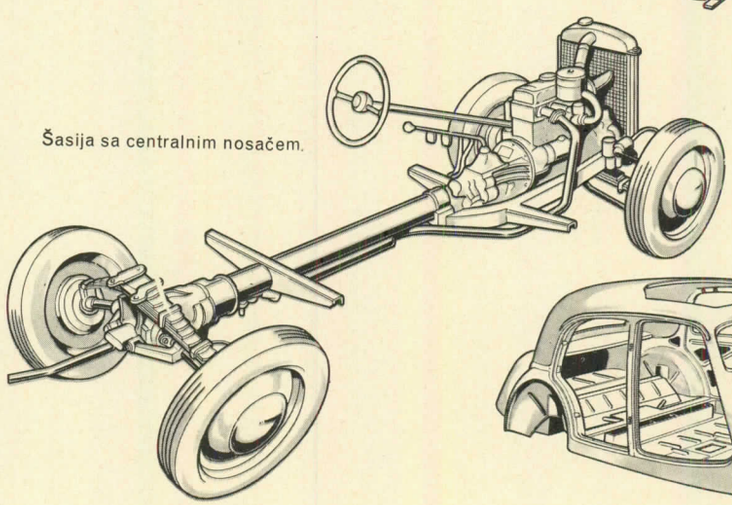
Stabilnost vozila na putu

Za konstruktore prvih automobila glavni problem je bio da dobiju krutu šasiju na koju su tada postavljali više-manje elastično oslonjenu karoseriju. Karoserija je bila elastično oslonjena radi veće udobnosti putnika, a ako je automobil bio predviđen za veće brzine, tada se problem stabilnosti rešavao na taj način što su se uvodili krući gibnjevi. Istovremeno su se trudili da pronađu pneumatike koji će što bolje prigušivati udare koji potiču od kolovoza, imajući uvek u vidu samo udobnost putnika, dok su pitanje stabilnosti vozila uzimali u obzir tek na drugom mestu.

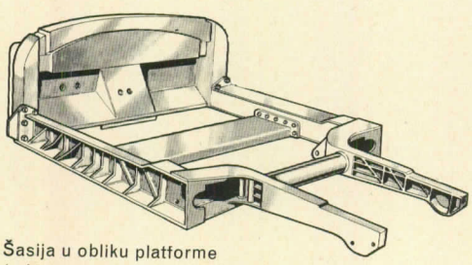
Povećanjem brzina konstruktori su uvideli da stabilnost vozila na putu zavisi od strukture elastičnog oslanjanja i pneumatika i da svakom od ova dva faktora treba odrediti njegov udeo u stabilnosti vozila.



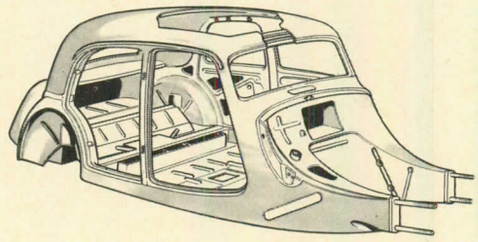
Klasična šasija od profilisanih nosača.



Šasija sa centralnim nosačem.



Šasija u obliku platforme
(od legure aluminijuma i silicijuma).



Samonoseća karoserija

misno rešenje: karoseriju koja se može deformisati, izrađenu od polučlankaste armature od drveta sa oplatom od imitacije kože. Posle radova Kasana (Cassan), zatim Brulijea (Broulhiet), koji su matematički dokazali da kruta šasija koja se ne deformiše ima bolji stabilitet, naročito u vožnji na krivinama, počela su se od 1930. godine tražiti rešenja za izradu krute šasije od profilisanog lima. Da bi postigli ovaj cilj, proizvođači su primenili razna rešenja; najpre je povećana visina centralnog dela nosača (sitroen C4 i C6 godine 1928); zatim je povećan broj poprečnih nosača [model dizenberg (Düsenberg) iz 1939. imao je sedam]; nešto kasnije uvedeni su poprečni i kesonski nosači. Ovi nosači ustupili su mesto okviru u obliku slova X, što je omogućilo ravnomernu raspodelu opterećenja. I, na kraju, pojavio se postupak »Bloctube« koji se i danas koristi. Uobičajeni U profil nestaje pred zatvorenim kesonskim nosačem, koji ima veliku otpornost na savijanje i uvijanje. Pored uticaja na stabilnost vozila, kruta šasija je pogodna za oslanjanje nezavisnih točkova. Zbog toga je Pežo ovakvu šasiju primenio kod svojih modela 201 i 301, a Sitroen kod modela »8«, »10« i »15« CV, kada su ove dve fabrike lansirale nezavisno oslanjanje prednjih točkova.

Kod šasije *sa centralnim nosačem* zamenjen je klasični okvir jednim nosačem duž uzdužne ose vozila; na krajevima nosač ima spreda produžetak u obliku viljuške za smeštaj motora, a pozadi pogonski most. Na ovoj centralnoj kičmi nalaze se konzole za pod, spojna mesta za karoseriju i pomoćne elemente (škoda 1926). Mercedes je uveo drugu varijantu: umesto jedne grede dva cevasta nosača stegnuta i spljoštena u sredini u obliku slova X.

Godine 1927. Sanso de Lavo (Sansaud de Lavaud) zamislio je *šasiju u obliku platforme*, koju je dalje razradio Gregoar (Grégoire). Gregoarova šasija je sastavljena od elemenata izrađenih od lakih i otpornih legura (od livenog aluminijuma ili legure aluminijuma i sicilijuma). Elementi su bili spojeni zavrtnjima (Amilkar-Hočkis, 1938).

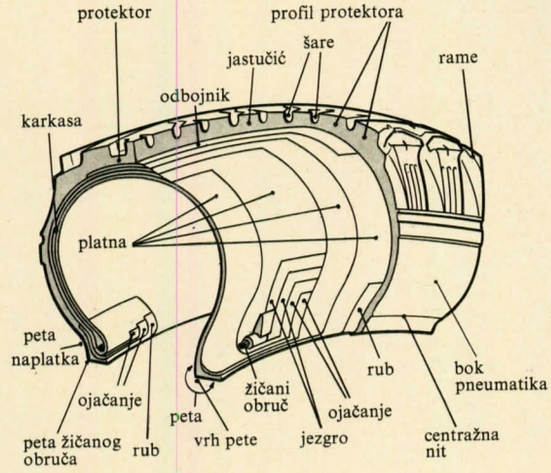
NOSEĆA KAROSERIJA. Koncepciji šasija-karoserija suprotstavila se koncepcija »noseće karoserije«, kod koje su se oba elementa (šasija i karoserija) spojile u jedinstvenu celinu: to je tzv. *»samonoseća karoserija«*. Samonoseća karoserija pojavila se još u prvim danima automobila; njen začetak nalazimo kod modela torpiljer (Torpilleur) Amedea Bolea sina (Amédée Bolléa) 1898. godine. Posle više raznih pokušaja prvi serijski proizvedeni automobil sa samonosećom karoserijom bio je automobil firme Lanča (Lancia) iz 1923. godine. Međutim, trebalo je da prođe još deset godina da bi ovo rešenje zainteresovalo proizvođače.

Samonoseća karoserija u svom najopštije usvojenom obliku predstavlja spajanje elemenata u jedan sklop koji čine donji stroj i nadgradnju — sanduk. Prvi model ovog načina izvođenja bila je augusta firme Lanča iz 1933. Pojava prednjeg pogona kod sitroena 1934. godine konačno je potvrdila vrednost samonoseće karoserije i njene nesumnjive prednosti: velika krutost na savijanje i uvijanje, mala težina, što smanjuje troškove proizvodnje, i laka montaža na traci.

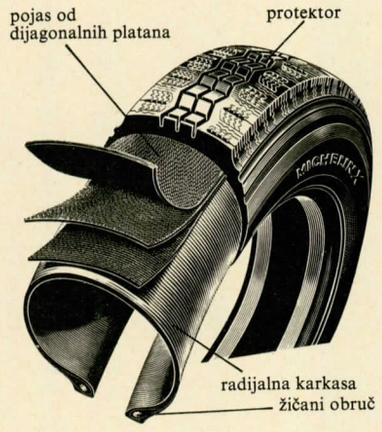
Na žalost, vek trajanja karoserije je kraći od veka trajanja voznog postroja. S druge strane, samonoseća karoserija teško se prilagođava promenama oblika koje povremeno nameće moda.

U toku razvoja strukture prevladala je, dakle, koncepcija: kruta struktura za kostur karoserije, koji će se »odenuti« oblikovanom oplatom, vratima i poklopcima. Na ovaj način mogu se vršiti razne izmene, bez bitnih promena same strukture. Pošto takva struktura manje zavisi od zahteva mode, mogla se posvetiti veća pažnja projektovanju kostura sa stanovišta veće bezbednosti putnika.

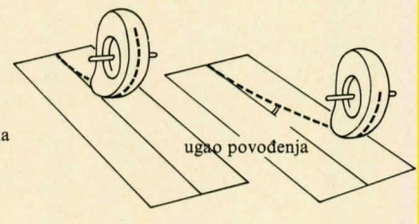
Najnovije rešenje u tom smislu potiče od Pininfarine, konstruktora karoserije vozila P. F. Sigma. Kabina kao sanduk koji se ne deformiše, i noseća struktura koja predstavlja produženje sanduka napred i pozadi, projektovana je tako da dozvoljenom deformacijom smanji energiju sudara. Poprečni nosači ispred i iza kabine izvedeni su kao koso postavljene ravni. U slučaju sudara, za vreme progresivne deformacije oslonaca organi voznog postroja mogu da klize ispod karoserije. Osovina upravljača je veoma kratka i spojena je sa točkom upravljača preko limenog levka sa dve pregrade. Otpornost osovine je tako proračunata da se ova može deformisati u slučaju nekog sudara. Velika »glavčina« točka upravljača i paoci su tapecirani. Tabla sa instrumentima elastično je postavljena. Sva četiri sedišta su odvojena, od kojih tri imaju naslone za glavu. Cela unutrašnjost kola je tapecirana, čime je postignuta izvesna sigurnost putnika i veća zvučna izolacija.



Normalni ili dijagonalni pneumatik.



Radijalni pneumatik.



Povođenje pneumatika pod dejstvom bočne sile.

UTICAJ PNEUMATIKA

Razvoj pneumatika je stalan i, bez sumnje, mnogo istrajniji nego što je to slučaj kod drugih delova automobila. Razvoj je uslovio snažan napredak automobila u pogledu njegove brzine, udobnosti i sigurnosti.

VRSTE PNEUMATIKA. Na svom putu razvoja pneumatici su pretrpeli znatne promene u pogledu oblika, pritiska punjenja, profila i dezena, kao i unutrašnjeg sastava. Danas razlikujemo dve osnovne vrste pneumatika: »klasične« ili »normalne«, ili pneumatike »sa dijagonalnom karkasom«, i »radijalne« pneumatike; razlika između dijagonalnih i radijalnih pneumatika je u rasporedu njihove unutarnje armature; pod armaturom treba razumeti sve što u pneumatiku nije od gume i što u neku ruku čini kostur pneumatika.

Klasični pneumatici. Za normalni pneumatik karakterističnа je osnovna konstrukcija ili karkasa izrađena od parnog broja naizmenično ukrštenih tekstilnih niti, čiji je ugao niti na vrhu pneumatika u odnosu na ravan simetrije 35° do 40°. Dijagonalno postavljena platna jedno na drugo obrazuju rešetku u obliku rombova promenljivih dimenzija i uglova u zavisnosti od promene ugla niti, shodno profilu pneumatika.

Radijalni pneumatici. Osnovno obeležje radijalnog pneumatika je u tome što je karkasa sastavljena od dva dela: *karkase u užem smislu* i *pojasa*. Karkasa u užem smislu sastoji se od radijalno raspoređenih niti od jednog do drugog ruba pneumatika; niti nisu, dakle, unakrsno postavljene; ovako lučno postavljene niti daju ovim pneumaticima, s jedne strane, veliku gipkost, a s druge strane, veliku otpornost na zamor. Niti su od tanke čelične žice. Ako su niti od tekstilnih vlakana velike otpornosti, tada se može čuti da se takav pneumatik naziva *»poluradijalan«*. Iznad karkase se stavlja neka vrsta »pojasa« od više slojeva unakrsno ispletenog tkiva; pojasevi su približno iste širine kao i spoljni deo pneumatika kojim se ovaj kotrlja po kolovozu, tzv. protektor. Protektor se malo ugiba i sprečava klizanje i zanošenje vozila.

UTICAJ PNEUMATIKA NA STABILNOST VOZILA NA PUTU. »Držanje puta« ili »ležanje vozila na putu« to su uobičajeni izrazi u svakodnevnom govoru za stabilnost vozila i njegovih pneumatika. Za većinu ljudi dobra stabilnost na putu znači isto što i otpornost vozila prema zanošenju, otpornost koja zavisi prvenstveno od istrošenja pneumatika i stanja puta (suv ili mokar, klizav, hrapav, itd.). Za stručnjaka, vozilo je stabilno na putu ako tačno sledi postavljenu putanju kretanja bez obzira na to kakve suprotne sile deluju na vozilo, ali pod uslovom da nema nikakvog klizanja.

Pneumatik utiče na stabilnost svojom osobinom što može da se bočno ugiba, i svojstvom povođenja, kao posledicom bočnog ugiba.

Povođenje. Kad je pneumatik izložen dejstvu neke bočne sile upravno na njegovu osu (na primer uticaj bočnog vetra), on se ugiba; u stvari, on se ne kreće više po kolovozu u pravcu svoje središne ravni već putanjom koja sa ovim pravcem čini takozvani *ugao povođenja*. Za svaki pneumatik, ugao povođenja zavisi od opterećenja vozila i pritiska punjenja; pri datom opterećenju ugao je veći ukoliko je pritisak u pneumatici manji; ukoliko je povođenje manje, utoliko se vozilo pravilnije kreće pravcem koji vozač želi. Zbog veće sigurnosti povođenje prednjih pneumatika mora biti veće od povođenja zadnjih. To je zapravo razlog što kod vozila sa jednakim opterećenjem prednje i zadnje osovine pritisak u prednjim pneumaticima mora biti manji od pritiska u zadnjim. Ovo pravilo važi za normalne uslove eksploatacije pneumatika i vozila; na trkama ili na reli-takmičenjima mogu se ponekad postaviti i drugi uslovi pored uslova sigurnosti.

Kada se vozilo pod dejstvom centrifugalne sile zanese ka spoljnoj strani krivine, povođenje pneumatika još više povećava ovu deformaciju putanje: povođenje prednjih pneumatika smanjuje upravljivost vozila, a povođenje zadnjih pneumatika povećava upravljivost prednjih pneumatika. Kada je povođenje prednjih pneumatika veće, tada je upravljivost vozila *nedovoljna*, a kada je povođenje zadnjih pneumatika veće, tada je upravljivost vozila *suvišna*. Suvišna upravljivost ima za posledicu nestabilnost vozila pri velikim brzinama; manje povođenje pneumatika ili njihova veća bočna krutost igra značajnu ulogu za stabilnost vozila.

Prema tome, od proizvođača pneumatika se, između ostalog, zahteva da se pneumatik što manje povodi i da pri tom ne gubi ostale dobre osobine. Radijalni pneumatici imaju veoma meke bokove koji poboljšavaju udobnost pri vožnji, a njihovi pojasevi koji se, praktično uzev, ne mogu bočno da ugibaju, smanjuju ne samo povođenje već i klizanje, dakle, istrošenje i otpor kotrljanju. Znači, radijalni pneumatik predstavlja veoma veliki napredak u razvoju pneumatika.

OPREMA VOZILA PNEUMATICIMA. Pri opremi vozila pneumaticima kao i pri određivanju pritiska punjenja mora se voditi računa o ponašanju vozila. Od velikog uticaja je i način pogona. Kod prednjeg pogona najčešći je slučaj nedovoljne upravljivosti, dok je kod pogona »sve pozadi« upravljivost suvišna; vozilo sa klasičnim rasporedom (motor napred a zadnji točkovi pogonski) može imati suvišnu i nedovoljnu upravljivost, ili da se neutralno ponaša. Posle dugih ispitivanja, proizvođači pneumatika su sastavili tablice iz kojih se može videti pritisak punjenja za svaki model automobila. Pritisak je, svakako, jedan od faktora koji utiču na dobro ponašanje vozila na putu i na njegovu sigurnost.

OBELEŽAVANJE PNEUMATIKA. Dimenzije današnjih pneumatika označene su sa dve skupine brojeva koji su odvojeni znakom (x) ili (—). Brojevi su reljefno istaknuti na boku pneumatika. Izuzev kod pneumatika za posebne svrhe (pneumatici sa visokim pritiskom, pneumatici za ručna kolica itd.), prva skupina brojeva označava širinu napumpanog pneumatika, a druga prečnik onog dela pneumatika koji se montira na naplatak (unutrašnji prečnik pneumatika). Dimenzije su izražene u milimetrima, centimetrima ili colovima; međutim, dimenzije prve i druge skupine brojeva ne moraju biti istog mernog sistema.

Postoji i jedan izuzetak: kod nekih velikih pneumatika umesto prve grupe brojeva nalazi se neko slovo (D, E, F, itd.) ili neki broj (4, 5, itd.) koji uslovno označava širinu napumpanog pneumatika.

OBELEŽAVANJE NAPLATAKA. Naplaci se obeležavaju ili prema dimenziji pneumatika koji se montira na naplatak, ili sa dve skupine brojeva. Jedna skupina označava prečnik naplatka na mestu gde pneumatik naleže, a druga unutrašnju širinu naplatka. Redosled oznaka na naplatku može se menjati. Ako u obeležavanju naplatka postoji neko slovo, to se obično odnosi na visinu ruba naplatka. Kao i kod pneumatika, veličine se iskazuju u milimetrima, centimetrima ili colovima.

Na naplatak određene širine mogu se montirati pneumatici različitih širina pod uslovom da je prečnik pneumatika jednak prečniku naplatka.

UTICAJ ELASTIČNOG OSLANJANJA

PRINCIP OSLANJANJA. Oslanjanje utiče na stabilnost vozila na putu i na udobnost putnika. Kad ne bi bilo elastičnog oslanjanja, ne bi bilo moguće povećanje brzina iznad neke određene granice: udari usled neravnina i rupa na putu postali bi toliko česti da se karoserija ne bi mogla održati u ravnoteži, a da se i ne pominje koliko bi potresi bili neprijatni za putnike.

Oslanjanje, u suštini, ne predstavlja ništa drugo već kompromis. U gornjem delu vozila smešteno je sve što nema veze sa kretanjem: karoserija, unutrašnja oprema, putnici itd. Ovaj deo je, u stvari, *elastično oslonjena masa vozila*. Oslanjanje mase se izvodi na taj način što se između točkova i sanduka umetne neki elastični sistem koji je sposoban da primi normalna kao i neka povremena dopunska opterećenja karoserije; dalje, sistem mora biti sposoban da prihvati takve ugibe kako bi udari neravnina na točkove bili u granicama podnošljivosti. U donjem delu vozila nalaze se neelastično oslonjene mase (točkovi i osovine) vezane sa elastično oslonjenim masama.

KRUTOST I VERTIKALNO POMERANJE. Izolacija elastično oslonjenih masa zavisi od krutosti opruga koje predstavljaju elastični oslonac. Posmatrano sa teorijskog stanovišta, opruge bi trebalo da budu bezgranično gipke da bi odgovorile svom zadatku. Kada bi se ovaj uslov mogao i praktički da ostvari, ne bi bio poželjan. U stvari, za sistem sanduk-opruge merodavno je *vertikalno pomeranje*, tj. visina iznad tla na kojoj se nalazi sanduk kada je normalno opterećen. Ovo pomeranje je u direktnoj srazmeri sa krutošću opruga. Sem toga, vertikalno pomeranje se mora ograničiti i zbog toga što treba voditi računa o oscilovanju sistema. Vertikalno pomeranje karoserije nije konstantno. Pri vertikalnom pomeranju mogu se pojaviti dve vrste promena. Prva je statička. Statička promena nastaje kad se sanduk dopunski optereti, što izaziva novo uleganje opruga; ravnotežno stanje vozila je poremećeno sve dok se ne uspostavi novo stanje ravnoteže, tj. novo stanje niže od ranije visine vozila. Druga vrsta promene je dinamičkog karaktera; ova promena se javlja čim se promeni karakter puta ili, tačnije, kad se sa ravnog pređe na neravan put. Točkovi se podižu a sanduk po inerciji nastoji da ostane u prvobitnom vodoravnom položaju. Opruge se ponovo sabijaju, a vertikalno pomeranje se menja sve do trenutka kad reakcija opruge postane dovoljno velika da podigne sanduk. Ukoliko je krutost opruga manja, utoliko će biti duže njeno »vreme odgovora«.

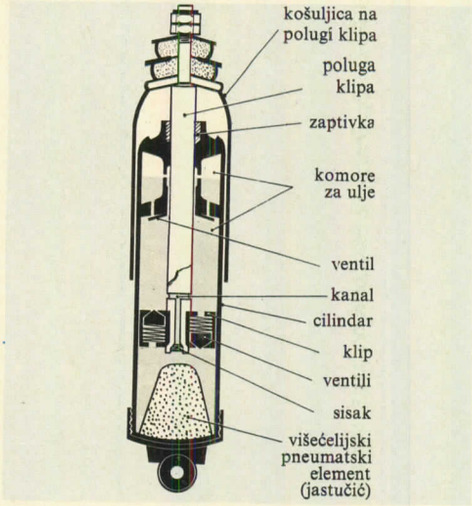
REZONANCIJA ELASTIČNO OSLONJENIH MASA. Ako se zahteva da se odredi krutost koja odgovara elastičnom oslanjanju *konstantne krutosti*, gde je krutost proporcionalna opterećenju opruga, treba uzeti u obzir broj oscilacija sistema masa-opruga, kao što je to slučaj kod klatna. Ako se takav sistem izvede iz svog ravnotežnog položaja, on će nastojati da se vrati u isti položaj, ali će ga preći i počeće novo oscilovanje posle koga će slediti još nekoliko oscilacija.

Ove periodične oscilacije karakteristične su po svom periodu, ili vremenskom intervalu između dva uzastopna prelaženja puta u istom smeru u odnosu na ravnotežni položaj. Dužina perioda zavisi od krutosti opruge; što je opruga manje kruta, period je duži. Ljudski organizam može bez neprijatnosti da podnosi samo periode između 0,5 i 1 sekunde. Ovaj uslov ograničava moguću krutost opruge.

S druge strane, treba izbeći pojavu rezonanse produženih oscilacija. Kada se sistemu koji osciluje dodaju ubrzavajući impulsi istim ritmom koji ima početno kretanje, amplitude oscilacija mogu beskonačno da rastu. To se može dogoditi na putu kad je brzina vozila tolika da je vreme potrebno za prelaz dve uzastopne periodične neravnine jednako vremenu perioda elastičnog oslanjanja. Amplituda kretanja može tada da bude tako velika i da dovede u pitanje sigurnost putnika i vozila.

Nalazimo se suočeni sa sistemom koji akumulira svu energiju dobijenu u obliku periodičnih impulsa, koji se sabiraju umesto da se međusobno suprotstavljaju. Da bi se pak poništili, dovoljno je da se ova energija apsorbuje mehaničkim trenjem, tj. pretvaranjem energije u toplotu. Tu funkciju obavlja *amortizer*.

AMORTIZER. Klasični mehanički amortizer zasnivao se na trenju dve ravne, međusobno stegnute



Hidraulični amortizer.

površine. Umesto ovog, primenjen je amortizer sa *viskoznim dejstvom*. Ovakav amortizer se sastoji od jednog cilindra u kom se nalazi ulje; u cilindru se kreće klip koji je vezan za elastično oslonjenu masu (karoseriju) vozila, a cilindar je vezan za točak. Između cilindra i klipa postoji zazor, »deš--pot« (dash-pot), koji omogućava protok ulja u cilindru zavisno od hoda klipa. Viskozni otpor prigušivanja proporcionalan je brzini istiskivanja klipom u odnosu na zapreminu cilindra. Hidraulični amortizer predstavlja jednu vrstu amortizera sa viskoznim dejstvom. Razlikuje se od opisanog tipa samo po tome što kod hidrauličnog nema »dash--pot«-a, pošto ulje kod njega protiče kroz otvore u klipu.

Amortizer ima dvostruku ulogu: s jedne strane da prigušuje oscilacije, a s druge strane da parališe reakcije neelastično oslonjene mase. Točkovi su glavni predstavnici neelastično oslonjene mase i kao takvi oni imaju i najveći uticaj. Točak je delimično elastično oslonjen; pošto se, u stvari, pneumatik elastično ugiba, poprečno i upravno na naplatak i ima izvesnu moć apsorpcije s obzirom na njegovu sposobnost da »guta« manje prepreke zahvaljujući elastičnoj deformaciji na površini prianjanja.

Pneumatik sam nije dovoljan da potpuno poništi reakcije neelastično oslonjenog dela mase u odnosu na elastično oslonjeni deo. Sve se zbiva kao da neelastična masa obrazuje, između pneumatika i opruge, neki mehanički oscilator koji može da stupi u rezonanciju sa periodičnim impulsima točka. Rezultat je stalno titranje neelastično oslonjenih masa, usled čega se smanjuje moć prianjanja pneumatika; titranje se ritmički ponavlja i parališe upravljanje vozilom.

Poznat je i tako konstruisan amortizer koji prigušuje ove oscilacije. Tako se govori o amortizeru dvostrukog dejstva, jer dejstvuje u oba smera. Na nekim automobilima (na primer na sitroenu 2 CV) ugrađen je specijalni amortizer na principu klatna, koji prigušuje oscilacije točka. Ugrađuje se na glavčinu točka.

PNEUMATSKO ELASTIČNO OSLANJANJE I PROMENLJIVA KRUTOST. Udobnost i stabilnost na putu su mnogo bolji ako je krutost sistema elastičnog oslanjanja promenljiva u zavisnosti od opterećenja vozila. Na ovu činjenicu ukazao je inženjer Gregoar i dokazao da je vertikalno pomeranje vozila konstantno pri smanjenju krutosti pod opterećenjem; i da nisu potrebni ispravljači za vertikalno pomeranje.

Kod savremenih sistema elastičnog oslanjanja primenjen je u većoj ili manjoj meri zakon koji glasi da nema pravilnog elastičnog oslanjanja ukoliko

se krutost ne menja automatski i u zavisnosti od opterećenja. Rezultat ovoga je uvođenje pneumatskog ili hidropneumatskog oslanjanja kod automobila.

Sistem oslanjanja Sitroen. Elastični sistem oslanjanja sa pneumatskim ili uljopneumatskim organima postao je popularan kad su se pojavili Sitroenovi automobili DS 19 sa četiri nezavisna točka. Model DS 19 je takođe pokazao da se kod serijskog automobila mogu primeniti razni »pomoćni« sistemi, na primer za upravljanje ili primenu stepena prenosa. Isto tako, primenjen je mešoviti sistem kočnica (disk na prednjim i doboš na zadnjim točkovima) mada ovaj automobil nije imao ni »sportskih« ni »trkačkih« pretenzija.

Sistem hidropneumatskog oslanjanja kod DS 19 uveden je posle primene istog sistema na zadnjim točkovima modela 15 CV, pa nije predstavljao neko iznenađenje. Svaki točak je oslonjen na jedan oscilujući sklop, koji je preko klipa vezan sa loptom napunjenom gasom pod pritiskom. Sama težina vozila sabija gas preko tečnosti koja služi kao posrednik; gas i tečnost su odvojeni membranom. Automatski ispravljači smešteni na prednjoj i zadnjoj osovini regulišu pritisak, tako da uvek odgovara opterećenju vozila i otpora u trenutku savlađivanja prepreka. Stabilizator aktivira servo-razvodnike. Za prigušivanje služi uređaj smešten između cilindra u koji ulazi klip ramena vešanja i kompresiona lopta sa gasovima. Pri udaru klip ulazi u cilindar, a tečnost potisnuta kroz kalibrisane otvore sabija gasove iza membrane. Na povratku, širenje gasova potiskuje tečnost ka klipu. To je, uostalom, princip svakog hidrauličnog amortizera.

Sistem oslanjanja hajdrolastik (Hydrolastic). Kod britanskog sistema oslanjanja hajdrolastik-opruge su od gume u obliku konusa. Gumene opruge su cevima hidraulički spojene i na taj način je prinudno usklađeno kretanje točkova na istoj strani vozila; na primer, levog prednjeg i levog zadnjeg točka. Oscilujuća poprečna vođica sabije gumene elemente kada se prednji točak podigne. Klip pomera konus, a konus sabija tečnost i potiskuje je pod pritiskom ka odgovarajućem zadnjem točku; tečnost prisiljava točak da se kreće suprotno prethodnom kretanju. Takav sistem oslanjanja sa međusobno povezanim točkovima može se, uostalom, postići i mehaničkim putem pomoću Monžeovog (Monge) balansera, kao što je izvedeno na Sitroenovom modelu 2 CV.

Sistem oslanjanja aerostabl (Aérostable). Kombinovano rešenje susreće se kod sistema oslanjanja sa čeličnim oprugama i dopunskim hidrauličnim uređajima. Ovakvo kombinovano oslanjanje ostvario je Gregoar kod Renoovog automobila dofin (Dauphine). Ostajući veran svom principu promenljive krutosti, Gregoar je projektovao kombinovani sistem elastičnog oslanjanja, koji je nazvao aerostabl. Klasičnom sistemu sa spiralnim oprugama i hidrauličnim teleskopskim amortizerima Gregoar je dodao još jedan uređaj koji služi kao ispravljački dopunski element. Sistem predstavlja potpunu celinu. Mada su zadržane helikoidalne opruge karakteristične kod normalnih sistema oslanjanja, njihova krutost je ipak osetno smanjena: ugib od 72 mm umesto 32 mm na prednjim točkovima za 100 kg i 42 mm na zadnjim umesto 17 mm. Sa ovim sistemom oslanjanja i pri minimalnom opterećenju vozila (sam vozač u kolima) vožnja je vrlo udobna. Kad se poveća opterećenje vozila, opruge se više ugibaju nego kod klasičnog sistema, a pomoćni uređaji stupaju odmah u dejstvo. Pomoćni uređaji na prednjim točkovima sastoje se od gumenih čepova posebnog oblika i okružuju polugu teleskopskih amortizera; na zadnjim točkovima pomoćne uređaje čine pneumatski jastučići ispunjeni vazduhom pod atmosferskim pritiskom. Klipovi sabijaju ove »atmosferske jastučiće« zavisno od opterećenja vozila. Kada se opterećenje poveća, krutost ovih dopunskih uređaja brzo opada prema krivoj, tačno definisanoj oblikom gumenih čepova na prednjem mostu, klipovima i atmosferskim jastučićima na zadnjem mostu. Njihovo dejstvo sa dejstvom čeličnih opruga konstantne krutosti ima progresivnu karakteristiku.

Kod praznih automobila opremljenih sistemom aerostabl visina je skoro ista kao kod automobila sa klasičnim oslanjanjem, ali već sama težina vozača dovoljna je da se kola nagnu, odnosno da se za vreme vožnje spuste niže. Na taj način spušta se težište, što povoljno utiče na stabilnost vozila na putu, dok se na prednjoj osovini smanjuje pozitivni nagib točkova što, sa svoje strane, povoljno deluje na stabilnost u krivinama.

Upravljanje vozilom

Da bi se promenio smer kretanja vozila kao i da bi mu se omogućilo da se kreće zacrtanom putanjom, treba usmeriti točkove u odnosu na uzdužnu osu vozila. Svi delovi vozila koji učestvuju u tom usmeravanju točkova obrazuju mehanizam za upravljanje ili jednostavno *sistem za upravljanje*, a sama operacija usmeravanja kretanja točkova je *upravljanje*.

Prednji točkovi služe, po pravilu, za upravljanje vozilom: to su upravljački točkovi. Kada bi se vozilom upravljalo zadnjim točkovima, upravljanje bi bilo suviše kruto jer bi se centrifugalna sila pri skretanju vozila pridružila sili upravljanja. Upravljački točkovi rade na principu obrtanja njihovog rukavca oko vertikalne ose u blizini srednje ravni svakog točka. Pošto se rukavci mogu zaokretati oko svoje osovinice, osovina točkova zadržava uvek položaj upravan na uzdužnu osu automobila.

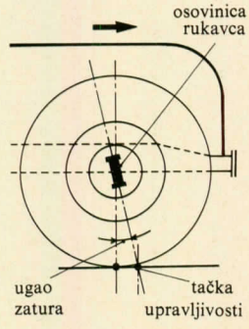
KARAKTERISTIKE SISTEMA ZA UPRAVLJANJE

Prednji ili upravljački most sastoji se od prednje osovine ili od *ramena* oslanjanja kod sistema sa nezavisno oslonjenim točkovima, *rukavaca* i *točkova*. Svi ovi elementi moraju se međusobno uklopiti po nekim geometrijskim zakonima kako bi se postigla dobra stabilnost na putu i smanjilo istrošenje pneumatika. Geometrijski parametri koji utiču na položaj upravljačkih točkova su: *zatur*, *nagib osovinice rukavca*, *nagib točkova i usmerenost točkova*.

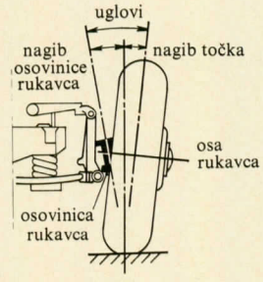
ZATUR. *Zatur* osovinice rukavca je položaj osovinice u odnosu na njenu uzdužnu ravan. Kada je gornji kraj osovinice nagnut ka zadnjoj strani vozila, zatur je pozitivan; produžena osa osovinice rukavca prolazi kroz ravan kolovoza u tački koja se nalazi ispred središta dodirne površine pneumatika na kolovozu. I obrnuto, zatur je negativan kada je osovinica rukavca nagnuta ka pramcu vozila. U ovom slučaju produžena osa osovinice rukavca prolazi kroz ravan kolovoza u tački koja se nalazi iza središta dodirne površine pneumatika na kolovozu. Kod pozitivnog zatura, kada točak nije više paralelan sa uzdužnom osom vozila, usled otpora kotrljanja pneumatika nastaje momenat stabilizacije točka, tj. točak nastoji da se vrati u položaj kretanja po pravoj liniji. Ova se pojava često naziva *povratno* upravljanje. Zatur kod automobila sa prednjim pogonom uvek je veoma mali. Ako neka spoljna sila bočno dejstvuje na vozilo — na primer bočni vetar — pozitivan zatur nastoji da ispravi smer kretanja. Zbog toga se vozilo i na uzdignutim krivinama (autodromi) samo ispravi. Zajedno sa nagibom i usmeravanjem točkova zatur povećava stabilnost vozila.

NAGIB OSOVINICE RUKAVCA. Dok je zatur nagib osovinice rukavca po uzdužnoj ravni, *nagib osovinice* je ugao u vertikalno poprečnoj ravni sa osom vozila. Na neki način gornji kraj ose rukavca nagnut je ka središtu vozila. Ovakva postavka pruža mogućnost da njena produžena osa seče ravan kolovoza u tački u kojoj se nalazi središte dodirne površine pneumatika. U tom slučaju, na upravljanje ne utiču reakcije izazvane nailaskom jednog upravljačkog točka na neku prepreku. U protivnom, u tom trenutku došlo bi do zaokreta rukavca oko njegove osovinice. Pored toga, u trenutku kada točkovi zaokreću, kraj rukavca se naginje ka horizontalnoj ravni i nastoji da se približi kolovozu, što mu točak, međutim, ne dopušta. Umesto toga, podiže se osovina točka i istovremeno uzdiže prednji deo vozila. Kada se završi skretanje točkova, težina vozila vraća osovinu u prvobitni položaj, pa se i točak ispravlja u pravcu vožnje. Kada je upravljanje povratno, vozač može da pusti točak upravljača i on će se sam vratiti u svoj prvobitni položaj.

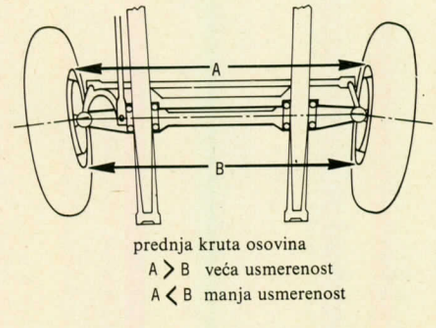
BOČNI NAGIB TOČKOVA. Ravan točkova nije upravna na kolovoz već je nagnuta prema vertikali za izvestan ugao, a osa rukavca točka nagnuta je prema horizontali za isti ugao. Ovim se postiže izvesna prednost na ispupčenom kolovozu. Nagib točka je *pozitivan* kada je točak gornjim delom nagnut ka spoljnoj strani vozila. Nagib točka je *neutralan* kad je njegova ravan kotrljanja u vertikali. Nagib točka je *negativan* kada je točak gornjim delom nagnut ka unutrašnjosti vozila. Nagib prednjih točkova omogućava da se vertikalne reakcije



Ugao zatura.



Nagib osovinice rukavca i bočni nagib točka.



prednja kruta osovina
A > B veća usmerenost
A < B manja usmerenost

Usmerenost točkova.

tla prenesu što bliže korenu rukavca. Nagib osovinice rukavca zajedno sa nagibom točka omogućava da se tačka prodora produžene ose osovinice rukavca postavi bliže centru dodirne površine pneumatika na kolovozu. Nagib točkova i nagib ose rukavca doprinose stabilnijem upravljanju; upravljanje je manje osetljivo kad sile vuče ili kočenja ne dejstvuju simetrično. Ako kočnice ne koče ravnomerno, na primer, jedan točak koči jače, kočna sila neće prisiljavati točak da se zakrene oko osovinice rukavca pošto se dejstvo sile prenosi po produženoj osi obrtanja. Isto tako ni bočni udari tla neće izazvati skretanje točkova. Po novim koncepcijama konstrukcije automobila dovodi se u pitanje potreba nagiba točkova; u praksi ugao nagiba, koji obično ne prelazi 1°, sve više se približava nuli.

USMERENOST TOČKOVA. Kada je pogon vozila na zadnjim točkovima, pogonska sila prenosi se na prednju osovinu preko šasije i sistema oslanjanja. Prednji upravljački točkovi pružaju otpor i nastoje da se razmaknu. Da bi se njihovo razmicanje sprečilo, smanjuje se rastojanje prednjih delova točkova tj. oni se primiču ka uzdužnoj osi vozila. To se naziva usmerenost.

Usmerenost točkova meri se razlikom rastojanja na prednjem i zadnjem delu točkova; ta razlika je obično od 1 do 4 mm. Ako su, pak, točkovi istovremeno upravljački i pogonski (prednji pogon), nastojaće da se primaknu, pa ih zbog toga treba međusobno razmaknuti. Primicanjem odnosno razmicanjem postiže se paralelno kretanje točkova čija je tendencija da se u vožnji usmere.

Nagib i usmerenost točkova sve više gube značaj kod savremenih automobila s obzirom na to da se danas grade ravni putevi. Ugao zatura se smanjuje, a zadržava se nagib osovinice rukavca.

UPRAVLJAČKI MEHANIZMI

Klasični sistem upravljanja vozilom nazvan »upravljanje su krutom osovinom« sastoji se od *točka upravljača* koji je naglavljen na *osovinu upravljača* preko koje se, posredstvom *prenosnih mehanizama* sastavljenih od poluga i spona, upravlja točkovima postavljenim na *rukavce*. Da bi se smanjio napor vozača pri zaokretu točka upravljača, postavlja se između osovine upravljača i sistema poluga i spona neki prenosni mehanizam, koji je obično smešten u *kućici* upravljačkog mehanizma. Ovaj prenosnik ima za cilj da omogući potrebnu redukciju prenosa. Kod teških teretnih, kao i kod nekih putničkih automobila (Sitroenovi modeli ID i DS) postoje *servo-upravljači* koji koriste neki pomoćni izvor energije (sabijeni vazduh, hidraulični pritisak). Servo-upravljač automatski stupa u dejstvo zakretanjem točka upravljača.

PRENOSNI MEHANIZAM. Za usmeravanje točkova u željenom pravcu vozač treba da uloži znatan napor koji se pogodnim načinom može smanjiti. Ako je, na primer, prednja osovina vozila opterećena sa 500 kg i ako je koeficijenat trenja na kolovozu 0,6 za usmeravanje točkova potrebna je sila od $500 \times 0{,}6 = 300$ kg; međutim, maksimalna sila kojom vozač može da dejstvuje, bez preteranog zamora, ne prelazi 30 do 35 kg.

Smanjenje sile zavisi, na prvom mestu, od prečnika točka upravljača. Pri okretanju točka upravljača dejstvuju dve jednake sile obrnutog smera i tangencijalno na obimu točka upravljača. One obrazuju obrtni momenat. Što je veći prečnik točka upravljača, veći je momenat, pod uslovom da su sile jednake. Veličina točka upravljača međutim ipak je ograničena, preveliki točak je glomazan, a, osim toga, kod prevelikog točka veliki je i luk zakretanja.

Prenosni reduktorski mehanizam smešten je u kućici upravljača; to je glavni faktor koji omogućava da se smanji napor vozača. Postoji više vrsta prenosnih mehanizama: kod sistema *zavrtanj-navrtka*, na kraju osovine upravljača nalazi se zavrtanj sa navrtkom, koja se ne može okretati. Translatorno kretanje zavrtnja pretvara se u obrtno kretanje pomoću poluge spregnute sa navrtkom, koja pokreće rukunicu upravljača. Umesto navrtke, može biti segment na čijoj se osovini nalazi rukunica; to je sistem *puž-pužni segment*. Zavrtanj može imati globoidni oblik koji omogućava smanjenje broja zuba segmenta. Navrtka može biti nazubljena i uzubljivati se u segment spregnut sa rukunicom. Između zavrtnja i navrtke mogu biti takođe kuglice koje obezbeđuju lakše obrtanje i mirniji hod upravljača. Kuglice nastoje da izađu iz svog grlića na jednom kraju navrtke i tu ispadaju iz navoja na zavrtnju, pa se posebnim kanalom vraćaju na drugi kraj navrtke. Ovakav prenosni mehanizam naziva se mehanizam sa *kružnim tokom kuglica*.

Kod prenosnog mehanizma *zavrtanj-valjčić*, na kraju osovine upravljača, nalazi se helikoidalno ožlebljeni valjak promenljivog koraka; prenosni odnos je manji pri naglom nego blagom zaokretu točkova. Rukunica je spregnuta sa valjčićem koji pri zaokretu točkova klizi po žlebovima.

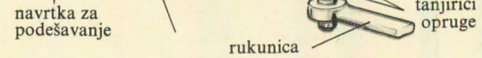
Za upravljanje prednjih nezavisno oslonjenih točkova sve više se upotrebljava upravljački mehanizam sa *nazubljenom polugom;* ovakav sistem upravljanja se može sresti na skoro svim evropskim automobilima kod kojih je poželjno lako upravljanje u krivinama. Na kraju osovine upravljača nalazi se cilindrični zupčanik koji je spregnut sa jednom kliznom polugom sa pravim ili kosim ozubljenjem; poluga se kreće u kućici, koja je poprečno postavljena na osovinu upravljača. Na oba kraja poluge pričvršćene su spone pomoću elastičnih zglobova, dok su spone svojim drugim krajem zglobno vezane sa rukunicama rukavaca.

POLUGE I SPONE SISTEMA ZA UPRAVLJANJE. Svrha poluga i spona u sistemu za upravljanje je da prenesu silu vozača na rukavce upravljačkih točkova. Na izlaznom vratilu prenosnog mehanizma pričvršćena je *rukunica* koja aktivira polugu upravljača, tzv. *potisnu sponu*, čije se kretanje prenosi na *rukunicu* spone. Ova rukunica okreće rukavac na osovinici i upravlja točkom koji se nalazi s njene strane. Skretanje drugog upravljačkog točka vrši se preko *poprečne spone* i *rukunica rukavca*. Kad su prednji točkovi nezavisni, tj. svaki točak ima svoj oslon, umesto krute poprečne spone mogu biti više spona koje su međusobno zglobno spojene na razne načine. Zglobni spojevi su obično sa jabučicom u čauri. Pomoću opruge obezbeđena je dovoljna elastičnost zglobnog spoja, a istovremeno se automatski podešava zazor.

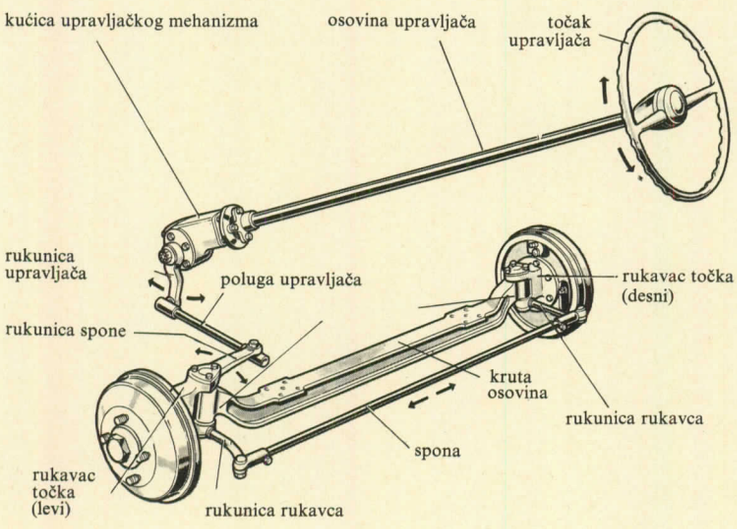
Pri zaokretu putanje sva četiri točka moraju obrazovati koncentrične krugove; u protivnom nastaje bočno klizanje točkova. Zbog toga se produžena osa svakog rukavca prednjih točkova mora seći u tački koja se nalazi na produženoj osi zadnje osovine. Ova tačka je momentani centar zaokreta vozila. Upravljački točkovi moraju biti tako podešeni da mogu zaokretati pod raznim uglovima; ovaj uslov zahteva da položaj rukunica rukavaca bude takav da se njihove produžene ose sreću u tački koja se nalazi u osi simetrije vozila i u visini zadnje osovine. To je u saglasnosti sa Žantoovim (Jeantaud) planom koji se danas uglavnom koristi za projektovanje upravljačkog mehanizma.

Prednji i zadnji pogon

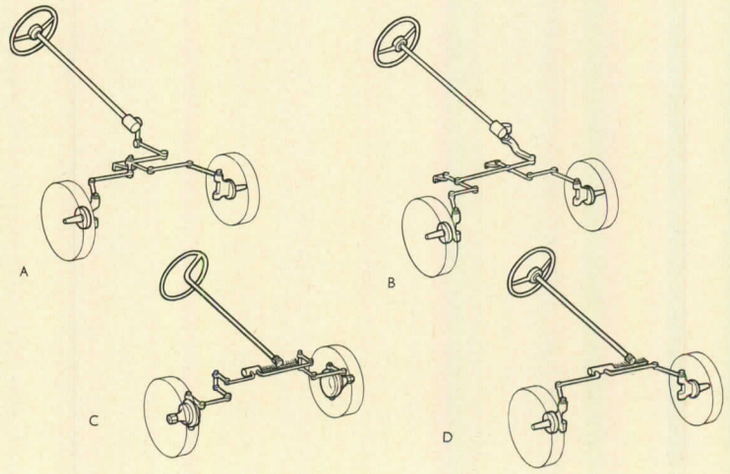
Počev od prvih dana automobila, konstruktori su se kolebali pri izboru pogona: pogon na prednju ili zadnju osovinu. Kinjoov tricikl imao je samo jedan



Zglobni spoj spona i poluga.



Sistem za upravljanje na krutoj osovini (klasični sistem).



Različita izvođenja sistema za upravljanje.

prednji točak, koji je istovremeno bio pogonski i upravljački točak. Ali već prvi korisnici parnog kotla adaptiranog za drumsku vuču požurili su da pogon postave na zadnjem delu vozila. U prvom slučaju vozilo je bilo *vučeno*, a u drugom *gurano*. Stručnjaci se nisu ni do danas složili koji je najpogodniji način pogona, prednji, ili klasično rešenje sa motorom napred i pogonom na zadnjoj osovini ili sa motorom u zadnjoj trećini vozila. U jednoj istoj fabrici danas se primenjuju najmanje dva od tri moguća rešenja pogona. Istina je takođe da se proizvođači pri izboru pogona rukovode više ekonomskim nego čisto tehničkim razlozima.

PREDNJI POGON

Prednji pogon sačinjavaju: blok motora, menjač, glavni i diferencijalni prenosnik, a smešten je upravno na osi prednjih točkova. Kretanje se prenosi bočno na točkove preko poluvratila, od kojih svako ima kardanski i homokinetički zglob. Homokinetički zglob još nije usvojen bez pogovora pa ga proizvođači često izbegavaju kod malih i srednjih vozila, posebno zbog proizvodnje, ovako složenih delova automobila. Ipak izgleda da je ovaj zglob neophodan za pravilan prenos snage motora pri vožnji u krivinama, što je, uostalom, uslov i za stabilnost vozila. U poređenju sa klasičnim, prednji pogon je jednostavniji i lakši. Kod prednjeg pogona nema uzdužnog prenosnog vratila, a poznato je da ovo vratilo uzima skoro ceo prostor između osovina i otežava spuštanje težišta vozila, osim ukoliko se na podu karoserije predvidi »tunel« za prolaz vratila. Rešenje sa tunelom, međutim, nije najpovoljnije ni sa stanovišta udobnosti putnika u vozilu.

ZADNJI POGON

»Sve pozadi« po svom sastavu odgovara prednjem pogonu; do ovakvog rešenja došlo se, verovatno, u nastojanju da se sačuvaju prednosti prednjeg pogona, ali bez onih komplikacija koje stvaraju poluvratila, koja istovremeno treba da budu pogonska i upravljačka. Rešenje »sve pozadi« omogućilo je nezavisno oslanjanje sva četiri točka. Sistem nezavisno oslonjenih točkova bio je u početku uobičajen samo kod lakih automobila; danas, međutim, postoji tendencija da se ovaj sistem primeni i kod veoma snažnih automobila, na primer, kao kod jaguara i mercedesa.

POREĐENJE PREDNJEG I ZADNJEG POGONA

Odavno se vode diskusije koji je način pogona pogodniji i mnogo je argumenata izneto u prilog zadnjeg ili prednjeg pogona. U stvari, praksa je pokazala da svaki od ova dva načina ima očitih prednosti i svojih subjektivnih mana, što samo dokazuje da i ovde nema prave istine.

Sve se svodi na probleme prianjanja i upravljivosti, gde sile prianjanja treba da se suprotstave silama koje nastoje da poremete ravnotežu vozila u toku kretanja. Treba imati u vidu dva slučaja: povođenje vozila sa pravolinijskog pravca kretanja i zaokretanje vozila (u krivinama).

Na pravcu, dok se vozilo nalazi na ravnom putu, prianjanje zavisi od raspodele opterećenja, drugim rečima, od položaja težišta vozila u odnosu na osovine. Prianjanje je proporcionalno opterećenju svake osovine. Raspodela opterećenja je u obrnutoj razmeri sa rastojanjem osovine od težišta vozila. Međutim, raspodela opterećenja se menja u zavisnosti od uslova kretanja vozila. Kada se vozilo kreće po ravnom putu, nema statičke promene opterećenja, ali dinamički, ubrzanje i otpor vazduha utiču na rasterećenje prednje i opterećenje zadnje osovine. Ova pojava je izraženija ukoliko se vozilo brže kreće. Ovo ide u prilog zadnjeg pogona; kod prednjeg pogona pomenuta pojava ne utiče. Ipak, uticaj nije u svim slučajevima isti: ako je vozilo sa prednjim pogonom dugo i nisko, manja je promena opterećenja po osovinama; međutim, statička opterećenja dobijaju prevagu. Prednji pogon ima i tu prednost što se težište vozila može pomeriti napred. I, na kraju, ako se automobil sa prednjim pogonom zanese, zanosi se samo prednji deo. Zanošenje se može lako smanjiti smanjenjem snage. Isti je slučaj i na usponu; rasterećuje se prednja osovina; otporu savlađivanja uspona pridružuje se otpor vazduha i ubrzanja. Rasterećenje je osetno samo kad je uspon dovoljno veliki i kad je koeficijent prianjanja mali. U svakom drugom slučaju ubrzanje je suviše malo da bi vozilo sa prednjim pogonom moglo doći u teškoće; naime, najveći deo snage motora se troši za savlađivanje uspona.

Zaokret vozila je složeniji slučaj; pojave koje se pri tom manifestuju različite su i zavise od toga da li je srednji ugao skretanja upravljačke osovine mali (krivina sa velikim poluprečnikom) ili veliki (krivina sa malim poluprečnikom). Kod prve pretpostavke (krivina sa velikim poluprečnikom), ako se u krivinu uđe najvećom dozvoljenom brzinom, doći će do zanošenja vozila. U tom slučaju prednji pogon je bolji, jer je lakše ispraviti zanošenje prednjeg dela vozila nego zadnjeg. Pri manjim brzinama može se računati na veće prianjanje točkova. U ovom slučaju, pak, zadnja pogonska osovina ima izvesnu manju prednost.

U krivini sa malim poluprečnikom ugao skretanja prednje osovine je dovoljno veliki da se reakcije mogu razložiti u pravcu normale na ravan točka i uzdužno na pravac vozila. Normalna komponenta slabi usled sila inercije kada je prednja osovina pogonska.

Automobil sa prednjim pogonom može, dakle, brže da zaokrene nego automobil sa zadnjim. Ova normalna komponenta, tzv. centripetalna komponenta vuče, dopušta takođe da se kod prednje pogonske osovine koriguje zanošenje pramca vozila većim skretanjem ka unutrašnjoj strani krivine — ili prema strani zanošenja ako je zanošenje posledica privremenog smanjenja koeficijenta prianjanja — a povećanjem snage motora. Međutim, ako se pravac kretanja mora naglo menjati, automobil sa prednjim pogonom je u lošijem položaju od automobila sa zadnjim. Ova postavka se ostvaruje samo u onom momentu kada je ugao skretanja dovoljno veliki da centripetalna komponenta vuče ponovo da prednost prednjem pogonu.

Prema ovom što je izloženo, zadnji pogon je bolji u vožnji na pravcu, na velikim usponima i u krivinama sa velikim poluprečnikom. Ove prednosti dopuštaju da automobil sa zadnjim pogonom dobije prilično visok sanduk, da razmak osovina bude manji (što poboljšava upravljivost vozila) i da se težište blago pomeri ka zadnjoj osovini. Međutim, prednji pogon je bolji pri većoj brzini i u krivinama sa malim poluprečnikom. Čak i kad se prekorači granica prianjanja, sa prednjim pogonom se može i dalje voziti zahvaljujući pojavi centripetalne komponente sile vuče koja omogućava da se zanošenje ispravi. Nedostaci prednjeg pogona mogu se delimično popraviti povećanjem razmaka osovina i nižim težištem.

Osvetljenje

Osvetljenje kolovoza predstavlja vrlo složen problem, utoliko pre što treba ispuniti razne uslove koji se međusobno ne mogu uvek lako uskladiti. Neophodno je naći kompromisno rešenje primenom dvojnog sistema osvetljenja: s jedne strane, osvetljenje svetlosnim snopom bez ikakvog ograničenja jačine svetla, a s druge strane, uvođenjem svetlosnog snopa za mimoilaženje (sa drugim vozilima), koji se može tako usmeriti da ne zasenjuje druge korisnike saobraćaja na putu.

JODNA SIJALICA

Usavršavanjem farova na automobilu uvek se težilo da se poveća jačina svetlosnog izvora, tj. da se postigne povećanje raspoloživog svetlosnog fluksa. Kod klasične sijalice jačina svetla je ograničena; naime, kad je napon suviše veliki njeno se vlakno razlaže u fine čestice koje se talože na unutrašnjoj strani staklene kruške i ona postepeno postaje sve tamnija.

Pojavom jodne sijalice, takozvane *sijalice sa halogenim parama*, dobijena je, uz isti vek trajanja kao i klasične sijalice, tri puta veća jačina svetla i svetlosnog fluksa po vatu. Vlakno od volframa nalazi se u sijalici od čistog kvarcnog stakla, koja je napunjena jodom u gasnom stanju. Pod uticajem toplote vlakno počinje da se razlaže; pri tom se oslobađaju čestice metala koje se brzo hlade u dodiru sa staklom. Čestice se mešaju sa parama joda i obrazuju volframov jodid, koji u dodiru sa jako zagrejanim vlaknom oslobađa volfram; volfram se taloži ponovo na vlakno i regeneriše se. Ova skoro potpuna regeneracija vlakna dopušta veoma visok napon struje; jodna sijalica, osim toga, dugo ne menja svoje osnovne karakteristike.

Proizvodnja farova sa jodnom sijalicom ne predstavlja neku posebnu teškoću. Za jodni far se kaže da zadovoljava ako konstantno osvetljava donji deo puta i ako je dužina svetlosnog snopa veća ukoliko je brzina vozila veća. Jodna sijalica u faru omogućava, u najmanju ruku, dva puta jače osvetljenje nego far sa klasičnom sijalicom i mnogo veći domet.

S druge strane, njena primena veoma je osetljiva u faru za mimoilaženja sa drugim vozilom (oboreno svetlo). Hemijske reakcije koje su karakteristične za rad jodne sijalice ne dopuštaju da se u sijalicu postavi još jedno vlakno; jasno je, dakle, da se u isti uređaj, a priori, ne mogu smestiti dugo i oboreno svetlo, koja bi se po potrebi naizmenično palila, kao što je to kod klasičnih sijalica sa dva vlakna.

Teorijsko rešenje je da se postave po dva fara od kojih je svaki namenjen samo za jednu svrhu: osvetljenje puta (veliko svetlo) ili mimoilaženje sa drugim vozilima (oboreno svetlo). Ovakvo rešenje primenjeno je na Sitroenovom DS palasu; model DS palas je prvi automobil na kojem je serijski ugrađeno osvetljenje sa jodnim sijalicama. Proizvođač ovog sistema osvetljenja Sibije (Cibié) ipak je pronašao rešenje za far koji daje veliko i oboreno svetlo; far je pravougaon, ima pokretne zastore kojima upravlja elektromagnet; zastori se skrivaju kad se sa oborenog prelazi na veliko svetlo.

EVROPSKI PROPISI

Saobraćajni propisi nalažu da svako vozilo mora imati dva oborena svetla koja noću, i pri vedrom vremenu, moraju osvetljavati put na najmanjoj udaljenosti od 30 metara ispred vozila, a da pri tome ne zaslepljuju druge vozače. Paljenjem oborenog svetla mora se automatski gasiti veliko svetlo.

Oboreno svetlo predstavlja, u stvari, rezultat kompromisa između dva oprečna zahteva: s jedne strane, svetlo mora biti oboreno ka tlu da ne bi zasenjivalo druge, a, s druge strane, ono se ne sme suviše oboriti jer treba da osvetli put dovoljno daleko da bi se uopšte mogao odvijati saobraćaj. Ispod horizontalne ravni svetla koju emituje far nalazi se granična linija između tamnosvetle zone. Ako se svetlo spreči vertikalnim zastorom upravnim na osu fara, dobije se oblik granične, tzv. linije preseka.

Kod evropskog svetlosnog snopa granična linija je horizontalna. Efikasnost snopa zavisi od jačine svetla zraka ispod granične linije i od obaranja snopa. Kada bi se u obični far stavila jodna sijalica, svetlo bi bilo dva puta jače ispod ali i iznad linije; far bi zaslepljivao. Zbog toga je potrebno da far ima posebni oblik.

Za novi evropski far karakteristična je asimetrična linija pod uglom od 15° sa desne strane. Domet je veći a zasenjivanje pri mimoilaženju nije preterano.

Američki far ima veće obaranje svetlosnog snopa i veći domet, ali i više zaslepljuje vozača koji dolazi u susret.

FAROVI

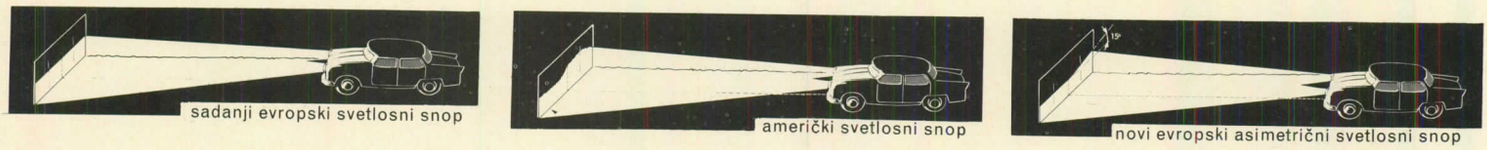
Automobilski farovi imaju sijalicu sa dva vlakna; vlakna su postavljena tako da se svetlosni zraci jednog vlakna potpuno odbijaju od sjajne površine paraboličnog ogledala. To je veliko svetlo za osvetljenje puta, obično preko 100 metara.

Zraci drugog vlakna odbijaju se samo na gornjem delu paraboličnog ogledala i daju takozvano oboreno svetlo, shodno saobraćajnim propisima. Ovo svetlo je usmereno naniže i ne zaslepljuje. Promena jednog na drugo svetlo (velikog na oboreno, i obrnuto) vrši se pomeranjem ručice prekidača ispod točka upravljača.

Sastavni delovi fara su: *kućište*, koje služi kao oslonac, *nosač sijalice*, *parabolično ogledalo* i, spreda, *zaštitno staklo*. Značajna uloga ovog stakla je da usmerava svetlosne zrake koji se odbijaju sa paraboličnog ogledala. Staklo je izbrazdano, a oblik brazdi je posebno podešen kako bi se postigla što bolja raspodela svetlosnih zraka.

Na automobilima često se mogu sresti posebni i dodatni farovi — *farovi za maglu;* izborom boje i usmeravanjem svetla nastaje disperzija zraka ispod sloja magle; postoje i *farovi za vožnju unazad*, koji osvetljavaju prostor iza vozila kada se vozi unazad i u mraku.

Preveo **dr Branko Jović** **Jean BONNET**



Shematsko poređenje raznih tipova svetlosnog snopa oborenog svetla.

AEROKOSMIČKA TEHNIKA

Aerostatika

OPŠTE. Aerostatika je znatno starija od aeronautike iz prostog razloga što je čoveku bilo lakše da otkrije način na koji će se uzdići u vazduh, koristeći se uzgonskom silom gasova lakših od vazduha, nego da otkrije složene zakone aerodinamike koji regulišu let letilica težih od vazduha. Sa čisto tehnološkog stanovišta može se takođe konstatovati da realizacija balona, čak i dirižabla, nije stvarala tako složene probleme kao realizacija aviona. Tehnike kojima se raspolagalo u prošlom veku i na početku ovog veka, bile su sasvim adekvatne za rešavanje ovih problema. Pojava aviona nije u potpunosti uklonila sa neba letilice lakše od vazduha koje, iako malobrojne, ipak imaju i danas svoje mesto u realizaciji specijalnih misija.

ISTORIJAT. Prvi aparat koji je konstruisao čovek i koji se sam od sebe otisnuo sa zemlje, konstruisala su braća Etjen i Žozef de Mongolfje (Etienne i Joseph de Montgolfier). Ovaj aparat, kasnije nazvan *mongolfijer*, koji se sastojao od omotača približno sferičnog oblika, izrađenog od platna za ambalažu dubliranog papirom (braća Mongolfje bili su fabrikanti papira), uzdigao se sa zemlje 4. juna 1783. kod mesta Anone. Tek što se rodio, mongolfijer, ispunjen zagrejanim vazduhom, dobio je rivala koji će ga kasnije potpuno potisnuti: *balon* ispunjen vodonikom koji je fizičar Šarl (Charles) lansirao 27. avgusta iste godine. Uprkos strahu koji je morao izazvati poduhvat isto toliko smeo za to doba kao što je danas lansiranje satelita sa posadom u svemir, dva čoveka, Pilatr de Rozje (Pilatre de Rozier) i markiz Darland (d'Arlandes), usudila su se, prvi u istoriji čovečanstva, da uzlete u vazduh. Krenuvši iz zamka Miet (Muette), oni su se spustili dvadeset pet minuta kasnije na obronke Bit-o-Kaja (Butte-aux-Cailles). Nekoliko nedelja kasnije, 1. decembra, red je došao na Šarla i Robera (Robert), koji uzleću iz Tilerija (Tuileries) u balonu ispunjenom vodonikom. Od tada osvajanje atmosfere se ne zaustavlja. 7. januara 1785. Francuz Blanšar (Blanchard) i engleski lekar Džefri (Jeffries) preleću Lamanš od Dovera do Kalea. Aerostat dobija vojne misije tokom opsade Mobeža (Maubeuge) i bitke za Fleris (Fleurus) 1794. god. Za vreme opsade Pariza 1870. baloni se koriste za prenošenje pošte, pa i putnika [ukupno 102 putnika, među kojima i Gambeta (Gambetta)].

Ubrzo se baloni koriste u naučnim istraživanjima proširujući čovekova saznanja o visokim slojevima atmosfere. Imena — Bio (Biot), Gej-Lisak (Gay-Lussac), Gaston Tisandje (Gaston Tissandier), Sivel (Sivel) i Kroče-Spineli (Crocé-Spinelli) vezana su za ova istraživanja. Poslednja dvojica našla su smrt 15. aprila 1875. prilikom uzletanja na visinu od 8 600 m. Primena balona u naučne svrhe nastavlja se do naših dana. 18. avgusta 1932. Pikar (Piccard) i Kosen (Cosyns) dostižu 16 201 m, a 29. jula 1935. Orvil (Orvil), Anderson (Anderson) i Stivens (Stevens) penju se na 22 066 m u *Eksploreru* II *(Explorer* II). Rekordi u visini penjanja ostaju monopol balona sve do 19. avgusta 1957. kada američki major Simons (Simmons) dostiže 31 000 metara. Ovi rekordi potučeni su tek podvizima astronauta. Uprkos tome, baloni su i danas zadržali svoje mesto u sondiranju gornjih slojeva atmosfere. Osnovni nedostatak balona bio je u tome što njime nije bilo moguće upravljati po pravcu, usled čega još veoma rano dolazi do pojave balona izduženog oblika, snabdevenih nekim sredstvom za propulziju. Tako Žifar (Giffard) konstruiše 1852. balon koji pokreće parni motor, a Dipi de Lom (Dupuy de Lome), 1872. balon koji se pokretao snagom mišića. Međutim, prava tehnika balona-dirižabla uvodi se tek 9. avgusta 1884. kada *Frans (France)* kapetana Renara i Krebsa (Renard i Krebs) prvi put kruži po zatvorenoj putanji, gonjen svojim električnim motorima, kod Šale-Medona (Chalais-Meudon). Era dirižabla započinje. Oni ubrzo dobijaju klipne motore, kao dirižabli *Dojčland (Deutschland)*, 1896. i *Lebodi (Lebaudy)* 1903. god. Početak ovog veka obeležen je mnogobrojnim sportskim podvizima i velikim putovanjima u kojima učestvuju Santos Dimon (Santos Dumont) i Lebodi (Lebaudy) u Francuskoj, a Cepelin (Zeppelin) u Nemačkoj. Od 1919. dirižabli Cepelin, koršćeni još tokom I svetskog rata, održavaju redovne vazdušne linije na severnom i južnom Atlantiku. Izgleda čak da su još uvek bili korišćeni tokom drugog svetskog rata za transport benzina na Istočni front. Sve do pre nekoliko godina dirižabli su bili korišćeni u američkoj mornarici za priobalna izvidanja. Danas, ako se izuzme njihovo korišćenje u reklamne svrhe, izvestan broj dirižabla može se naći u Kanadi, gde služe za transport drveta.

PRINCIP RADA AEROSTATA

Arhimedov zakon važi i za tela potopljena u nekom gasu. Na ovom zakonu zasniva se, dakle, princip rada aerostata. Raspodela pritiska kojim vazduh deluje na površinu aerostata dovodi do pojave uzgonske sile koja deluje sve dotle dok je gustina aerostata manja od gustine vazduha. Ova sila je utoliko veća ukoliko je veća razlika gustina između vazduha i aerostata.

Princip rada mongolfijera zasnivao se na razlici između gustina zagrejanog i hladnog vazduha. Prvi mongolfijer imao je ložište u kome je sagorevala mešavina vlažne slame i usitnjene vune. Metod je veoma brzo napušten usled teškoća oko loženja i opasnosti od udesa. Treba ipak napomenuti da je ova tehnika ponovo primenjena pred II svetski rat, uz korišćenje gorionika na

butan, što je omogućilo jednom mongolfijeru da 1938. dostigne visinu od 9 374 m, rekordnu za ovaj tip aparata.

Do pravog razvoja aerostata dolazi, međutim, tek kad počinju da se primenjuju gasovi lakši od vazduha. Prvi ovakav gas u upotrebi bio je vodonik, čija gustina iznosi 0,0692 kg/m³. Ovo svojstvo vodonika omogućuje podizanje značajnih tereta, što je i dovelo do toga da se vodonik koristio kod velikih dirižabla. Međutim, laka zapaljivost vodonika bila je uzrok mnogobrojnih udesa, kao u slučaju dirižabla *Akron*, *Makon (Macon)* i *Hindenburg*. Uprkos svojoj znatno većoj gustini (0,55 kg/m³), gas za osvetljavanje najčešće se koristio za naduvavanje balona za sportska takmičenja, uglavnom zbog svoje niske cene. Najzad, u poslednje vreme koristi se helijum. Njegova gustina je samo dvostruko veća od gustine vodonika, a potpuno je nezapaljiv. Međutim, cena mu je veoma visoka.

Pri polasku balon nije potpuno naduvan, da bi masa gasa koju sadrži mogla slobodno da se širi prilikom uzdizanja, sa opadanjem spoljašnjeg pritiska. Veliki stratosferski baloni, koji su dostizali visine od preko 30 000 m, bili su ispunjeni samo veoma malom količinom gasa u odnosu na ukupnu zapreminu njihovih omotača.

Aerostatika je otišla još dalje sa balonima-satelitima [tipa *Eho (Echo)*, na primer], koji se lansiraju u svemir u potpuno savijenom vidu, pri čemu je ono malo vazduha koliko je u njima ostalo dovoljno da ih kasnije naduje.

Baloni

Sferni balon, preteča svih aerostata, zadržao je gotovo u potpunosti formu koju je imao prilikom svog nastanka, mada su na njemu kasnije vršena izvesna usavršavanja u nekim detaljima. U ovom pogledu izuzeci su jedino savremeni stratosferski baloni i baloni-sonde, čija je tehnologija veoma specifična, naročito u pogledu omotača.

SLOBODNI BALON ima gotovo sferičnu formu i sastoji se od tri osnovna elementa: *omotača*, *mreže* i *korpe* sa *opremom za upravljanje* (*sl.* 1).

• *Omotač* je uglavnom izrađen od svile prekrivene lanenim uljem. Usled svoje velike zapremine, koja ide od 200 do preko 5 000 m³, izrađuje se od više sfernih *klinova*, ili *traka*, koji se veoma pažljivo sastavljaju i na sastavcima premazuju lakom radi obezbeđenja potpune zaptivenosti. Omotači velikih balona izrađuju se od listaste gume, koja se postavlja između dva sloja tkanine natopljene gumenim rastvorom i premazane spolja specijalnim bojama da bi se smanjila zagrevanja od sunčevih zraka. Na vrhu omotača postavlja se *ventil* koji omogućuje ispuštanje malih količina gasa, čime se postiže postepeni gubitak visine. Deo omotača, *otkidni kapak*, izrađen je tako da se može veoma brzo otvoriti radi izduvavanja prilikom ateriranja. Za rukovanje ovim otvorima služi specijalna užad, koja izlaze iz omotača kroz donji deo *manžete*. Manžeta je otvor koji se zatvara jedino u momentu poletanja, pri čemu se već na maloj visini otvara prekidanjem jednog tankog užeta, tako da tokom celog leta ostaje otvoren i omogućuje ispuštanje suvišnog gasa pri njegovom širenju.

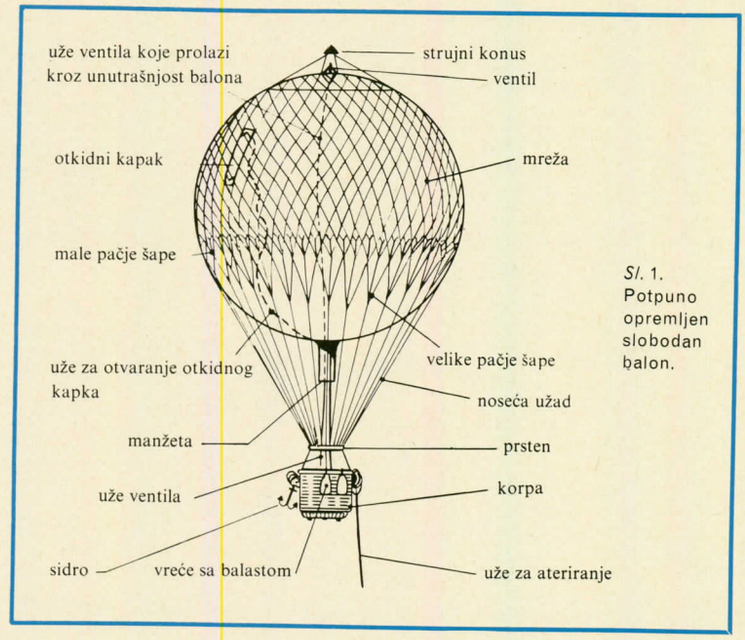
• *Mreža* prekriva celokupnu gornju poluloptu balona. Okca joj se na donjem delu završavaju nosećim prstenom, za koji su vezana noseća užad, koja se završavaju prstenom od drveta ili čelika, koji nosi korpu. Mreža se ponekad zamenjuje ekvatorijalnom trakom o koju se direktno vešaju noseća užad.

• *Korpa* za sportske balone najčešće je izrađena od pruća. U njoj su smeštena sredstva za manevrisanje balonom — *balast* i *uže za ateriranje* (guiderope). Balast se sastoji od finog peska koji rukovalac ispušta u vazduh da bi olakšao balon i time dobio u visini. Uže za ateriranje, koje je zamenilo *zaustavno sidro*, u prvobitnoj upotrebi, ima oblik kabla dugog pedesetak metara. On visi sa korpe pri ateriranju. Deo koji padne na zemlju ima dvostruku ulogu: da uspori spuštanje balona, olakšavši ga, i da umanji bočno skretanje, izazvano vetrom, svojim trenjem o tlo. Manevar spuštanja time postaje znatno precizniji.

PRIVEZAN BALON ugledao je svet već sa prvim mongolfijerima koji su užadima bili vezani za tlo. Ovaj tip balona bio je dugo korišćen kao vašarska atrakcija. Među značajnijim realizacijama ovog tipa treba pomenuti ogroman vezani balon sa Svetske izložbe u Parizu 1878. Sadržao je 28 000 m³ vodonika i bio je u stanju da pri svakom uzletanju ponese 50 putnika na visinu od 500 m. Vezani za zemlju kablom koji pokreće moćno vitlo, privezani baloni su imali specijalan oblik zmaja, da bi se onemogućilo njihovo obrtanje oko kabla i naginjanje u pravcu vetra. Imali su cilindričan deo koji se spreda završavao vretenasto, a sa zadnje strane u vidu krme. Vitlo je obezbeđivalo vertikalno pokretanje balona.

Najznačajnija primena privezanih balona bila je u vojne svrhe. Baloni u vidu zmaja, veoma stabilni na delovanje vetra primenom malih pomoćnih vretenastih balona, predstavljali su veoma pogodno sredstvo za osmatranje. Ovakvi baloni sfernog oblika korišćeni su još u vreme napoleonovskih ratova, dok su tokom I svetskog rata dobili formu zmaja. Napušteni su definitivno tek 1940, pošto ih je bilo veoma lako uništiti. Ipak su se održali još nekoliko godina kao nosači mreža koje su štitile ključne položaje od vazdušnih napada sa malih visina.

STRATOSFERSKI BALON. Ovaj tip balona zahtevao je tehnologiju koja se veoma razlikovala od one što se primenjivala kod klasičnih sfernih balona. Korpa od pruća zamenjena je klimatizovanom kabinom od ultra-lakih metala



Sl. 1. Potpuno opremljen slobodan balon.

i hermetički zatvorenom. Kabina je snabdevena najsavremenijim instrumentima i uređajima za osmatranje i predstavlja pravu malu laboratoriju. Plastične materije zamenile su nepropusne tkanine u izradi omotača, što je dovelo do znatnih ušteda u težini i do povećanja njegove otpornosti.

Nedavno je u Francuskoj izvršeno lansiranje stratosferskih balona u vidu »grozda«. Reč je o velikom broju međusobno povezanih meteoroloških balona. Na taj način moguće je dostići veoma velike visine, a spuštanje se izvodi sukcesivnim uništavanjem pojedinačnih balona od kojih se sastoji grozd.

BALON-SONDA. Ovakvim aparatima omogućena su prva značajnija osmatranja gornjih slojeva atmosfere, čak i stratosfere. Već pri prvoj njihovoj pojavi dostignute su visine od 40 km. Snabdevene preciznim instrumentima za registriranje, njihove minijaturne kabine spuštane su padobranima na zemlju nakon uništavanja omotača. Danas se baloni-sonde uveliko koriste u meteorologiji, čak i za sondažu stratosfere, pri čemu se prenošenje informacija vrši pomoću telekomunikacija. Plastične materije uveliko zamenjuju klasične materijale za izradu omotača većih balona-sondi.

U domenu balona-sondi treba pomenuti realizaciju, 1966. u Francuskoj, balona sa natpritiskom, koji su u stanju da bar mesec dana održe do 2 kg naučnih instrumenata na visini od nekoliko kilometara. Reč je o sferičnim balonima, prečnika 2 m, izrađenim od dvoslojnog milara ili terfana, bez manžeti za evakuaciju gasa.

Dirižabli

Dirižabl se sastoji od: aerodinamičke konstrukcije izduženog oblika, ispunjene gasom, gondole za posadu, putnike ili teret i organa za propulziju, upravljanje i stabilizaciju. U odnosu na konstrukciju razlikuju se tri tipa dirižabla:

— *gipki dirižabli*, čiji omotač nema nikakvih metalnih elemenata za ukrućenje, ni sa spoljne ni sa unutrašnje strane;

— *polukruti dirižabli*, kod kojih je omotač fiksno vezan za jednu metalnu platformu koja je sastavni deo gondole, a oblik omotača se postiže na račun unutrašnjeg pritiska gasa kao i kod gipkih dirižabla;

— *kruti dirižabli*, koji imaju metalnu konstrukciju na koju se navlači omotač, a gondola i motorski prostor čine sastavni deo ove konstrukcije.

Kod krutih dirižabla omotač je izrađen od više velikih aluminijumskih prstenova koji su međusobno povezani uzdužnim trakama. Omotač se na krajevima završava konusno, a na zadnjem konusu nalaze se peraja i krilca za upravljanje po pravci i po visini. Celokupna unutrašnjost omotača nije ispunjena gasom; jedan deo unutrašnjosti podeljen je na odeljenja u kojima se smeštaju mali baloni od impregnirane tkanine koje sadrže vodonik ili helijum.

Dirižabli Cepelin (Zeppelin), izrađivani u Nemačkoj počevši od 1900, služili su kao prototip svim kasnijim modelima. Konstrukcija dirižabla LZ-127, nazvanog *Graf Cepelin (Graf Zeppelin)*, sastojala se od sedamnaest glavnih rebara izrađenih od lakih legura, koja su razdvajala devetnaest hermetičkih odeljenja, od kojih je sedamnaest srednjih primalo 75 000 m³ vodonika. Krajnja odeljenja i donji deo omotača sadržali su dvanaest manjih balona ispunjenih pri poletanju sagorljivim gasovima za pogon motora. Postepeno, kako se trošio, gas je bivao zamenjivan vazduhom iz atmosfere. Ovaj dirižabl, koji je predstavljao pravu vazdušnu lađu, gonilo je pet motora od po 530 KS, instaliranih

u motorskoj gondoli. Unutrašnji hodnik po celokupnoj dužini omotača omogućivao je smeštaj posade i inspekciju raznih elemenata. Komandama po pravcu i po visini upravljalo se sa komandnog mosta smeštenog u prednjem delu. Prostrana kabina omogućavala je smeštaj i potpuni komfor za dvadesetak putnika. Komercijalna brzina *Graf Cepelina* iznosila je 117 km/h, dok mu je akcioni radijus bio 15 000 km. Njegov naslednik, dirižabl LZ-129 *Hindenburg (Hindenburg)* bio je dug 247 m, imao je prečnik 41,2 m i visinu 44,7 m. Zapremina mu je iznosila 190 000 m^3, a pokretali su ga motori od ukupno 4 000 KS. Uz 40 članova posade mogao je da primi i 50 putnika. Brzina krstarenja bila mu je 125 km/h, a akcioni radijus 14 000 km. Putnički prostor na dva sprata sastojao se od dvadeset pet kabina sa po dva ležaja, tri salona, bara i trpezarije.

Aeronautika

ISTORIJA AERONAUTIKE I RAZVOJ AEROTEHNIKE

Istorija avijacije počinje radovima Leonarda da Vinčija, koji je izučavao let ptica. Posle njega nekoliko usamljenih istraživača bavilo se istim problemom bez nekih rezultata koji bi mogli dovesti do praktične primene. Tek početkom XIX v. preduzimaju se prva istraživanja koja imaju izgleda da dovedu do ozbiljnijih rezultata, kao što su istraživanja engleskog naučnika Džordža Kelija (George Cayley). Takođe u Velikoj Britaniji, Henson (Henson) prijavljuje prvi patent koji se odnosi na projekat aeroplana namenjenog prevozu putnika (1842). U Francuskoj teorijski i praktični radovi Feliksa di Tampla (Félix du Temple), Alfonsa Penoa (Alphonse Penaud), Žila Marea (Jules Marey), Luja Mujara (Louis Mouillard) i Viktora Tatena (Victor Tatin) dozvoljavaju da se nazru rešenja problema koje u aerodinamici postavljaju letilice »teže od vazduha«. Dalja istorija avijacije predstavlja dugotrajno međusobno preplitanje tehničkog razvoja i spektakularnih performansi. Kako je tehnički razvoj prethodio boljim performansama, tako su opservacije tokom ovih performansi, kao i istraživanja tokom proba, dovodili do novih tehničkih rešenja.

Začetak aerotehnike obeležen je radovima dva čoveka, Alfonsa Penoa i lorda Kelija, koji su znatno pre nego što su letilice teže od vazduha postale stvarnost, sa velikom tačnošću odredili osnovne karakteristike budućih aviona. Tako je Peno u svojim studijama predvideo stajni trap sa uvlačenjem, komande za upravljanje, strelasta krila i mnoge druge tehnike koje su u avijaciji primenjene tek znatno kasnije, među kojima i neke primenjene tek sasvim nedavno. Najzad, 1890, Kleman Ader (Clément Ader) prvi put odvaja od zemlje jedan kompletan »avion« kojim sam pilotira. Ader je držao do tajnosti svojih istraživanja, čiji rezultati nikada nisu objavljeni. Nemac Oto Lilijental (Otto Lilienthal) obavlja oko 2 000 vazdušnih spuštanja na planerima sopstvene konstrukcije. Od 1902, braća Orvil i Vilbur Rajt (Orville i Wilbur Wright) rade na razvoju svog prvog planera dvokrilca. Pošto su usavršili motor prema sopstvenoj zamisli, braća Rajt krajem 1903. uspešno preduzimaju prvi »motorizovani« let. U Francuskoj kapetan Ferber (Ferber) paralelno radi na sličnim eksperimentima koji dovode do rezultata tek 1905. god. Od 1906. performanse aviona se naglo poboljšavaju, zahvaljujući usavršenim motorima. Santos Dimon (Santos Dumont) preleće 220 m, a Anri Farman (Henri Farman), 13. januara 1908, prvi u Evropi leti po tačno određenoj zatvorenoj putanji od jednog kilometra. 31. januara Vilbur Rajt postiže u Francuskoj rekord u dužini i trajanju leta, preletevši 123 km po zatvorenoj putanji za 2 h 10 min. God. 1909. Lui Blerio (Louis Blériot) prvi preleće kanal Lamanš i održava se prvi aeromiting. 1910. godine Luj Polan (Louis Paulhan) preleće rastojanje od Londona do Mančestera. Iste godine počinje period velikih aerotakmičenja, a Anri Fabr (Henri Fabre) konstruiše prvi »hidroplan«. Iako se eksperimentalna aerodinamika rađa već 1906. sa Gistavom Ajfelom (Gustave Eiffel), prvi avion aerodinamičkih linija, jednokrilac *Deperdisen (Deperdussin)*, pojavljuje se tek 1913. god. Pilotirao je Prevo (Prévost); to je ujedno i prvi avion koji je dostigao brzinu od 200 km/h. Svi elementi budućeg razvoja avijacije sadržani su u ovom avionu. Nakon stagnacije koja je karakterisala period pred I svetski rat, dolazi do prvih začetaka evolucije formi koja će doći do punog procvata između dva rata. Iste, 1913, godine započinje era velikih internacionalnih letova. Rolan Garo (Roland Garros) preleće Sredozemno more 23. septembra, a Vedren (Védrines) i Bonije (Bonnier), svaki za svoj račun, povezuju Francusku sa Srednjim istokom. Mark Purp (Marc Pourpe) leti početkom 1914. od Kaira do Kartuma i nazad, a to je prvi let nad pustinjom i neistraženim krajevima. 24. septembra 1914, Adolf Pegu (Adolphe Pégoud) izvodi prvi luping i time polaže temelj vazdušnoj akrobatici.

Oštra bitka vodi se između jednokrilca i dvokrilca. Među prvim avionima, konstruisanim do 1914, ima ih i jednog i drugog tipa. Međutim, za I svetskog rata dolazi do potpunog poraza jednokrilca. Godine 1915. u celom svetu nema nijednog jednokrilca u upotrebi. Ova situacija se zadržava sve do 1918. Tek nakon rata jednokrilac uspeva postepeno da se uvrsti u aerodinamičke konstrukcije i da nešto docnije potpuno istisne svog konkurenta. Za vreme rata 1914—1918. dolazi do veoma značajnog razvoja avionske industrije, ali zato u opštem razvoju aparata teško da ima ikakvog progresa. Ovo se, međutim, ne odnosi na njihove performanse koje se značajno poboljšavaju zahvaljujući, u prvom redu, povećanju snage i usavršenosti motora (npr. uvođenje kompresora). Izuzetne performanse 1914. postaju sasvim obične 1918. Brzina aviona iznosi 180 do 200 km/h, a penju se najviše do 5 000 m. Akcioni radijus, međutim, ne prelazi tri do četiri časa leta, osim u slučaju ugrađivanja dodatnih rezervoara.

Odmah nakon okončanja neprijateljstava započinje dug period značajnih putovanja koja prethode otvaranju prvih komercijalnih avionskih linija. Prvu redovnu vazdušnu liniju Pariz—London inaugurisao je Lisjen Bosutro (Luciene Bossoutrot) 8. februara 1919. Prve interkontinentalne veze ostvarene su zahvaljujući vazdušnim linijama Farman (Farman) i Latekoer (Latécoère). Danjo (Dagnaux) trasira linije kroz Afriku, dok Moris Noge (Maurice Nogues) otvara liniju za Daleki istok. 21. maja 1927. Čarls Lindberg (Charles Lindberg) preleće Atlantik u smeru zapad-istok, od Njujorka do Buržea, dok juna 1929. to čini francuska posada Asolan (Assollant), Lefevr (Lefèvre) i Loti (Lotti). Najzad, septembra 1930, Francuzi Kost (Costes) i Belont (Bellonte), preleću Atlantik u smeru istok-zapad. Marta 1928, Mermoz (Mermoz) ostvaruje prvi komercijalni let preko južnog Atlantika, a nešto kasnije produžuje ovu liniju preko Južnoameričkog kontinenta sve do Pacifičke obale. U vremenu od 31. maja do 9. juna 1928, posada koju čine: C. Kingsford Smit (C. Kingsford Smith), T. P. Ulm (T. P. Ulm), J. V. Vorner (J.W.Warner) i H. V. Lajons (H. W. Lyons), preleće Pacifik od Ouklenda do Sidneja u Australiji. Treba istaći značajnu ulogu koju su odigrala avio-takmičenja od 1914. do 1939. u razvoju vazduhoplovne tehnike. Vazduhoplovni kupovi, Šnajder (Schneider, osnovan 1913) i Dojč de la Mert (Deutsch de la Meurthe, osnovan 1931), dali su značajan podstrek brzom razvoju aeronautičke konstrukcije. Naglasak kod prvog od ovih kupova bio je isključivo na brzini leta, što je dovela do naglog razvoja tehnike motora i njihove primene na avionima. Drugi kup je postavljao ograničenja u pogledu zapremine cilindara, tako da je odigrao veoma značajnu ulogu u razvoju primenjene aerodinamike. Na ovom polju Francuska niže uspeh za uspehom. Tako su 1933. dva prva mesta u kupu Dojč pripala »potezu« 53 (Potez 53) i »kodronu« C-362 (Caudron C-362).

Za vreme drugog svetskog rata metalne konstrukcije konačno potpuno potiskuju konstrukcije od drveta i platna, koje su se isključivo primenjivale sve do 1912, kada se pojavio Primarov (Primard) i Ponšov (Ponche) *tibavion* (Tubavion)[1] Iz posebnih razloga, međutim, neki nemački avioni i jedan engleski (slavni »moskito«) bili su konstruisani od drveta. Osnovne karakteristike evolucije aeronautike tokom II svetskog rata bile su konstantno povećavanje tonaže i brzine aparata, što uslovljava izvanredan tehnološki napredak, od koga posleratna aerotehnika znatno profitira. Poslednjih dana rata na nebu se pojavljuje »meseršmit« 262 »švalbe« (Messerschmitt 262 »Schwalbe«), prvi avion na turboreaktivni pogon, odnosno prvi avion u primeni bez elise, što obeležava početak najznačajnije revolucije za koju zna aeronautika od svog postojanja. Prvi začetak ove revolucije predstavlja patent Franka Vajtla (Frank Whittle), prijavljen 1930. Prvi eksperimentalni turboreaktivni aparat He-178, koji je konstruisao Hajnkel (Heinkel), poleteo je u Nemačkoj 27. avgusta 1939. Britanski eksperimentalni prototip »gloster« E 28/39 prvi put je poleteo 15. maja 1941, a njegov američki homolog Bel P-59 A »erakomet« (Bell P-59 A »Airacomet«), 1. oktobra 1942.

Potrebno je takođe napomenuti da su leteće bombe V-1, na pulzoreaktivni pogon, predstavljale prve realizacije dirigovanih projektila u velikim serijama, i da su, sa raketama V-2, prethodile svim teledirigovanim i samodirigovanim projektilima realizovanim poslednjih godina.

Najzad, tokom istog ovog perioda dolazi do svog punog razvoja i tehnika helikoptera koja se veoma dugo usavršavala. Prvi serijski helikopter korišćen u akciji bio je »sikorski« R-4 (Sikorsky R-4).

Forma i konstrukcija prvih mlaznih i raketnih aviona bile su ekstremno slične onima kod aviona sa elisama, dok im je tehnologija izrade bila identična. Sa povećanjem brzine leta dolazi prvo do pojave strelastih krila, a zatim forme polako evoluiraju do današnjih supersoničnih aviona, čija konstrukcija više nema ničeg zajedničkog sa avionima iz II svetskog rata. Danas se već uspostavlja neka vrsta kontinuiteta između aeronautike i kosmonautike, pri čemu tehnike konstruisanja i tehnologije materijala teže da se izjednače.

Aerodinamika

ISTORIJAT. Kretanje aviona, kao i uopšte svega što se kreće u atmosferi, podleže određenom broju fizičkih zakona čije izučavanje predstavlja predmet aerodinamike. Osnovne principe aerodinamike, ako se izuzmu zakoni koji određuju osobine fluida, otkrili su Galilej i Njutn u prvoj polovini XVII veka. Kasnije, Dalanber (d'Alembert) objavljuje svoj *Esej o jednoj novoj teoriji otpora fluida*, a Džordž Keli (George Cauley) 1809. otkriva značaj oblika profila krila. Empirijska i teorijska istraživanja nastavljaju se tokom XIX v. i to u Francuskoj Mare (Marey), Mujar (Mouillard), Peno (Penaud), i drugi. Savremena eksperimentalna aerodinamika rađa se 1907, kada Gistav Ajfel (Gustave Eiffel) osniva svoju aerodinamičku laboratoriju, najpre na Marsovim poljima, a zatim u Oteju. Ova laboratorija radi i dan-danas.

[1]) Avion od cevnih konstrukcija. — Prim. prev.

RAZLIČITE GRANE AERODINAMIKE

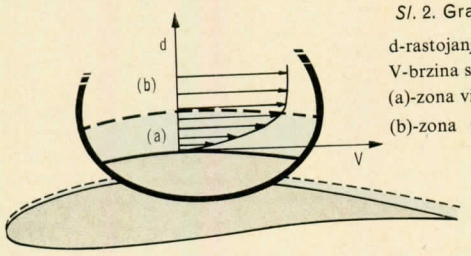
Po definiciji, aerodinamika je nauka čiji je cilj da utvrdi uzročne veze između, s jedne strane, forme, položaja i brzine nekog tela i, sa druge, sila koje deluju na površinu ovog tela usled njegovog kretanja u vazduhu datih karakteristika. Aerodinamička istraživanja se stoga dele na više grana, zavisno od karakteristika vazduha i brzine kretanja tela.

KOMPRESIBILNOST. Vazduh je stišljiv fluid. Međutim, varijacije pritiska u pitanju, koje odgovaraju nekoj određenoj brzini V, i koje se u prvom približenju mogu izračunati na osnovu Bernulijeve jednačine:

$$\Delta p = p - p_0 = \frac{\rho}{2} V^2$$

čine da se vazduh može smatrati praktično nestišljivim sve do brzina od oko 720 km/h (odnosno 200 m/s, kada je M=0,6). Zaista, pošto je p_0 jednako 10 133 mm vodenog stuba, a razlika pritisaka $p - p_0$ pri brzini od 200 m/s iznosi 2 500 mm vodenog stuba ta razlika čini jednu četvrtinu p_0 i ne može se zanemariti. Međutim, pri brzini od 145 m/s, $p - p_0$ nije veće od jednog stotog dela p_0.

VISKOZNOST. Viskoznost vazduha je veoma mala, pa se stoga vazduh ponaša kao idealan fluid, i rezultati proračuna opstrujavanja nekog tela u kretanju, ili profila nekog krila, na bazi teorijske aerodinamike odgovaraju realnom strujanju. Ovo, međutim, ne važi u neposrednoj blizini površine koja se opstrujava. U stvari, brzina strujanja naglo raste od brzine nula do brzine V u sloju neposredno uz površinu, debljine svega nekoliko milimetara *(sl.* 2). Pošto je, dakle, gradijent brzine normalno na površini veoma značajan, uticaj viskoznosti se ne može zanemariti u ovom sloju. Otuda fenomen *graničnog sloja.*



Sl. 2. Granični sloj.
d-rastojanje od površine profila
V-brzina strujanja vazduha
(a)-zona viskoznog strujanja (granični sloj)
(b)-zona neviskoznog strujanja

BRZINA TELA U KRETANJU. Aerodinamika, shodno tome i aerodinamičke sile, suštinski se razlikuje zavisno od toga da li se avion kreće brzinom manjom, istom ili većom od brzine zvuka. Usled toga razlikuju se četiri oblasti strujanja zavisno od veličine Mahovog broja, odnosno odnosa brzine tela i brzine zvuka u uslovima leta.

1. **Oblast dozvučnog strujanja**, koja ide sve do 0,9 Maha, domen je klasične aerodinamike, nazvane »aerodinamika malih brzina«. Čak i danas, kada avioni lete hipersoničnim brzinama, ova oblast ima uvek veliki značaj. U stvari, svi avioni u trenutku poletanja i sletanja, i tokom perioda ubrzavanja i usporavanja koji im slede, odnosno prethode, kreću se u oblasti dozvučnog strujanja. Zatim, aktuelnost razvoja aviona sa kratkim ili vertikalnim uzletanjem, odnosno sletanjem (ADAC, ADAV)[2], podstiče na dalji razvoj istraživanja u ovoj već dosta istraženoj oblasti. Istraživanja u ovoj oblasti usmerena su uglavnom na probleme graničnog sloja, hiperstabilizatore, probleme uzletanja i sletanja, i stabilnosti hipersoničnih aviona pri malim brzinama.

2. **Oblast okozvučnog strujanja**. Od 0,9 Maha do 1,2 Maha proteže se još nedovoljno istražena oblast strujanja, koja predstavlja prelaznu oblast od dozvučnih u nadzvučna strujanja. Usled pojava koje se u ovoj oblasti odigravaju velikom brzinom, jedno vreme se verovalo da uopšte neće biti moguće dostići brzine veće od brzine zvuka. Iz tog vremena potiče i izraz »zvučni zid«. I danas se zadovoljavamo time da kroz ovu oblast prođemo što brže.

3. **Oblast nadzvučnog strujanja**. Režimi leta svih savremenih brzih aviona odgovaraju ovoj oblasti, koja se proteže iznad 1,2 Maha. Aerodinamičke teorije koje odgovaraju ovoj oblasti, potvrđene eksperimentima u aerotunelima, veoma se razlikuju od teorija koje važe za dozvučnu aerodinamiku. Ovo se, pre svega, odnosi na međusobnu zavisnost koeficijenata otpora i uzgona. Osim toga, dolazi do nekih potpuno novih fenomena, koji su posledica sabijanja vazduha i postojanja udarnih talasa.

4. **Oblast hiperzvučnog strujanja** proteže se iznad 4 Maha i retki su avioni koji u njoj lete. To su već režimi leta koji odgovaraju letu raketa. Ovo je, u stvari, prelazna oblast između aeronautike i raketonautike. Ovde više nije reč o čistoj aerodinamici, pogotovo što se tiče problema unutar graničnog sloja. U stvari, pošto dolazi do značajnog kinetičkog zagrevanja, termodinamička istraživanja sve više preovladavaju, tako da je to domen aerotermodinamike. Treba napomenuti da je ova nova naučna disciplina počela da dobija u značaju već pri postizanju brzina zvuka, čak i nešto pre toga.

Sve ove različite grane aerodinamike dele se na dve podgrupe — na aerodinamiku viskoznog i neviskoznog vazduha, izuzev kod ekstremnih hiperzvučnih strujanja, gde aerotermodinamika u potpunosti dominira. Do ove podele ne dolazi samo usled različitosti fenomena koji se istražuju, već u vezi s tim, i usled različitosti sredstava za istraživanja koja se koriste *(sl.* 3).

AERODINAMIČKE SILE

Strujanje vazduha oko nekog objekta dovodi do stvaranja pritisaka oko ovoga polja, koji deluju na njegovu površinu. Kao rezultat ovog delovanja, objekat je izložen rezonantnoj sili koja predstavlja sumu ovih delovanja po celokupnoj površini objekta. Kada ispružimo ruku vodoravno kroz prozor automobila, osetićemo otpor koji teži da ruku potisne unazad. Ako pri tom okrenemo dlan naviše, sila nastala kao posledica strujanja vazduha teži da ruku uzdigne i da je u isto vreme potisne unazad. Ovaj jednostavan eksperimenat ilustruje osnovni zakon aerodinamike, koji čini neophodnu osnovu teorije leta pokretnih objekata »težih od vazduha«.

U najopštijem vidu, ovaj se zakon može izraziti na sledeći način: pokretan objekat površine S, koji se kreće brzinom V, u vazduhu čija je gustina ρ, izložen je aerodinamičkoj sili R čija veličina iznosi

$$R = \frac{1}{2} C \rho S V^2.$$

Koeficijent C[3], koji nema dimenzije pošto ρSV^2 ima dimenzije sile, zavisi od velikog broja parametara koji utiču na veličinu aerodinamičke sile. Ovi parametri se suštinski dele u dve kategorije: *parametre pokretnog tela* i *parametre vazduha.*

- Prva grupa parametara karakteriše formu, orijentaciju, dimenzije i prirodu spoljašnje površine datog pokretnog objekta.
- Drugu grupu parametara uglavnom čine:

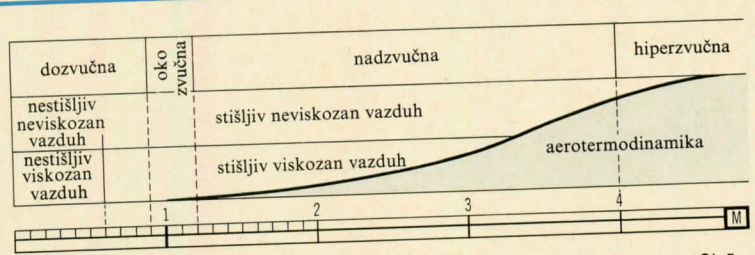
— *gustina*, koja se menja sa visinom;

— *viskoznost*, koja igra veoma značajnu ulogu na površini aviona i u graničnom sloju i, zavisno od stanja površine, može značajno menjati aerodinamičke karakteristike aviona;

— *kompresibilnost*, čiji značaj raste sa brzinom leta, a može se zanemariti pri malim brzinama (manjim od 720 km/h);

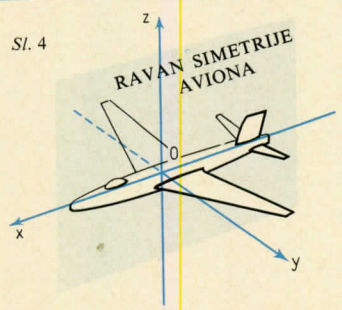
[2]) Na engleskom STOL (Short Take-Off and Landing) i VTOL (Vertical Take-Off and Landing).

[3]) Koeficijent 1/2 može biti sadržan u bezdimenzionalnom koeficijentu C. Međutim, uobičajeno je, osim u Velikoj Britaniji, da se formula piše u datom obliku koji se zadržao još od prvih istraživanja u ovoj oblasti u Nemačkoj.

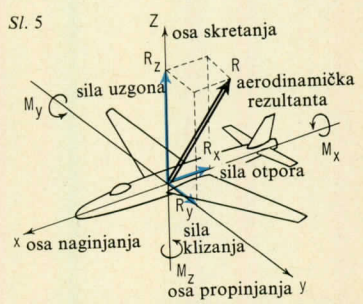


Sl. 3. — Oblasti aerodinamike; *Sl.* 4. — Referentni koordinatni sistem aviona; *Sl.* 5. — Razlaganje rezultantne aerodinamičke sile i rezultantnog momenta u referentnom koordinatnom sistemu aviona.

Sl. 4



Sl. 5



— *termička provodljivost*, koja se karakteriše Prandtlovim brojem i koja dolazi do izražaja onda kada dolazi do razmene toplote između vazduha i površine;

— i, eventualno, parametar nazvan *Frudov broj*, koji uzima u obzir veličinu sile teže i koji se naročito primenjuje u studijama hidroaviona, kada se ovi kreću na razdvojnoj površini vode i vazduha, odnosno pri hidroplaniranju.

Na osnovu opštih zakona mehanike, zbir delovanja pritisaka oko aviona (ili bilo kakvog pokretnog objekta), dovodi ne samo do pojave rezultantne sile već i do rezultantnog momenta. Ukoliko ovaj nije jednak nuli, kao posledica može doći do promene pravca aviona[4]). Rezultantni momenat zavisi od istih parametara od kojih zavisi i rezultantna sila.

Delovanje rezultantne sile i rezultantnog momenta varira po intenzitetu i pravcu. Da bi se izrazio njihov uticaj na karakteristike leta nekog aviona, ne treba ih razmatrati u globalnoj formi, već ih treba razložiti na komponente, kako bi se mogli pogodnije analizirati. Ovo razlaganje na komponente vrši se u odnosu na neki određeni, kartezijanski, trodimenzionalni koordinatni sistem. Referentni koordinatni sistem *(sl.* 4) može, na primer, biti sledeći:

— početak koordinatnog sistema smešta se u centar delovanja sile teže (ili u centar delovanja aerodinamičkog potiska, za koji možemo, radi jednostavnosti, uzeti da se poklapa sa centrom delovanja sile teže);

— ravan (Ox Oz) postavlja se u vertikalnu ravan simetrije aviona;

— za osu Ox uzima se neka referentna prava vezana za avion i proizvoljno definisana.

Ovaj koordinatni sistem naziva se *koordinatni sistem aviona*. Takođe se koristi *aerodinamički koordinatni sistem*, čija se osa Oz nalazi u ravni simetrije aviona, a osa Ox se poklapa sa pravcem strujanja vazduha, odnosno sa pravcem brzine. Primenjuje se i *mešoviti koordinatni sistem*, čija se osa Ox poklapa sa projekcijom brzine na ravan simetrije aviona.

Razlaganjem aerodinamičke sile i rezultantnog momenta u referentnom sistemu aviona dolazi se do sledećih komponenata sile i momenta *(sl.* 5):

— *aerodinamička sila otpora* R_x, koja teži da se odupre kretanju aviona i koju nastojimo da svedemo na minimum u svim konfiguracijama leta; ona se matematički može izraziti na isti način kao i rezultantna sila: $R_x = \frac{1}{2} C_x \rho S V^2$. Koeficijenat C_x naziva se *koeficijent otpora* i iste je prirode kao i aerodinamički koeficijent C;

— *aerodinamička sila uzgona* R_z (*koeficijent uzgona* C_z) karakteriše intenzitet kojim se avion održava u vazduhu; to je, u stvari, sila nošenja; suprotno nego kod sile otpora, trudimo se da je učinimo maksimalnom;

— *aerodinamička sila klizanja* R_y (*koeficijent klizanja* C_y) je štetna sila koja teži da avion skrene u bočnom pravcu; teži se, dakle, uvek da je ili izbegnemo ili kompenzujemo; jednaka je nuli u slučaju idealno simetričnog aviona izloženog strujanju vazduha čiji je vektor brzine paralelan ravni simetrije aviona;

— *aerodinamički momenat naginjanja* M_x, teži da obrne avion oko ose x, odnosno da ga nagne na jedno ili na drugo krilo;

— *aerodinamički momenat propinjanja* M_y nastoji da propne, odnosno strmoglavi avion;

— *aerodinamički momenat skretanja* M_z teži da promeni pravac leta aviona.

Ovi različiti momenti dobijaju razne vrednosti, zavisno od položaja aviona; izračunavanjem ovih vrednosti dolazi se do karakteristika stabilnosti i manipulativnosti aparata. Određene osobenosti konstrukcije omogućuju povećavanje stabilnosti oko različitih osa: krilca služe za stabilizaciju u pogledu sile klizanja; podupiranje zadnje fiksne ravni na delovanje momenta propinjanja, a diedar krila na momenat naginjanja.

Prilikom promena položaja aviona pojedine momente treba povećati do relativno značajnih vrednosti. Ovo se postiže pomoću pokretnih delova na avionu, kao što su krme, koji remete simetriju aviona. Momenti do kojih dolazi prilikom leta aviona daju svoje ime pojedinim osama koordinatnog sistema aviona. Tako se Ox osa naziva *osa naginjanja*, Oy—*osa propinjanja*, a Oz—*osa skretanja*.

AERODINAMIKA KRILA

PRINCIP. Kao sva pokretna tela u vazduhu, krilo je izloženo delovanju aerodinamičkih sila od kojih suštinski zavisi let letilica sa konstantnom površinom krila. U stvari, delovanjem krila ostvaruje se najveći deo uzgonske sile. Ona se ostvaruje i horizontalnim krilcima, ali u mnogo manjoj meri. Trup takođe, u izvesnim slučajevima, može da dovede do nezanemarljive uzgonske sile. Ovo je slučaj kod veoma retkih konstrukcija sa »nosećim trupom«, koji u poslednje vreme ponovo postaje interesantan u vezi sa studijama i eksperimentima koji se odnose na profilisane kosmičke kapsule koje su u stanju da lete u vazduhu (engl. *lifting body*).

PROFIL KRILA. Osnovni element pri definisanju aerodinamičkih karakteristika krila predstavlja njihov profil, odnosno presek krila vertikalnom ravni koja je paralelna sa pravcem horizontalnog kretanja krila, to jest sa brzinom vazduha.

Profil *(sl.* 6), koji može znatno da varira, zavisno od traženih performansi, karakteriše određeni broj elemenata:

— Prednja ivica, u opštem slučaju više ili manje zaobljena, naziva se *napadna ivica*, dok se suprotna ivica, koja se najčešće oštro završava u jednoj tački, naziva *ivica odvajanja*. Linije koje definišu forme gornjeg i donjeg dela profila nazivaju se *gornjaka*, odnosno *donjaka*.

— Linija koja spaja napadnu ivicu sa ivicom odvajanja naziva se *tetiva srednje linije (referentna osa)* i služi kao osnova za merenje napadnih uglova.

— Važna karakteristika jednog profila krila je njegova *relativna debljina* ili odnos maksimalne debljine (merene upravno na referentnu osu) i dužine profila od napadne ivice do ivice odvajanja.

Profili na prvim avionima imali su jednostavne zakrivljene linije, čija je mala relativna debljina uslovljavala značajan sistem ukrućenja i užadi za sklop krila. Izostavljanje užadi prvo je dovelo do primene veoma debelih profila, dok je docnije povećanje brzine leta postepeno uticalo na smanjenje relativne debljine profila. Na današnjim avionima sa delta krilima relativna debljina profila svela se na svega nešto oko tri procenta, što uslovljava specijalnu tehnologiju izrade, naročito pri serijskoj proizvodnji.

STRUJANJE VAZDUHA I RASPODELA PRITISKA OKO PROFILA. Razmotrimo jedan profil nagnut za napadni ugao i, postavljen u struju vazduha brzine V *(sl.* 7). Nailaskom na napadnu ivicu, strujnice a i b skreću od prvobitnog pravca, i to prva uz gornjaku, a druga uz donjaku. Na taj način one obilaze oko profila i ponovo se spajaju na ivici odvajanja. Skretanje putanja čestica vazduha prilikom njihovog opstrujavanja duž profila dovodi do stvaranja lokalnih natpritisaka i potpritisaka oko profila, čije ukupno delovanje rezultira u aerodinamičkoj sili. Suprotno od onoga što bi se logično moglo pretpostaviti, činjenica da se jedno krilo drži u vazduhu posledica je više pojave natpritiska na njegovoj gornjaki nego pojave natpritiska na njegovoj donjaki *(sl.* 8). Raspodela pritiska oko profila znatno varira zavisno od veličine napadnog ugla.

AERODINAMIČKE SILE I POLARA. Izučavanje raspodele pritiska je prilično nepogodno, pa se zamenjuje izučavanjem aerodinamičkih sila. Aerodinamička rezultanta koja deluje na jedan profil razlaže se na silu uzgona i silu otpora *(sl.* 9), na osnovu kojih se određuju koeficijenti uzgona i otpora, C_z i C_x. Zavisnost ovih koeficijenata od napadnog ugla i može se izučavati bilo preko krivih koje daju C_z i C_x u funkciji i (*sl.* 10 i 11), bilo preko krive koja daje C_z u funkciji C_x, za razne vrednosti napadnog ugla i. Ova poslednja naziva se *polara* (*sl.* 12) i omogućava grafičko određivanje izvesnih karakteristika profila:

— Maksimalna sila uzgona ostvaruje se za napadni ugao leta koji odgovara tački M na polari (ova tačka odgovara tački M′ na krivoj C_x zavisno od i), tački dodira horizontalne tangente na polaru.

— Napadni ugao leta koji dovodi do minimalne sile otpora odgovara tački M (odgovarajuća tačka M′ na krivoj C_z u zavisnosti od i), tački dodira vertikalne tangente na polaru.

— Maksimalna osetljivost, koja se koristi pri određivanju minimalne vrednosti ugla leta pri spuštanju sa planiranjem, odgovara tački F, tački dodira na polaru tangente iz koordinatnog početka O. Osetljivost za svaki napadni ugao i definiše se odnosom:

$$f = tg\alpha = \frac{C_z}{C_x}.$$

Potrebno je naglasiti da ugao α ne treba brkati sa napadnim uglom.

— Deo polare koji se nalazi ispod ose C_x odgovara, za kompletan avion, uslovima invertnog leta, odnosno leta na leđima.

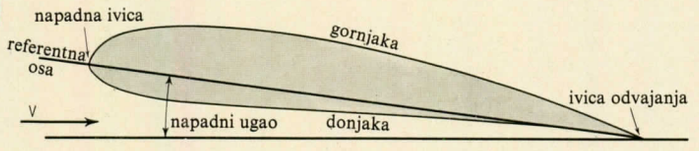
— Tačka preseka polare sa osom C_x (odnosno $C_z = 0$) odgovara vertikalnom penjanju ili spuštanju.

— Deo polare koji se nalazi dalje od tačke M u pravcu porasta napadnog ugla odgovara uslovima odvajanja struje. Ovaj fenomen se fizički objašnjava na sledeći način: za napadne uglove veće od onih koji odgovaraju tački M dolazi do odvajanja vazdušnih strujnica koje struje duž gornjake, pre ivice odvajanja, što dovodi do naglog porasta turbulencije, naglog smanjivanja sile uzgona i naglog porasta sile otpora *(sl.* 13).

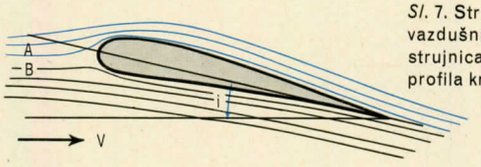
AERODINAMIKA KRILA KONAČNOG RASPONA. Aerodinamičke karakteristike profila krila ne mogu se proširiti na celo krilo. U stvari, čak i kada bi krilo bilo pravougaonog oblika (istog profila po celoj dužini), što nikada nije slučaj, bilo bi neophodno primeniti izvesne korekcije na polaru profila da bi se došlo do polare krila. Moguće je uprostiti ove korekcije zadovoljivši se samo translatornim pomeranjem udesno od polare, što odgovara izvesnom povećanju sile otpora, nazvanom *indukovana sila otpora*, i malim pomeranjem vertikalno nadole.

Indukovana sila otpora dodaje se na silu otpora profila i uglavnom je posledica postojanja natpritiska na donjaki i potpritiska na gornjaki. Usled postojanja polja pritiska, vazdušna strujnica ne ostaje u istoj vertikalnoj ravni prilikom opstrujavanja gornje, odnosno donje strane krila. Ovo dovodi do pojave vrtloga na ivici odvajanja i do povećavanja sile otpora. Pored toga dolazi do još jednog veoma značajnog fenomena na krajevima krila, odnosno na njihovim margi-

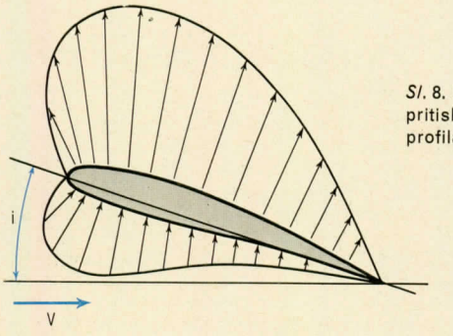
[4]) U aerodinamici govori se o »promeni položaja« aviona.



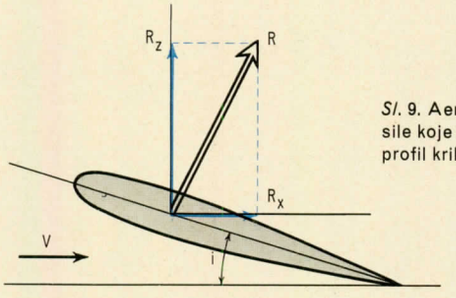
Sl. 6. — Elementi profila krila.



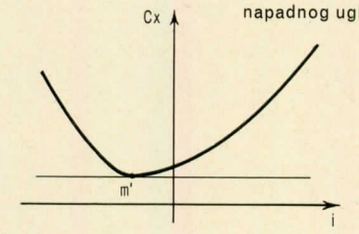
Sl. 7. Strujanje vazdušnih strujnica oko profila krila.



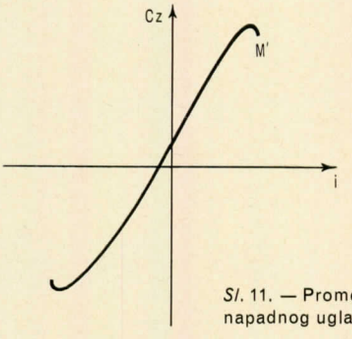
Sl. 8. Raspodela pritiska oko profila krila.

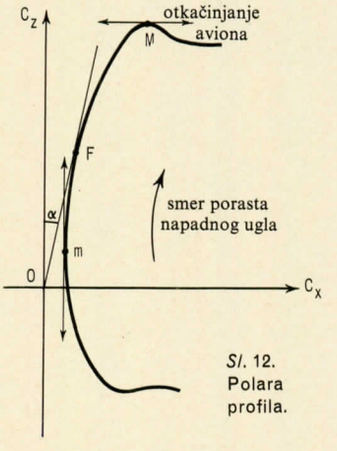


Sl. 9. Aerodinamičke sile koje deluju na profil krila.



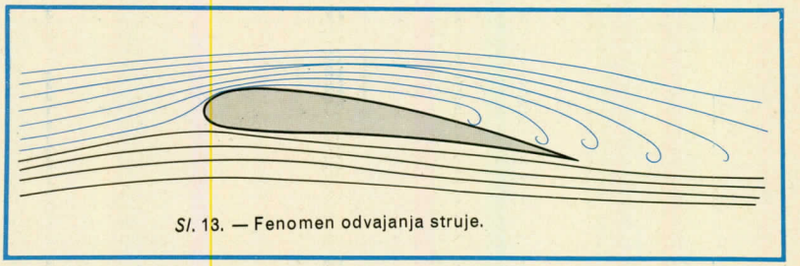
Sl. 10. — Promena koeficijenta otpora C_x zavisno od napadnog ugla *i*.





Sl. 12. Polara profila.

Sl. 11. — Promena koeficijenta uzgona C_z zavisno od napadnog ugla *i*.



Sl. 13. — Fenomen odvajanja struje.

nalnim ivicama. Vazduh koji struji duž donjake na višem je pritisku od vazduha koji struji duž gornjake, usled čega se javlja rotaciono kretanje oko marginalne ivice gde se formira odgovarajući vrtlog. Ovaj vrtlog remeti aerodinamičke karakteristike krila, povećavajući silu otpora i smanjujući silu uzgona. Intenzitet ovih najznačajnih fenomena koji utiču na indukovanu silu otpora utoliko je slabiji, ukoliko je krilo izduženije. Izduženost krila definiše se kao odnos kvadrata raspona i površine krila. Kod pravougaonog krila ona je jednaka odnosu raspona krila i dužine profila.

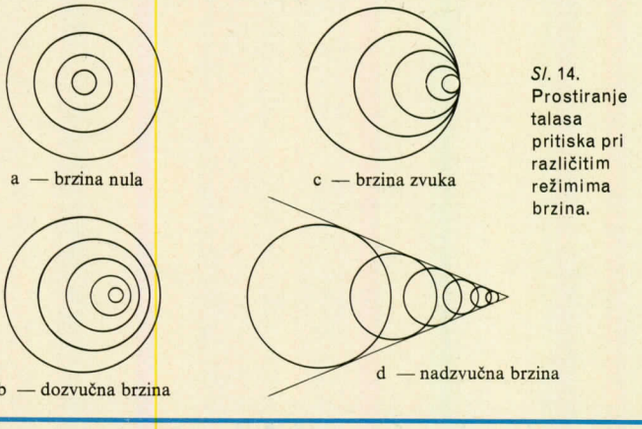
AERODINAMIKA VELIKIH BRZINA

OPŠTE. Dugo se smatralo da je brzina zvuka najveća brzina koju je moguće postići u atmosferi. Razvoj aerodinamike dokazao je da ovo nije slučaj. Odmah posle II svetskog rata počinje izučavanje aerodinamičkih problema inherentnih za nadzvučne brzine: problema *dostizanja brzine zvuka* i problema *leta nadzvučnim brzinama*. Fenomeni koji se javljaju prilikom dostizanja brzine zvuka znatno remete normalne uslove leta, stoga je i ova oblast strujanja dobila naziv »zvučni zid«. Danas, kada je dokazana mogućnost prelaska zvučnog praga, aerodinamičari radije govore o »zvučnoj barijeri«.

PROSTIRANJA TALASA PRITISKA. Proučavanje aerodinamike pokazuje da strujanje vazduha oko krila, kao i oko celokupnog aviona, prate lokalne varijacije pritiska, koje često mogu da budu veoma značajne. Reč je o poremećajima spoljašnje ravnoteže vazduha, koji se prostiru tako da dovode do nove ravnoteže. Brzina prostiranja ovih poremećaja ravna je brzini zvuka, pošto zvuk i nastaje usled prostiranja talasa pritiska. U homogenom vazduhu ovo prostiranje se vrši koncentrično, polazeći od tačke izvora poremećaja.

- Ako je izvor talasa pritiska nepokretna tačka, oni se prostiru koncentrično oko ove tačke *(sl.* 14a).
- Ako je izvor pokretan i kreće se brzinom manjom od brzine zvuka, talasi se prostiru koncentrično oko tačke u kojoj se nalazio izvor u momentu emisije talasa. Tokom vremena ove sfere prostiranja talasa pomeraju se napred *(sl.* 14b), približavajući se utoliko više jedna drugoj, ukoliko je brzina veća. Najzad, kada brzina pokretnog izvora dostigne brzinu zvuka, sve ove sfere dodiruju se u tački u kojoj se nalazi pokretni izvor, što dovodi do koncentracije talasa u ovoj tački *(sl.* 14c).
- Kada je brzina pokretnog izvora veća od brzine zvuka, sfere prostiranja talasa pritiska tangiraju jedan konus, u čijem se temenu nalazi pokretan izvor. Temeni ugao ovog konusa utoliko je manji, ukoliko je brzina pokretnog izvora veća *(sl.* 14d). Na taj način dolazi do akumulacije talasa pritiska celom dužinom konusa.

UDARNI TALASI. Prethodna teorijska razmatranja važe samo za pokretan izvor u vidu tačke. Kod aviona, do zvučnih fenomena koji nastaju usled akumulacije talasa pritiska, dolazi čak i pre nego što je ceo aparat dostigao brzinu zvuka.

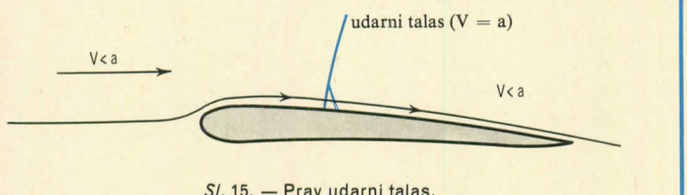


Sl. 14. Prostiranje talasa pritiska pri različitim režimima brzina.

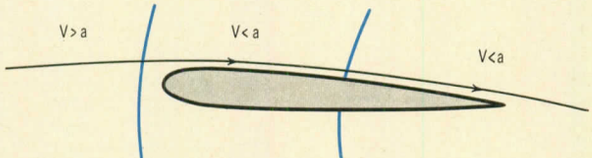
U stvari, pri strujanju vazduha oko nekog profila krila koje se kreće velikim dozvučnim brzinama, brzina vazduha progresivno raste polazeći od napadne ivice, i u jednoj određenoj tački dostiže brzinu zvuka. U okolini ove tačke dolazi do koncentracije talasa pritiska, i ova akumulacija talasa čini takozvani *udarni talas*. U pomenutom slučaju reč je o *pravom udarnom talasu*, koji se postavlja upravno na profil krila, a iza koga je strujanje ponovo dozvučno sa brzinom veoma malo manjom od brzine zvuka *(sl.* 15). Ako se brzina aviona i dalje povećava, i pređe brzinu zvuka, ispred krila se pojavljuje *prav odvojen udarni talas (sl.* 16). Neposredno iza ovog talasa brzina strujanja vazduha je ponovo nešto malo manja od brzine zvuka, pri čemu ne dolazi do iskrivljavanja vazdušnih strujnica. U prvom približenju, što se tiče krila, sve se odigrava kao i u prethodnom slučaju: prav udarni talas ostaje, pomerajući se unazad sa porastom brzine.

Iznad određene nadzvučne brzine aviona (zavisno od njegove konfiguracije) prav udarni talas nađe se na profilu na ivici odvajanja, tako da je duž celog profila brzina nadzvučna *(sl.* 17). Ovakav udarni talas je tada nagnut, a ugao njegovog nagiba smanjuje se sa povećavanjem brzine. Iza ovog *nagnutog udarnog talasa* dolazi do iskrivljenja vazdušnih stujnica.

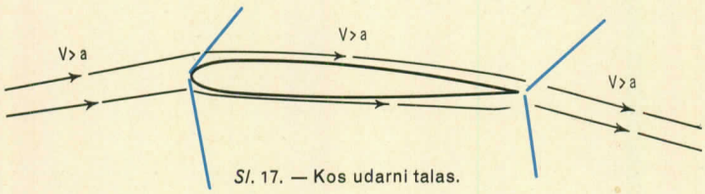
ZVUČNA »BARIJERA«. Pojavom prvih udarnih talasa dolazi do značajnih promena aerodinamičkih karakteristika aviona. Ovi talasi, u stvari, predstavljaju poremećaje koji menjaju režim strujanja vazduha. Posledica pojave pravog udarnog talasa je smanjenje sile uzgona i povećanje sile otpora u vrlo velikoj meri. Nešto pojednostavljena analogija pojave udarnih talasa bila bi izvlačenje aerokočnica na krilima. Pri pojavi pravih odvojenih udarnih talasa intenzitet ovih fenomena se pojačava, naročito u pogledu smanjivanja sile uzgona, pošto strujanje vazduha iza udarnog talasa ostaje dozvučno, uprkos povećavanju brzine aviona. Zakon porasta sile uzgona sa povećanjem brzine, o kome je bilo govora, više ne važi. U isto vreme, pri pojavi pomenutih fenomena dolazi prvo do naglog porasta koeficijenta momenta propinjanja do nekog maksimuma, a zatim do njegovog veoma naglog opadanja sve do negativnih vrednosti, i, najzad, do ponovnog porasta do jedne stabilne vrednosti koja odgovara ustaljenom nadzvučnom strujanju *(sl.* 18). Pojava negativnih vrednosti ovog koeficijenta u okozvučnom režimu strujanja dovodi do inverzne reakcije na delovanje komandi.



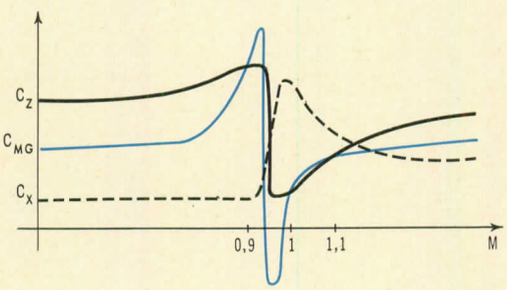
Sl. 15. — Prav udarni talas.



Sl. 16. — Prav odvojen udarni talas.



Sl. 17. — Kos udarni talas.



Sl. 18. Zvučna »barijera«. Promena koeficijenata uzgona C_z, otpora C_X i momenta C_{MG} zavisno od Mahovog broja u okozvučnoj oblasti.

Pri uspostavljanju stabilnog nadzvučnog strujanja koeficijent otpora C_x poprima ustaljenu vrednost, ali veću od one koju je imao u dozvučnom režimu leta, usled otpora od udarnih talasa pored ostalih uzročnika otpora. Na isti način koeficijent uzgona C_z poprima vrednost nižu od one koju je imao u dozvučnom režimu usled, pored ostalog, iskrivljivanja strujnica iza nagnutog udarnog talasa.

Danas supersonični avioni prelaze veoma brzo kroz ovu veoma opasnu oblast, u kojoj aerodinamički fenomeni nisu još ni dovoljno poznati ni istraženi. Ako se uzmu u obzir pomenute pojave koje prate pojavu udarnih talasa, nije teško razumeti zašto su prvi avioni koji su dostigli brzinu zvuka i koji su pokušali da se održe na ovoj brzini, bukvalno eksplodirali u vazduhu. Aerodinamičke fenomene okozvučnog režima strujanja karakterišu uglavnom veoma velike amplitude i njihovo naglo pojavljivanje. Ovo dovodi do toga da je konstrukcija aviona izložena naprezanjima i vibracijama znatno većim od onih za koje je projektovana. Dolazi do raspadanja aparata, sve se to događa kao da su se sudarili sa vazdušnim zidom koji se sastoji od koncentracije talasa pritiska. Otuda verovanje u »zvučni zid«. U stvari, reč je o prelaznom režimu strujanja za koji zakoni klasične aerodinamike više ne važe zbog pojave udarnih talasa. Izvan ove oblasti, u režimu ustaljenog nadzvučnog strujanja, aerodinamičke formule se nešto menjaju, ali se let ponovo reguliše stabilnim zakonima bez diskontinuiteta.

Mehanika leta aviona

OPŠTE. Avion u letu nije izložen samo *aerodinamičkim silama* koje su posledica njegovog kretanja kroz vazduh. Još su dve sile koje utiču na opštu mehaniku leta aviona: *težina aparata*, koja je praktično konstantna ako se izuzme potrošnja goriva (što već nije moguće zanemariti kod dugih letova), i *propulziona sila motorske grupe*, koju pilot može menjati u određenim granicama zavisno od različitih faza leta. Na ove tri osnovne sile treba dodati i četvrtu, *centrifugalnu silu*, koja deluje na avion pri letu po zakrivljenoj putanji (viraži, izvlačenje iz pikiranja). Cilj mehanike leta je izračunavanje promena ovih sila[5]) za razne slučajeve leta. Mehanika leta na taj način omogućuje određivanje performansi aviona, njegove stabilnosti, manipulativnosti, lakoće pilotiranja itd., pre nego što je avion i poleteo. Reč je uopšte o krajnje složenim matematičkim analizama, pošto male modifikacije jednog elementa mogu uticati na celokupan sistem sila koje deluju na avion, i menjati njegove performanse u letu. U ovom poglavlju razmotrićemo, u jednoj teorijskoj analizi, samo osnovne slučajeve leta i dati matematičke formulacije nekih jednostavnih slučajeva[6]).

SPUŠTANJE PLANIRANJEM

PRINCIP. Isti uslovi važe i za jedrilice i za avione koji lete sa zaustavljenim motorima. Postavljanje letilice u silazni položaj povlači uopšte progresivno povećanje brzine. Međutim, svakom silaznom uglu odgovaraju dve vrednosti napadnog ugla, za koje brzina spuštanja ostaje ravnomerna. U ovom slučaju avioni i jedrilice kreću se pod velikim napadnim uglom, što prouzrokuje male brzine translacije i male silazne brzine. Sa smanjivanjem silaznog ugla obe vrednosti napadnog ugla teže da se izjednače. Kada se izjednače, avion dostiže svoj minimalni silazni ugao, kome odgovara maksimalno horizontalno rastojanje koje je avion u stanju da preleti polazeći od jedne određene visine. Pređeno horizontalno rastojanje, podeljeno sa početnom visinom, naziva se *osetljivost* aviona ili jedrilice. Suprotno pogrešnom verovanju, svaki avion je u stanju da planira, u protivnom, njegov let bi se odvijao po balističkoj putanji, a svako ateriranje bilo bi onemogućeno.

JEDNAČINE LETA PRI SPUŠTANJU PLANIRANJEM. Pri spuštanju planiranjem sa ravnomernom brzinom dolazi do delovanja sila R i P, koje moraju biti jednake, a suprotnog smera *(sl.* 19a). Ako se aerotelo spušta po putanji nagnutoj za ugao α prema horizontali, projekcije ovih sila na ose x i z referentnog koordinatnog sistema aviona date su sledećim relacijama:

$$P\cos\alpha = R_z = \frac{1}{2} C_z \rho S V^2 \quad \text{i} \quad P\sin\alpha = R_x = \frac{1}{2} C_x \rho S V^2.$$

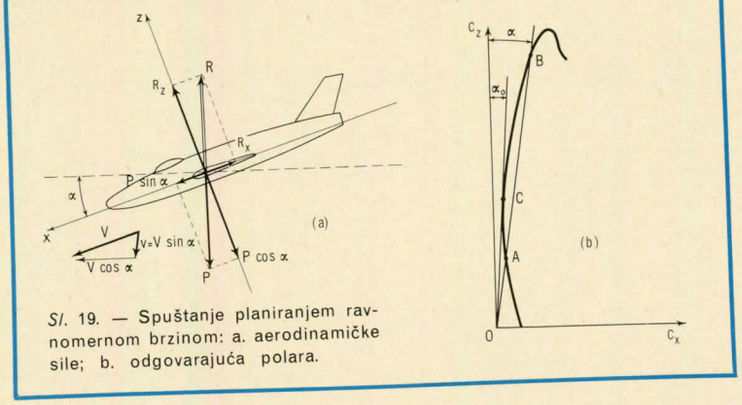
Potreban i dovoljan uslov koji omogućuje ovakav let je da aerotelo ima napadni ugao leta koji zadovoljava relaciju:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{C_x}{C_z}.$$

Na polari aparata (*sl.* 19b), konstruisanoj sa jednakim razmerama za koeficijente otpora C_x i uzgona C_z, dovoljno je tada ucrtati pravu iz koordinatnog

[5]) Radi uprošćenja pretpostavićemo da sve ove sile deluju na težište aviona.

6) Razmatranja se, prirodno, odnose na let u savršeno mirnom vazduhu.



Sl. 19. — Spuštanje planiranjem ravnomernom brzinom: a. aerodinamičke sile; b. odgovarajuća polara.

početka, pod uglom α prema osi uzgona. Presečne tačke ove prave sa polarom, A i B, određuju tada napadne uglove koji zadovoljavaju gornji uslov. Minimalni ugao sletanja je tada α_o, ugao tangente na tačku C polare. U tački C odnos:

$$\frac{C_z}{C_x}=\operatorname{ctg}\alpha_o=f,$$

koji predstavlja osetljivost aparata, jeste maksimalan.
Brzina na putanji iznosi:

$$V=\sqrt{\frac{2P}{C\rho S}},$$

što se izvodi iz uslova:

$$R=P=\frac{1}{2}C\rho SV^2.$$

Vertikalna brzina spuštanja iznosi tada:

$$v=V\sin\alpha=\sqrt{\frac{2P}{C\rho S}}\cdot\sin\alpha$$

i može se približno izraziti sa:

$$v=\sqrt{\frac{2P}{\rho S}\cdot\frac{C_x^2}{C_z^3}}$$

uzimajući da je za male silazne uglove s jedne strane:

$$\sin\alpha=\operatorname{tg}\alpha=\frac{C_x}{C_z}$$

a sa druge $C=C_z$. Minimalna vertikalna brzina sletanja dobija se za napadni ugao sletanja približno jednak maksimalnoj vrednosti napadnog ugla koji odgovara minimumu odnosa $\frac{C_x^2}{C_z^3}$.

SPUŠTANJE SA PROPULZIJOM

PRINCIP. Iz uslova koji važe za spuštanje bez propulzije izlazi da za svako aerotelo postoji minimalni ugao silaženja, što znači da je za sva aerotela bez propulzije moguć samo jedan vid kretanja — spuštanje. Ako se neka jedrilica kreće horizontalno, ili se čak uzdiže, to samo znači da postoji neka uzlazna vazdušna struja koja obezbeđuje dodatnu vertikalnu aerodinamičku komponentu. Neko aerotelo dostiže svoj minimalan silazni ugao onda kada je otpor njegovom kretanju unapred kompenzovan komponentom njegove težine u pravcu kretanja. Ostvarenjem propulzije nadoknađuje se nedostatak ove komponente težine i omogućuje horizontalan let.

JEDNAČINE SPUŠTANJA SA PROPULZIJOM. Sila propulzije T dodaje se u ovom slučaju na komponentu P sin α težine (*sl.* 20). Kada je brzina ravnomerna, jednačine ravnoteže glase:

$$P\cos\alpha=R_z=\frac{1}{2}C_z\rho SV^2 \quad \text{i} \quad P\sin\alpha+T=R_x=\frac{1}{2}C_x\rho SV^2.$$

Iz ovih jednačina izvodi se izraz za silazni ugao: $\operatorname{tg}\alpha=\frac{C_x}{C_z}-\frac{T}{P\cos\alpha}$. Na osnovu ovih izraza vidi se da uvođenje sile propulzije T omogućuje, u stvari, smanjenje minimalnog silaznog ugla, koji je pri letu planiranjem bio određen minimumom odnosa $\frac{C_x}{C_z}$. Sa propulzijom moguće je, dakle, leteti ravnomernom brzinom pod silaznim uglom koji se nalazi između α_0 i 0, odnosno do horizontale. Za $\alpha=0$ imamo $\frac{C_x}{C_z}-\frac{T}{P}=0$, uslov za horizontalni let ravnomernom brzinom.

P r i m e d b a. Pri spuštanju pikiranjem (odnosno sa konstantno rastućom brzinom), planiranjem ili uz propulziju, u momentu izvlačenja iz pikiranja (kada se avion ponovo dovodi u horizontalu) pojavljuje se član oblika $P\frac{V^2}{gr}$ koji se suprotstavlja sili uzgona.

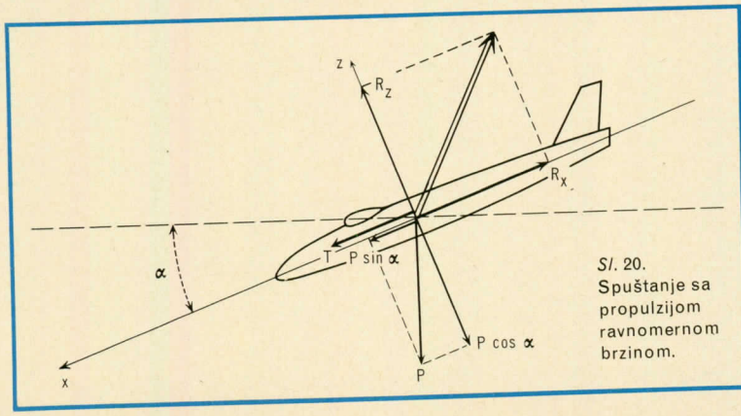
HORIZONTALNI LET

PRINCIP. Kada avion leti horizontalno *ravnomernom brzinom*, on se kreće pod određenim napadnim uglom u odnosu na pravac brzine. U ovim uslovima njegova težina se upravo kompenzuje silom uzgona, a sila propulzije uravnotežava u potpunosti silu otpora (*sl.* 21).

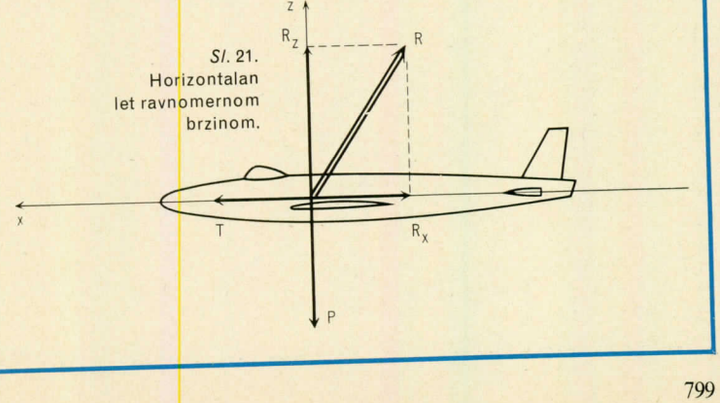
Da bi se povećala brzina leta, na prvi pogled izgleda da je dovoljno povećati silu propulzije da bude veća od sile otpora, što će dovesti do ostvarenja ubrzanja. Ovaj uslov, međutim, nije dovoljan, pošto povećavanje sile propulzije, istina, dovodi do povećavanja brzine, ali pri tom avion ne ostaje u horizontalnom letu. U stvari, povećavanje brzine dovodi u isto vreme do povećavanja sile otpora (naravno, u manjoj meri nego što iznosi povećavanje sile propulzije) i sile uzgona. Ako pilot pri tom ne deluje na komande visinske krme, avion će početi da se uzdiže. Da bi se povećala brzina, a da pri tom avion ostane u horizontalnom letu, potrebno je, dakle, postaviti avion pod određenim uglom naniže, odnosno potrebno je smanjiti napadni ugao. Za određeni režim rada motora i pri ravnomernoj brzini postoje svega dve vrednosti napadnog ugla, koje omogućuju horizontalan let. Prva vrednost odgovara već opisanom slučaju, kada kažemo da avion leti *pod malim napadnim uglom* (forsiranje režima motora dovodi tada do povećavanja brzine). Druga vrednost odgovara letu *pod velikim napadnim uglom* i gotovo se nikada ne primenjuje u praksi osim kada se želi postići maksimalna moguća brzina. Stvarno, u ovom slučaju brzina aviona je veća nego u slučaju leta sa malim napadnim uglom. Za neku određenu visinu može se u prvom približenju reći da se maksimalna brzina aviona postiže pri maksimalnom forsiranju njegovih propulzora, a pri režimu leta sa velikim napadnim uglom.

Da bi se smanjila brzina leta po horizontalnoj putanji, potrebno je analogno smanjiti silu propulzije i u isto vreme povećati napadni ugao[7]), čime se povećava sila uzgona sve do uravnoteženja sa težinom aviona. Međutim, avion može smanjivati brzinu samo do jednog određenog minimuma koji zavisi od njegove

7) Uglavnom, ovo je tačno samo za režim leta sa malim napadnim uglom.



Sl. 20. Spuštanje sa propulzijom ravnomernom brzinom.



Sl. 21. Horizontalan let ravnomernom brzinom.

konfiguracije. Stvarno, što se brzina više smanjuje, treba više povećavati napadni ugao da bi se povećao koeficijent uzgona, dakle, i sila uzgona. Međutim, za jednu određenu vrednost napadnog ugla dostiže se maksimum koeficijenta uzgona, posle čega ovaj opada sa daljim povećanjem napadnog ugla. Minimalna brzina je tada ona brzina kojom se avion kreće u horizontalnom letu pri ovoj graničnoj vrednosti napadnog ugla. Ova brzina naziva se *brzina otkačinjanja*, pošto svako dalje smanjivanje brzine ili povećavanje napadnog ugla dovodi do naglog smanjivanja sile uzgona, težina povuče avion nadole, on nije više nošen vazduhom i »otkačinje se«.

JEDNAČINE HORIZONTALNOG LETA. U slučaju horizontalnog leta sa ravnomernom brzinom sistem sila P, T i R mora biti potpuno uravnotežen, što dovodi do relacija:

$$P = R_z = \frac{1}{2} C_z \rho S V^2 \quad \text{i} \quad T = R_x = \frac{1}{2} C_x \rho S V^2, \text{ odnosno } \frac{T}{P} = \frac{C_x}{C_z}.$$

Kada se brzina menja, prvi od gornjih uslova, mora biti stalno zadovoljen, a napadni ugao se određuje iz: $C_z = \frac{2P}{\rho S V^2}$, uslova koji takođe mora biti zadovoljen i pri letu aviona na leđima. Može se primetiti da u ovom slučaju režim leta odgovara položaju na polari u zoni negativnih vrednosti koeficijenta C_z. Primetimo takođe da napadni ugao otkačinjanja odgovara jednoj karakterističnoj tački na polari: tački maksimuma koeficijenta C_z.

LET PRI PENJANJU

PRINCIP. Avion se penje ravnomernom brzinom pod nekim određenim uglom tada kada vučna sila njegovih propulzora u potpunosti kompenzuje silu otpora i komponentu težine u pravcu putanje. U stvari, ono što najviše interesuje pilota, to je *brzina penjanja* aparata, odnosno povećavanje visine u jedinici vremena; mada ovaj pojam gubi svoj smisao kod vojnih aviona presretača, gde se najčešće zamenjuje vremenom potrebnim da se dostigne određena visina od uzletanja. Pošto stepen korisnosti jednog propulzora opada sa visinom, avion se ne može beskonačno penjati. Za svaku datu brzinu aviona postoji određena visina na kojoj avion može leteti jedino horizontalno. Pošto se ispitaju svi mogući režimi leta, određuje se maksimalna visina koju avion ni u kom slučaju ne može preći, i ona se naziva *plafon*.

Penjanje po vertikali moguće je postići samo kod aviona čiji su vučna sila elisa ili potisak reaktivnog motora veći od težine aparata. Ovo je moguće postići samo u donjim slojevima atmosfere, osim u slučaju aparata snabdevenih raketnim motorima, kod kojih je režim rada nezavisan od visine.

JEDNAČINE LETA PRI PENJANJU. Komponenta R sin α dodaje se na R_x, a ove moraju biti kompenzovane sa T (*sl.* 22), pri čemu R_z mora kompenzovati P cos α da bi se avion penjao pod uglom α. Uzgred primetimo da ugao α, pod kojim se avion penje u odnosu na horizontalu, nema ničeg direktno zajedničkog sa napadnim uglom *i*. Ako je brzina V po putanji ravnomerna, jednačine ravnoteže glase:

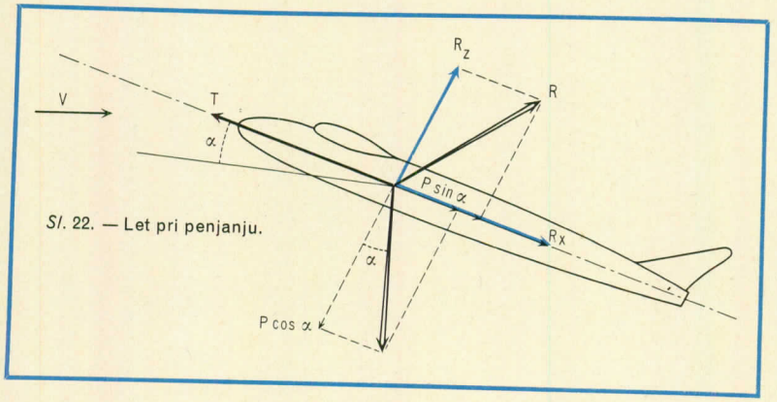
$$P \cos \alpha = R_z = \frac{1}{2} C_z \rho S V^2, \quad \text{i} \quad T = P \sin \alpha + R_x = P \sin \alpha + \frac{1}{2} C_x \rho S V^2.$$

Ugao penjanja može se lako odrediti iz ovih jednačina:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{T}{\rho \cos \alpha} - \frac{C_x}{C_z}.$$

Može se konstatovati da je algebarski ova formula identična sa formulom koja daje silazni ugao, ako se za α uzme njegova algebarska vrednost. Što se tiče brzine penjanja, čija veličina iznosi $v = V \sin \alpha$, važi jednačina:

$$v = \frac{V}{P}\left(T - \frac{1}{2} C_x \rho S V^2\right).$$



Sl. 22. — Let pri penjanju.

LET U KRUŽNOM VIRAŽU

Da bi se izveo korektan viraž, neophodno je da jedna komponenta aerodinamičke rezultante kompenzuje u potpunosti centrifugalnu silu (*sl.* 23). Upravo iz ovog razloga pilot naginje avion prema unutrašnjosti viraža za ugao koji je utoliko veći ukoliko je brzina veća, a radijus viraža manji. Aerodinamička rezultanta se tada razlaže na dve elementarne sile, koje u potpunosti uravnotežavaju težinu i centrifugalnu silu. Ako je nagib suviše mali, centrifugalna sila izbacuje avion iz viraža, dok pri suviše velikom nagibu avion klizne na niže krilo.

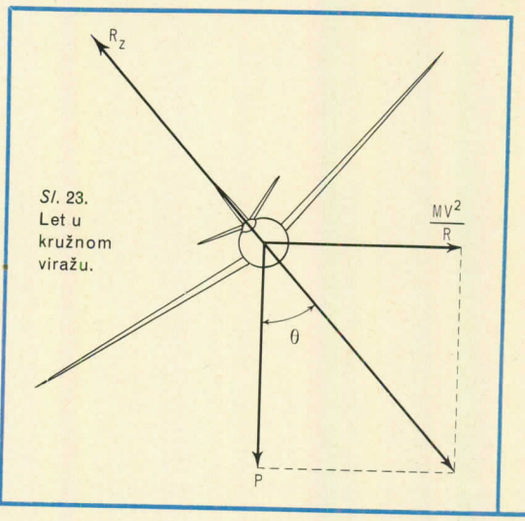
Pilot i pilotiranje

ELEMENTARNI PRINCIPI PILOTIRANJA

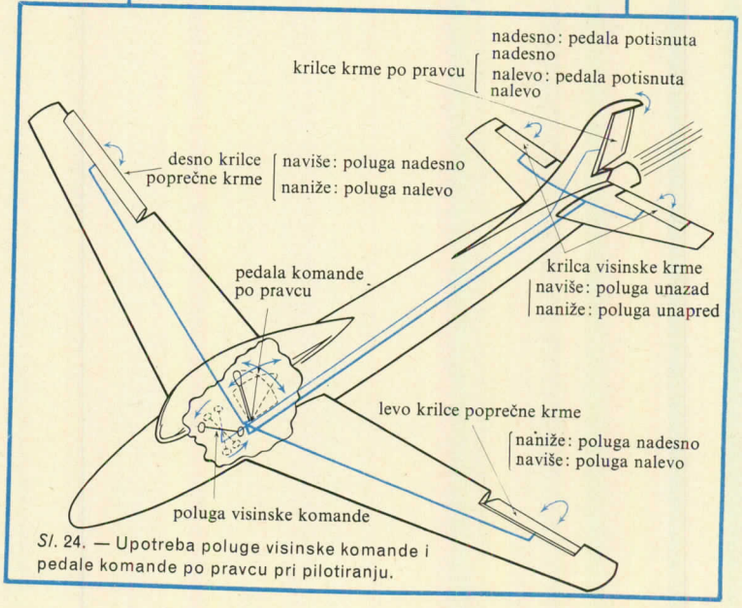
Pilotiranje avionom sastoji se u praktičnoj primeni zakona mehanike leta, upotrebom mehaničkih i aerodinamičkih sredstava kojima avion raspolaže. Ova neprekidna primena zakona mehanike obezbeđuje se delovanjem pilota na komande. Postoje tri osnovne komande: *ručica gasa, poluga visinske komande* i *pedala komande po pravcu* (*sl.* 24). Uzimajući u obzir različite mogućnosti leta aviona, lako je odrediti način na koji će komande zadovoljavati zakon mehanike leta.

• Pri *spuštanju planiranjem po pravoj liniji* koristi se samo poluga visinske komande. Potiskujući ovu polugu, pilot deluje na komande po dubini i može pomoću indikatora na instrumentalnoj tabli da reguliše brzinu spuštanja i nagib silaženja.

• Pri *spuštanju sa propulzijom* pilot treba, pored ostalog, da podesi režim rada motora da bi zadovoljio uslove spuštanja koje je sebi postavio. Treba primetiti



Sl. 23. Let u kružnom virażu.



Sl. 24. — Upotreba poluge visinske komande i pedale komande po pravcu pri pilotiranju.

da na kraju pikirajućeg leta (sa ili bez motora) pilot ispušta aerokočnice, čiji je cilj da naglo uspore aparat. Ove kočnice se takođe koriste nešto pre ateriranja, neposredno pre nego što avion dodirne zemlju.

• Pri *horizontalnom letu* sve komande ostaju u istom položaju kako bi se održala konstantna brzina.

• Pri *letu s penjanjem* pilot privlači polugu visinske komande k sebi i forsira režim rada motora da bi kompenzovao komponentu težine u pravcu putanje, koja se dodaje na silu otpora.

• Pri *kretanju u viražu* pilot deluje na pedalu komande pravca. Noga koja deluje na pedalu uvek je ona koja se nalazi prema unutrašnjosti viraža. Ovo delovanje dovoljno je da avion skrene, ali se on tada kreće po takozvanom *ravnom viražu*, u kom slučaju ga centrifugalna sila izbacuje sa putanje viraža. Korektan viraž se, dakle, ne može ostvariti a da se po pravcu ne kompenzuje delovanje centrifugalne sile, što se postiže istovremenim delovanjem kako na pedalu komande pravca tako i na polugu visinske komande. Viraž udesno, na primer, dobija se naginjanjem poluge visinske komande udesno i pritiskanjem desnom nogom na pedalu komande pravca. Delovanjem na polugu postiže se asimetrično pokretanje krilaca poprečne krme, što ima za posledicu naginjanje aparata u smeru unutrašnjosti viraža. Ovo istovremeno delovanje na komande mora biti sinhronizovano ne samo po pravcu već i po intenzitetu; suviše jako naginjanje dovešće do skliznuća aviona na niže krilo. Treba, na kraju, primetiti da svaki viraž mora da prati forsiranje režima rada motora, odnosno povećanje brzine, kako bi se kompenzovala centrifugalna sila porastom sile uzgona.

AUTOMATSKO PILOTIRANJE I ATERIRANJE. Savremeni avioni za duge letove raspolažu uređajem za automatsko pilotiranje, koji pri uključivanju preuzima u potpunosti upravljanje avionom, kako u pogledu brzine tako i u pogledu pravca leta, a po unapred utvrđenom kursu. U poslednje vreme isprobani su i serijski se proizvode uređaji za automatsko ateriranje, kao, na primer, kod francuskog mlaznog aviona za srednje duge letove »Karavela« (»Caravelle«). Ovi veoma složeni elektronski uređaji primaju sve potrebne informacije o letu aviona, o meteorološkim uslovima i o lokalnim karakteristikama aerodroma i sposobni su da avion spuste na pistu bez intervencije pilota.

PSIHOLOGIJA PILOTA

Danas je gotovo svakom čoveku omogućeno da kao putnik leti avionom. Medicinske restrikcije u tom pogledu su stvarno krajnje malobrojne. Za pilote putničkih aviona uslovi su svakako daleko oštriji, ali ipak ne suviše strogi, usled relativno oprezne evolucije performansi putničkih aviona. Ovo, međutim, nije ni izdaleka tako kod pilota savremenih brzih aviona, koji su izloženi ekstremnim naporima.

Potrebno je u samom početku naglasiti da, suprotno rasprostranjenom verovanju, brzina nimalo ne utiče na psihološko ponašanje čoveka. Naprotiv, ubrzanje može imati veoma nepovoljne posledice. Iz ovog razloga putnički avioni su tako projektovani da se izbegnu ekstremni režimi leta aviona kod kojih bi putnici mogli da budu izloženi značajnim ubrzanjima pri uzletanju, a naročito pri sletanju i u viražima. Na pilota koji sedi na svom sedištu ubrzanje može delovati na dva načina.

• Kada ubrzanje ima smer sedište-glava, a intenzitet mu je veći od 4 *g*, srce nema više dovoljno snage da snabdeva krvlju gornje delove tela, tako da mozak ostaje bez krvi. Na taj način dolazi do takozvane *crne koprene*, koja deluje na vid, ali ima prolazni karakter i gubi se veoma brzo po prestanku delovanja ubrzanja.

• Naprotiv, ubrzanje u smeru glava-sedište mnogo je opasnije. Ono dovodi do navale krvi u oblast mozga, što može dovesti do prskanja krvnih sudova i imati za posledicu gubitak svesti za duže vreme ili, čak, i smrt; reč je o takozvanoj *crvenoj kopreni*.

Kombinezoni za let pilota snabdeveni su pneumatskim uređajima, namenjenim sprečavanju ovog negativnog delovanja ubrzanja. Cevi i specijalne pregrade u kombinezonu automatski se naduvavaju pri pojavi značajnijih ubrzanja, što omogućuje regulaciju cirkulacije krvi. Ovi kombinezoni se u isto vreme nalaze pod izvesnim natpritiskom, da bi se sprečio uticaj niskog pritiska vazduha na velikim visinama. Nepovoljno delovanje visine na psihologiju čoveka takođe je značajno. Pored smetnji u disanju, koje su sve veće usled snižavanja pritiska, dolazi i do sve težeg apsorbovanja kiseonika u krvi. Maska za disanje je dovoljna da se spreči ovo delovanje sve do visina od 10 000 do 12 000 m; međutim, za veće visine neophodna je primena hermetičkih kombinezona i skafandera. Kod komercijalnih aviona u svim delovima aviona u kojima se nalaze ljudi održavaju se konstantni atmosferski uslovi, zahvaljujući specijalnim uređajima za održavanje pritiska.

NAČINI SPASAVANJA U VAZDUHU

Na svim aparatima, izuzev komercijalnih aviona čija je sigurnost veća, a performanse umerenije, postoje sredstva za individualno spasavanje za sve članove posade. Sva ova sredstva zasnivaju se na primeni padobrana, čiji je osnovni princip izložio još Leonardo da Vinči. Prva spuštanja padobranom ostvarili su iz balona, Francuz Andre Žak Gerneren (André Jacques Gernerin), 22. oktobra 1797. a iz aviona takođe Francuz Adolf Pegu (Adolphe Pégoud), 19. avgusta 1913.

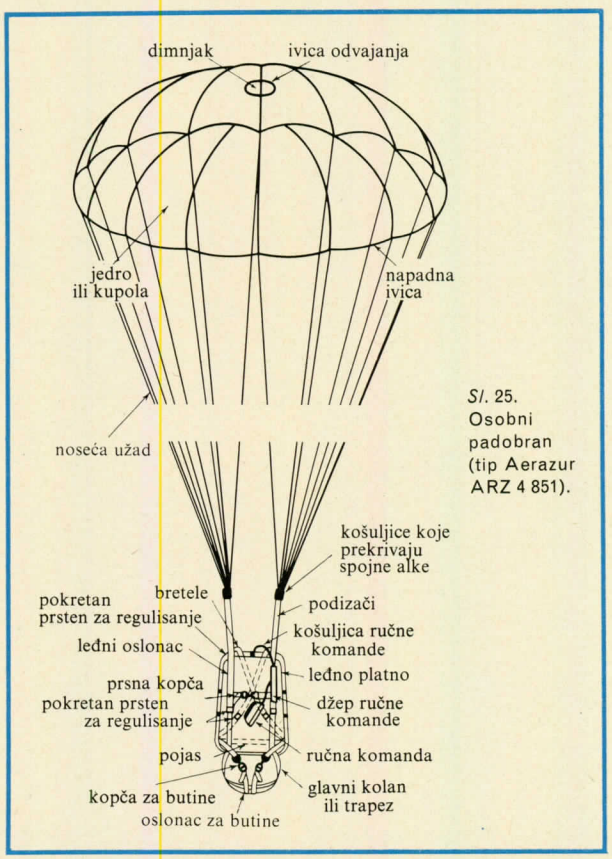
PADOBRAN. Padobran se sastoji od *kupole*, izgrađene od svile ili najlona, polusferne forme, sa kružnim otvorom na vrhu, nazvanim *dimnjak*, koji omogućuje evakuaciju vazduha koji se nagomilava u padobranu. Balon se preko velikog broja *konopaca* vezuje za *remene* koji nose čoveka ili teret (*sl.* 25). Brzina spuštanja čovečjeg tela pri slobodnom padu je reda 50 m/s; sa padobranom se ova brzina smanjuje na 6 — 7 m/s, što odgovara skoku sa visine od oko 3 m. Jedan padobran za spasavanje teži oko 8,5 kg. Razlikuju se padobrani sa balonom od jednog komada i sa balonom od traka; ovi se naročito primenjuje za skokove padobranom pri velikim brzinama i za kočenje aviona.

SEDIŠTA ZA IZBACIVANJE. Kod savremenih aviona, kada brzina pređe 500 km/h, nije više moguće osigurati spasavanje prostom primenom padobrana. Tada se primenjuju sedišta koja se automatski izbacuju. Reč je o sedištima montiranim na *vertikalnim vodicama*, koja se eksplozijom *pirotehničkih patrona* izbacuju velikom brzinom, kao projektili, iz aviona zajedno sa pilotom. Izvesna sedišta se automatski izbacuju čim pilot spusti na lice specijalnu zaštitnu masku. Izvesna imaju komandu za izbacivanje na osloncu za koleno. Najveći broj ovih sedišta izbacuje se u vis, mada su izvesne probe vršene i sa sedištima sa izbacivanjem nadole. Izbačeno sedište se stabilizuje u letu pomoću jednog malog padobrana. Odvajanje pilota od sedišta može biti automatsko ili ručno. Nakon odvajanja od sedišta pilot nastavlja da se spušta pomoću svog individualnog padobrana. Specijalna sedišta za izbacivanje konstruisana su za obezbeđivanje spasavanja pilota koji lete velikim brzinama u brišućem letu. Ova sedišta snabdevena su nizom padobrana koji se otvaraju veoma brzo jedan za drugim.

Žiroplani

OPŠTE. Žiroplani, a od ovih naročito helikopteri, doživeli su veoma brz razvoj za vreme i posle II svetskog rata. Koristeći se u punoj meri tehničkim progresom, poboljšanjem karakteristike materijala i boljim poznavanjem aerodinamičkih fenomena, aparati sa obrtnim krilima, ili žiroplani, brzo ulaze u svakodnevnu primenu. Njihove performanse veoma brzo evoluiraju, a s njima i korisna nosivost, dok se u isto vreme čine napori da im se uprosti konstrukcija i održavanje. Familija žiroplana ima tri člana: autožiro, žirodin i helikopter. Međutim, samo ovaj poslednji ima i praktičnu primenu. Principijelne razlike u funkcionisanju ove tri kategorije aparata sa obrtnim krilima su sledeće:

• Na *helikopteru* obrtna krila (ili rotor) pokreću se motorom i osiguravaju u isto vreme nošenje i propulziju aparata.



Sl. 25. Osobni padobran (tip Aerazur ARZ 4 851).

• Kod *autožiroa* propulziju obezbeđuje motor, a rotor koji se ne pokreće motorom, slobodno se obrće pod dejstvom vazdušne struje koju stvara kretanje aparata i obezbeđuje jedino nošenje u vazduhu.

• Kod *žirodina* rotor se pokreće motorom kao i kod helikoptera, ali obezbeđuje samo nošenje, dok se propulzija ostvaruje kao i kod normalnog aviona, klipnim motorom, turbo-elisnim pogonom ili turbo-mlaznim motorom. Ovaj tip letilice izgleda da je danas potpuno napušten, ako se izuzmu periodični pokušaji da se jedan ovakav aparat realizuje u turističke svrhe, pri čemu je osnovni razlog visok stepen njegove sigurnosti. U stvari, njegov rotor koji neprekidno funkcioniše u autorotaciji omogućava spuštanje u slučaju kvara motora, slično kao kod padobrana, a bez prelaznih režima kao kod helikoptera.

HELIKOPTER

ISTORIJAT. Ova danas najrasprostranjenija letilica sa obrtnim krilima u isto vreme je i najdalje otišla u svom tehničkom razvoju. Davnašnji preteča helikoptera može se naći još u radovima Leonarda da Vinčija iz XV veka, u kojima postoji projekat ovakvog aparata koji se koristi principom obrtnog Arhimedovog vijka u vazduhu. Međutim, tek 1907. Korni (Cornu) i Brege (Breguet) uzleću na prvim helikopterima. Iako 1924. Francuz Ešmišen (Oechmichen) preleće jedan kilometar po zatvorenoj putanji, na širu primenu helikoptera treba čekati sve do II svetskog rata.

KLASIFIKACIJA. Svi aerodinamički fenomeni koji regulišu let helikoptera deluju na njegov rotor. Ovaj se sastoji od elise velikih dimenzija i vertikalne osovine, koja se pokreće mehaničkom ili reaktivnom propulzionom grupom.

Mehanički helikopter. Kod ovog tipa postoji čvrsta mehanička veza između rotora i pogonskog motora *(sl.* 26). Ovo dovodi do pojave momenta koji teži da obrne masu helikoptera oko osovine koja nosi rotor, što opet uslovljava neophodnost postojanja jednog drugog rotora na repu letilice ili *elise za kompenzaciju momenta.*

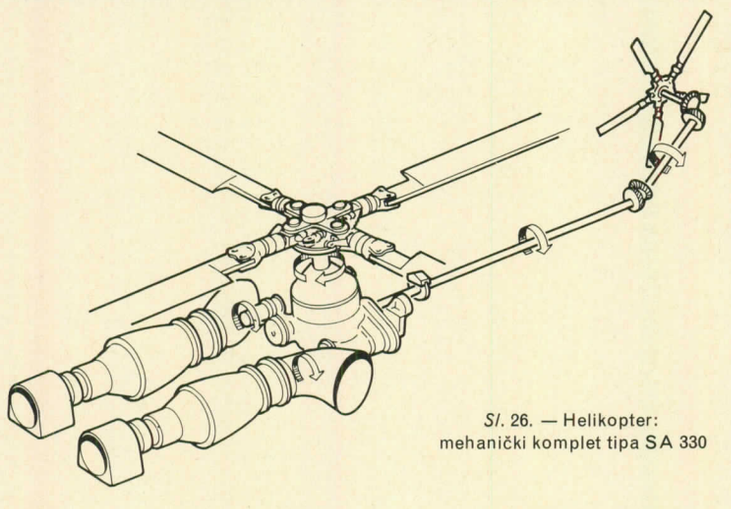
Reaktivni helikopter. Ovaj aparat ima rotor koji se slobodno obrće oko svoje ose, čime se izbegava pojava parazitnog momenta, tako da nema potrebe za elisom za kompenzaciju momenta. Pogon rotora se u ovom slučaju ostvaruje preko mlaznica na krajevima rotorske elise, koje predstavljaju male statoreaktivne ili raketne motore, ili, pak, preko otvora za izbacivanje mlaza komprimovanog vazduha, kao kod najčuvenijeg aparata ovog tipa, francuskog »Džina« (»Djinn«, *sl.* 27). U ovom slučaju izduvavanje gasa se vrši u suprotnom smeru od smera obrtanja rotora, a rotor se obrće na istom principu na kome radi prskalica za travnjake.

PRINCIP LETA HELIKOPTERA. Nošenje i propulzija obezbeđuju se isključivo silama koje se razvijaju u rotoru. Stoga je neophodno da rezultanta ovih sila bude za izvestan ugao nagnuta napred, da bi se aparat kretao horizontalno. Ovo se može postići bilo nagibom rotora, bilo primenom *cikličnih komandi koraka*, koje su neophodan element mehanike leta i pilotiranja helikoptera. Ovaj se uređaj shematski sastoji od jedne oscilujuće ploče povezane ekscentrično sa elisom rotora *(sl.* 28). Obrtanjem rotora menja se preko ovog mehanizma napadni ugao elise.

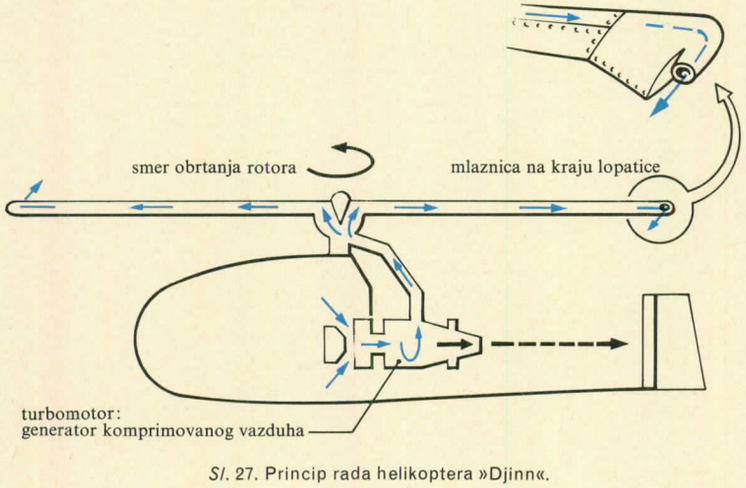
Ova komanda je neophodna iz sledećeg razloga: na jednu lopaticu rotora, koja se u grubim crtama ponaša kao krilo aviona, deluju, prilikom njenog kretanja u vazduhu, aerodinamičke sile proporcionalne brzini. Pri obrtanju rotora ravnomernom brzinom, svaka od lopatica izložena je ravnomerno promenljivoj brzini u toku jednog obrtaja oko ose rotora. U stvari, dok se lopatica kreće prema prednjem delu helikoptera, ona ima relativnu brzinu prema vazduhu koja je jednaka zbiru njene brzine i brzine, ili jednog dela brzine, kretanja helikoptera; obrnuto kada se lopatica kreće prema zadnjem delu helikoptera, ona je izložena brzini koja je jednaka razlici njene brzine i brzine (ili jednog dela brzine) kretanja helikoptera. Iz ovoga proizlazi da veličine sile uzgona i sile otpora jedne lopatice zavise od toga da li se ona kreće napred ili nazad. Ovo opet dovodi do pojave parazitnih momenata, vibracija i značajnih naprezanja u samim lopaticama. Uloga cikličnih komandi koraka upravo je u tome da automatski kompenzuje ove varijacije relativne brzine lopatica odgovarajućom varijacijom napadnog ugla lopatice tokom obrtanja. Ovo automatsko delovanje omogućava uravnoteženje veličina aerodinamičkih sila na dva poluobima rotora prilikom obrtanja.

Prilikom leta u mestu, ciklične komande koraka ne deluju i aerodinamička rezultanta kompenzuje težinu helikoptera. Pri vertikalnom uzletanju pilot simultano deluje na komandu gasa da bi forsirao režim rada motora, odnosno povećao brzinu obrtanja rotora, i na opštu komandu koraka kojom se povećava napadni ugao lopatica za jednu određenu konstantu vrednost za sve vreme obrtanja rotora. Za vertikalno spuštanje primenjuje se obrnuti postupak. Da bi prešao u horizontalni let, pilot pomera napred ručicu ciklične komande koraka, čime povećava napadni ugao lopatice u njenom krajnjem zadnjem položaju. Izložena na taj način većoj nosećoj sili nego kada se nalazi u krajnjem prednjem položaju (pri čemu sve ostale sile koje deluju na lopaticu ostaju iste) lopatica se izdiže, što joj omogućava njen loptasti zglob, čime se aerodinamička rezultanta upravlja napred, a helikopter se pokreće translatorno. Tada pilot pomera ručicu ciklične komande koraka u stranu, čime se kompenzuje disimetrija sila, o kojoj je bilo govora.

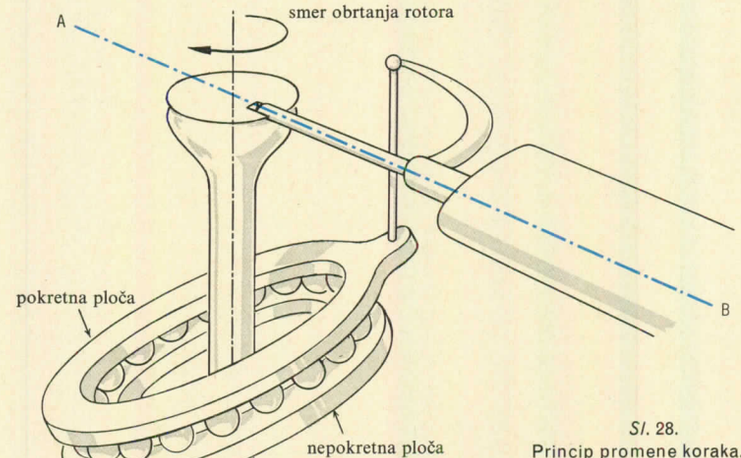
Iz samog principa delovanja helikoptera proizlazi da su pojmovi napred i nazad u ovom slučaju potpuno relativni i da, zavisno od orijentacije ciklične komande koraka, helikopter može leteti bočno, čak i unazad. Promena pravca postiže



Sl. 26. — Helikopter: mehanički komplet tipa SA 330



Sl. 27. Princip rada helikoptera »Djinn«.



Sl. 28.
Princip promene koraka.

Ciklična promena koraka: tokom jednog obrtaja nagnutost ploča primorava lopaticu da oscilira oko ose AB. Komandom se može menjati ovaj nagib po veličini i po pravcu.

Opšta promena koraka: ostvaruje se vertikalnim pomeranjem naviše ili naniže obeju ploča bez promene njihovog nagiba i orijentacije.

se delovanjem na komandu napadnog ugla lopatica repnog rotora ili, kod reaktivnih helikoptera, aerodinamičkom krmom.

Izgleda du su helikopteri u svom razvoju došli do krajnjih granica tehničke usavršenosti, naročito u pogledu brzine leta. U stvari, helikopter je mnogo više izložen nepovoljnom dejstvu lokalnih zvučnih fenomena nego avion. Ovi fenomeni se naročito javljaju pri kretanju lopatica rotora napred, tako da se lako mogu zamisliti posledice do kojih bi došlo pri pojavi transsoničnih perturbacija na lopaticama.

Kratka i vertikalna uzletanja

OPŠTE. Neprekidno poboljšanje performansi aviona dovodi do često preteranih potrebnih dužina aerodromskih pista. Sa građevinskog stanovišta ovakva infrastruktura je ekstremno skupa i ne isplati se, osim u slučaju veoma velikih urbanih sredina. Time gradovi srednje veličine ostaju lišeni prednosti koje pruža avionski transport putnika i robe. Sa vojnog gledišta ranjivost aerodromskih pista takođe nameće neophodnost traženja tehnoloških rešenja za avione sa vertikalnim sletanjem i uzletanjem [8]) (ADAV) ili bar aviona sa kratkim sletanjem i uzletanjem [9]) (ADAC).

KRATKO UZLETANJE

Odavno su već konstruktorima poznata hipernoseća krilca koja dozvoljavaju znatno sporije letove nego u slučaju normalnih konstrukcija, pri čemu se brzina otkačinjanja dovodi do veoma malih vrednosti. Ova rešenja bila su korišćena i koriste se za ostvarivanje uzletanja (i sletanja) na veoma kratkim rastojanjima. Izvesni savremeni aparati, kao »karibu« (»Caribou«), kanadske proizvodnje, imaju sistem krilaca sa veoma visokim stepenom hipernosivosti, koja omogućavaju ekstremno male brzine. Ako se izuzmu helikopteri, izgleda da je formula budućnosti za sisteme ADAC nađena u tehnici koju je u Francuskoj razvio Brege (Breguet) i primenjenoj na aparatima BR 940 i 941. Ova tehnika koristi takođe u velikoj meri hipernoseće uređaje, ali na jedan potpuno nov način. Princip ovog metoda je u sledećem: vratimo se na elementarnu aerodinamičku teoriju koja dokazuje da vazduh koji struji oko profila krila stvara noseću silu, i to, što je ovde od neobične važnosti, nezavisno od toga da li se profil kreće u vazduhu ili vazduh struji oko nepokretnog profila. Celokupna teorija formule Brege 940 (Breguet 940) zasniva se na ovoj činjenici. Krilo ovog aparata snabdeveno je po celokupnoj svojoj dužini veoma značajnim hipernosećim krilcima, koja se mogu obrnuti sve do 90°. Sa druge strane, četiri motora pokreću četiri elise veoma velikog prečnika, koje obezbeđuju neprekidnu cirkulaciju vazduha oko krila po celokupnoj njegovoj dužini. Iz ovoga proizlazi da i pri veoma malim brzinama leta vazduh struji oko krila velikom brzinom, što dovodi do veoma značajnih nosećih sila i omogućuje aparatu da uzleti ili da se spusti na rastojanjima manjim od 100 m. Pri tome su krilca nagnuta za skoro 90°, a motori rade sa maksimalnim gasom. Pošto se metod zasniva na potpunom obuhvatanju krila, dolazi do neophodnosti primene međusobno povezanih osovina elisa, kako bi se obezbedilo da se sve one obrću rigorozno istovetnom brzinom, da bi stabilnost aviona na malim brzinama ostala dobra. U isto vreme u slučaju kvara jednog motora ova međusobna povezanost osovina osigurava raspodelu snage ostala tri motora na četiri elise, bez pojave bilo kakve disimetrije u nosećim silama. U krajnjem slučaju moguće je zamisliti da će ovaj sistem biti u stanju da obezbedi vertikalno uzletanje aviona. Tehnički ništa ne stoji tome na putu, ako se ne uzme u obzir veoma velika dodatna snaga koja se zahteva od motora jedino pri uzletanju i pri sletanju.

VERTIKALNO UZLETANJE

Suprotno kratkom uzletanju, kod koga izgleda neće biti nekih većih problema u budućnosti, vertikalno uzletanje ostaje još uvek nerešen problem uprkos veoma velikom broju formula koje su bile isprobavane. Mnoge od ovih predstavljale su flagrantne neuspehe, a sve su završile nezgodama, često veoma ozbiljnim. Prvi pokušaji zasnivali su se na avionima koji su pri uzletanju postavljeni u vertikalni položaj, pa su se posle ispravljali da bi nastavili horizontalan let, kao klasični avioni. Prelaz sa jednog na drugi režim leta pokazao se veoma delikatan i formula je napuštena. Isti je slučaj bio sa francuskim projektom *Koleopter (Coléoptere)*, snabdevenim prstenastim krilima a gonjenim mlaznim motorom konstrukcije SNEKMA (SNECMA). Ovaj se srušio na zemlju pri svom prvom prelaznom režimu.

Izgleda da danas dve formule ostaju u konkurenciji: britanski »hoker P-1152« (Hawker P-1152) i francuski »miraž III-V« (»Mirage III-V«). Engleski aparat snabdeven je turbomlaznim motorom sa pokretnim mlaznicima koje izbacuju gasove vertikalno u momentu uzletanja, a potom se lagano naginju unazad da bi obezbedile propulziju u horizontalnom letu supersoničnim brzinama. Iako ovakav aparat mora biti snabdeven propulzorom mnogo veće snage nego što je potrebna za normalan let, da bi se omogućile faze uzletanja i sletanja, ipak izgleda da za danas pruža najbolju formulu, uprkos izvesnim teškoćama u pogledu pilotiranja. Već postoje u Velikoj Britaniji eskadrile ovakvih aviona-presretača. Sa druge strane, formula »miraža III-V« izgleda suviše komplikovana i nema izgleda da se dalje razvija. Ovaj avion koristi, u stvari, normalan turbomlazni motor za horizontalan let i osam malih turbomlaznih motora sa vertikalnim osovinama, koji rade samo pri uzletanju i pri sletanju. Tehnika aviona sa vertikalnim uzletanjem i sletanjem, iako neosporno predstavlja neophodnost u budućnosti, nije, dakle, za sada našla svoju definitivnu formu i još će biti predmet mnogih studija, bar u sledećoj deceniji.

Aerokosmički motori

OPŠTE. Kao i kod aerotela, najveći neprijatelj njihovih motora je težina. Svaki kilogram dobijen na težini predstavlja ili dodatan kilogram korisnog tereta, ili određen dobitak u brzini, ili određeno povećanje akcionog radijusa. Za sve moguće motore, od klipnog motora do jonskog propulzora, važi jedna osnovna tehnološka karakteristika: maksimalna snaga koja se može ostvariti pri minimalnoj težini, odnosno tehničkim rečnikom, najveća moguća specifična snaga. Iznalaženje puteva za povećavanje specifične snage bilo je često, ili čak gotovo uvek, u osnovi svih usavršavanja motora jednog određenog tipa, odnosno predstavljalo je razlog za prelazak na neki novi tip. U svim slučajevima ovo uslovljava i mehanička i metalurška istraživanja radi postizanja najjednostavnijih konstrukcija, odnosno dolaženja do najlakših materijala. Kada više nije moguće dalje smanjivati težinu, ostaje još mogućnost da se pri istoj težini poveća snaga. Tada se traže termodinamički putevi povećavanja stepena iskorišćenja, kao i hemijski putevi iznalaženja goriva visoke toplotne moći. Ovim drugim načinom dobija se dvostruko: smanjuje se specifična potrošnja (po konjskoj snazi i po času) i u isto vreme se smanjuje masa goriva potrebna za let određene dužine.

Iznalaženje puteva za dolaženje do minimalne specifične snage otežano je drugim imperativnim uslovom: izdržljivošću i sigurnošću rada. Svaki vazduhoplovni ili kosmički motor mora od kontrole do kontrole da ima izdržljivost koja znatno prevazilazi trajanje jednog tipičnog leta. Sigurnost rada motora mora biti apsolutno zagarantovana tokom celokupnog leta. Da bi se zadovoljili ovi uslovi, često je neophodno duplirati izvesne osnovne uređaje ili kola, što očigledno nepovoljno utiče na težinu motora. Kriterijumi težine i sigurnosti najviše se razilaze u pitanju izbora materijala. Na kraju, tokom mnogobrojnih ispitivanja motora, kako na zemlji tako i u letu, vrše se poslednje uštede u težini, tako da ni u kom slučaju ne bude dovedena u pitanje sigurnost rada.

Savremene motore koji se koriste u aeronautici nije moguće odvojiti od onih koji se koriste za vasionske letove; svi oni čine familiju *aerokosmičkih motora*. Međutim, potrebno je odvojiti one koji mogu raditi isključivo u atmosferi, pošto im je za funkcionisanje neophodan kiseonik (oni čine klasu *vazdušnih motora)*, od onih koji mogu funkcionisati u vakuumu koji vlada u kosmosu, bilo na taj način što sa sobom nose potreban kiseonik za hemijsko sagorevanje, bilo što koriste nove vidove energetskih izvora (ovi ulaze u klasu *bezvazdušnih motora*).

TEHNOLOŠKI RAZVOJ MOTORA. Navigacija u atmosferi ili u kosmosu uslovljava potrebu za nekom vrstom propulzije. Prvi aeronauti koristili su vetar i vazdušne struje; međutim, da bi se došlo do potpune nezavisnosti od prirodnih pojava, potrebno je raspolagati autonomnim pogonskim sredstvom, što se i logično može pretpostaviti, a što se i matematički dokazuje na osnovu izučavanja mehanike leta. Čovek je ovo shvatio još u vreme aerostata, pošto se na njima nije zaustavio već je brzo prešao na dirižable, čije već samo ime ukazuje na volju za oslobođenjem od prirodnih pojava i na želju za upravljanjem. U ovom nastojanju korišćena su ili bar isprobana, kod aerotela lakših od vazduha, različita sredstva, od sile mišića, sa Dipi de Lomom (Dupuy de Lome), preko električnih motora, sa Renarom (Renard), do benzinskih motora.

Pojava aeroplana iz osnova menja uslove problema. Intelektualni genije Klemana Adera (Clément Ader) i njegovo poznavanje tehnologije omogućavaju realizaciju prvog i jedinog parnog motora u vazduhoplovstvu. Međutim, vrlo brzo ga istiskuju *eksplozioni motori* koji pokreću elise. Tokom dugotrajne vladavine, koja ni danas nije još potpuno završena, klipni motor se neprekidno razvijao da bi zadovoljio čovekovu težnju da leti što brže. Od njega se dalje

[8]) Na francuskom Avion à Décollage et à Atterissage Verticaux (ADAV). Na engleskom Vertical Take-Off and Landing (VTOL).

[9]) Na francuskom Avion à Décollage et à Atterissage Courts (ADAC). Na engleskom Short Take-Off and Landing (STOL).

razvija čitava gama motora, koja u tehnološkom smislu povezuje parni motor *Eola* sa današnjim raketnim motorima raketa za lansiranje satelita i budućim jonskim motorima interplanetarnih raketa (*sl.* 29).

U svom razvoju klipni motor je prvo sebi pridodao kompresor za napajanje, a zatim *kompaund motora* za rekuperativnu turbinu. Time se, u stvari, dolazi do prvih začetaka gasne turbine. Zašto ograničavati mogućnosti kompresora i turbine recipročnim kretanjem klipova? Postavljajući na isto vratilo kompresor, turbinu i elisu, i napajajući turbinu komprimovanim vazduhom dobijenim iz kompresora i obogaćenim energijom u komori za sagorevanje, čovek je realizovao *turboelisni motor*. Elisa čini slabu tačku čitavog sklopa i ograničava performanse. Ona biva odbačena, smeša gasova se izduvava kroz mlaznicu koja obezbeđuje propulziju zasnovanu na širenju gasa pri izbacivanju u atmosferu, i dolazi se do *turbomlaznog motora*. Turbina, sa svoje strane, predstavlja kočnicu progresa ka veoma velikim brzinama. Zašto ne bismo i nju odbacili, zajedno sa kompresorom koji ona pokreće i koji je s njom spregnut, ako sama brzina na ulazu u motor obezbeđuje potrebnu kompresiju? Time se dolazi do čistog *mlaznog ili statoreaktivnog motora* i do njegovog bliskog srodnika *pulzoreaktivnog motora*, koji više nemaju nijedan pokretni deo. Time se, izgleda, došlo do gornje granice razvoja leta u atmosferi, dok prostor izvan gustih slojeva atmosfere privlači pažnju pionira. Mlazni motor zatvara svoj usis za vazduh i postaje *raketni motor*; u komoru za sagorevanje dovodi se gorivo sa nekim inertnim gasom obogaćenim kiseonikom. Međutim, u kosmičkom prostoru gotovo da i nema otpora kretanju. Zašto se onda opterećivati glomaznim rezervoarima za gorivo i za inertan gas sa kiseonikom? U ovom slučaju dovoljna je emisija čestice male mase veoma velikom brzinom — tako se dolazi do *jonskih motora*, *motora na plazmu* itd. Danas se ovim završava familija pogonskih motora, ali nema nikakve sumnje da će se ona u budućnosti proširiti. Aerokosmički motori prilagođavaju se tehničkim uslovima i ambijentu u kome funkcionišu sukcesivnim mutacijama, u izvesnoj meri nalik na one kod životinjskih vrsta kroz vekove.

Vazdušni motori

Aeroplan, namenjen u osnovi kretanju kroz vazduh, u početku je za svoju propulziju koristio motornu grupu koja se iz okolnog vazduha snabdevala kiseonikom potrebnim za hemijsko sagorevanje. U prvim godinama aeronautike jedini raspoloživi motor kome se mogla smanjiti težina bio je klipni motor, koji je uveliko doprineo razvoju aeronautike. Recipročno kretanje klipova ubrzo se pokazalo kao značajna kočnica povećavanju snage, tako da klipni motor mora da ustupi svoje mesto gasnoj turbini, spregnutoj sa elisom ili sa reaktivnom mlaznicom. Dalja evolucija ide ka bezvazdušnim motorima, nezavisnim od kiseonika iz atmosfere.

KLIPNI MOTORI SA ELISAMA

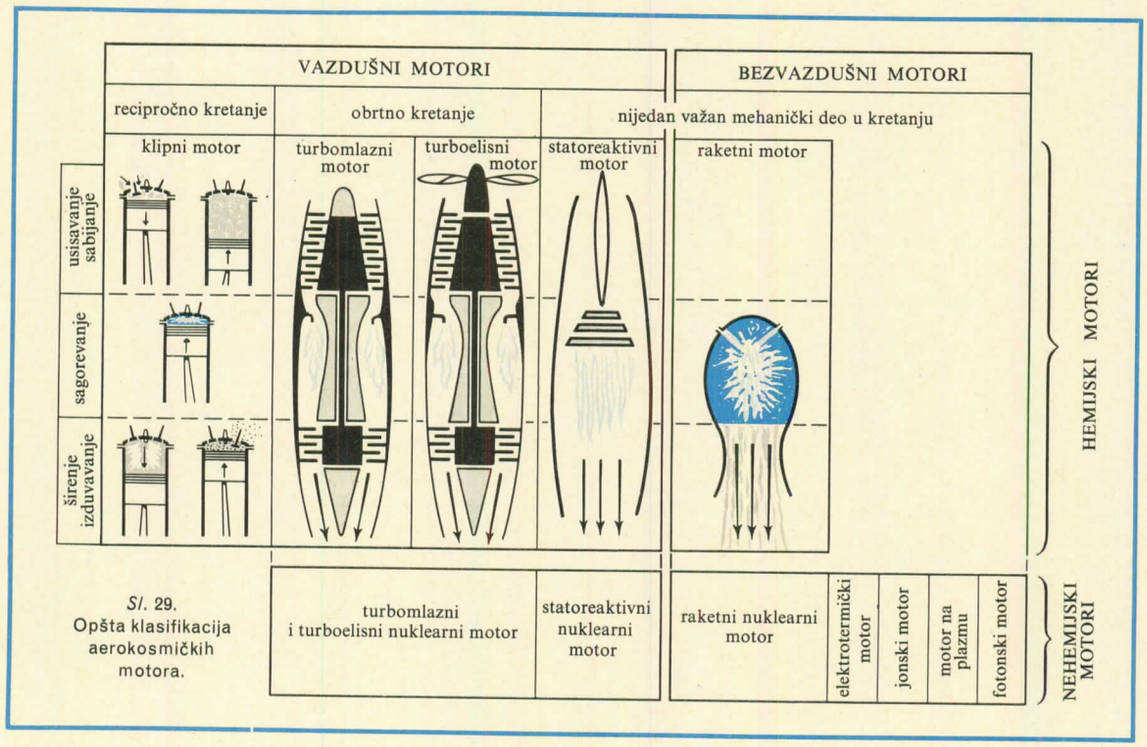
KLIPNI MOTORI. Ako se izuzme Aderov *Eol*, snabdeven parnim motorom, avijacija kreće bržim korakom tek nakon primene klipnog motora. Po svom opštem principu rada zasnovanom na četvorotaktnom ciklusu Bo de Rošaa (Beau de Rochas), avionski klipni motor se ne razlikuje od klasičnog eksplozionog motora; mada, usled svojih specifičnih uslova rada, ima izvesne karakteristike koje su mu svojstvene. Neprekidna težnja ka maksimalnoj lakoći, što je već pomenuto, dovela je do univerzalne primene lakih legura (kao što su aluminijum, duraluminijum itd.) i izvesnih specijalnih čelika u konstrukcijama avionskih motora. Ovo predstavlja prvu bitnu razliku u odnosu na zemaljske motore. Na taj način, tehničkom evolucijom postignute su kod poslednjih velikih klipnih motora specifične težine ispod jednog kilograma po konjskoj snazi, ako se računa kompletan pogonski mehanizam, odnosno ispod pola kilograma za sam motor. Kod automobilskih motora treba često računati sa više od 2,5 kg/KS. Istraživanja u domenu veoma velikih snaga, reda 5 000 do 6 000 KS, kod poslednjih projekata pred početak serijske proizvodnje gasnih turbina, orijentisala su tehniku na specijalne izvedbe radilica za pogon elisa, usled velikog broja cilindara. Što se tiče razmeštaja cilindara, mnogobrojne kombinacije bile su isprobane ili usvojene: linijski, bokser, u zvezdu — jednostruku, ili duplu, u V, W, H itd. Istraživanja ovih različitih kombinacija morala su voditi računa, pored radilice, o aerodinamičnosti linija motorske grupe i o uslovima hlađenja, koje je moglo biti vazdušno ili pomoću neke tečnosti.

Funkcionisanje i koncepcija eksplozionog motora uveliko su diktirani uslovima rada u atmosferi. Varijacije atmosferskog pritiska sa visinom znatno su uslovile diferenciranje između vazduhoplovnih i zemaljskih motora. Snaga motora opada naglo sa porastom visine. Da bi se ublažilo ovo nepovoljno dejstvo na performanse, dve osnovne tehnike bile su u primeni, neki put i istovremeno: natkompresija i prehranjivanje.

• *Natkompresija* ne zahteva nikakve specijalne uređaje, sastoji se u tome da se motor konstruiše sa većim stepenom kompresije (odnos zapremina cilindra pri usisavanju i pri paljenju smeše) nego što bi to bilo potrebno na zemlji. U ovom slučaju na malim visinama usisavanje se ograničava, kako ne bi došlo do detonacija usled samopaljenja, i postepeno se povećava sa povećanjem visine.

• *Prehranjivanje* omogućava postizanje boljih rezultata i većih snaga na visinama, ali je neophodna primena kompresora koji poništava smanjivanje pritiska sa visinom, napajajući cilindre vazduhom konstantnog pritiska, jednakog onom na zemlji ili čak nešto većeg. Ovom tehnikom obezbeđuje se konstantna snaga motora do određene visine, nazvane *visina uspostave*, kada više ni kompresor nije u stanju da obezbedi konstantan pritisak. Ovaj dobitak u snazi na velikim visinama plaća se povećanom težinom motorske grupe, pošto joj se dodaje težina kompresora, kao i izvesnim smanjenjem snage na zemlji za snagu potrebnu za pogon kompresora. Kod turbokompresora tipa Rato (Rateau), međutim, posebna turbina, koja radi na izduvne gasove iz motora, služi za pogon.

KOMPAUND MOTOR. Ovaj motor predstavlja vrhunac razvoja klipnih motora pre pojave turbomašina, čiji je direktan preteča jer kao glavni elemenat koristi *turbinu*. Kod motora velike snage najveći deo energije razvijene sagorevanjem gubi se u izduvnim gasovima iz motora. Odmah nakon I svetskog rata Rato (Rateau) je došao na ideju da iskoristi deo ove energije u turbokompresoru o kome je već bilo govora. Tokom II svetskog rata ova tehnika je dalje usavršena i energija rekuperirana na lopaticama turbine korišćena je ne samo za pogon kompresora već i za povećavanje snage na vratilu elise, uz korišćenje jednog



Sl. 29. Opšta klasifikacija aerokosmičkih motora.

zupčastog reduktora. Povećavanje snage išlo je i do 15% u odnosu na snagu samog motora.

Eksperimentisalo se i sa drugim uređajima koji bi bili u stanju da rekuperiraju energiju sadržanu u izduvnim gasovima. Jedan od ovih sastojao se od niza izduvnih cevi za gasove, od kojih je svaka funkcionisala kao neka mlaznica, što je sve dovodilo do ostvarivanja izvesnog dodatnog potiska. Jedan drugi uređaj sastojao se u zameni izduvne cevi indukcionom pumpom koja je potiskivala znatne količine vazduha radi povećavanja reaktivnog efekta.

ELISA. Nezavisno od toga da li joj za pogon služi klipni motor ili gasna turbina, princip rada elise je isti. Pogrešna je predstava da se usled svog obrtnog kretanja elisa ponaša u vazduhu kao neki otvarač za boce, uvrćući se u vazduh kao u neki zapušač. U stvari, ona deluje reaktivno, ubrzavajući vazduh koji zahvata.

Elisa se sastoji od lopatica čiji je poprečni presek sličan profilu krila, s tim što mu je napadni ugao promenljiv duž uzdužne ose lopatice, usled promene relativne brzine vazduha od baze prema kraju lopatice *(sl.* 30). U početku su elise bile sa konstantnim nagibom lopatica. Savremene elise imaju promenljiv korak, pri čemu je uređaj za promenu koraka smešten u glavčini prekrivenoj zaštitnom oblogom, koja joj daje aerodinamičku liniju. Promena koraka elise postala je neophodna da bi se osigurao optimalni stepen iskorišćenja u svim uslovima leta. Pored toga, ovaj uređaj omogućava postavljanje lopatica u položaj u vidu zastave kada dođe do kvara motora. Ovaj manevar sastoji se u tome da se lopatice postave u takav ugao prema vetru da prestanu da se okreću kao krila vetrenjače. Najzad, poslednje usavršavanje uređaja za promenu koraka sastoji se u tome što je pilot u stanju da potpuno preokrene korak elise u momentu ateriranja, kada je avion već na zemlji, tako da forsiranje rada motora dovodi do veoma efikasnog kočenja, bez bojazni od bočnog skretanja.

Radi povećavanja snage elisa, izvesni motori bili su udvajani i snabdeveni sa dve koaksijalne elise, koje su se obrtale u suprotnim smerovima. Ovakav uređaj, međutim, nije doživeo dalji razvoj.

Elisa se u početku sastojala od svega dve drvene lopatice. Savremene elise snabdevene su sa pet do šest metalnih, punih ili šupljih lopatica. Danas elise turboelisnih motora imaju još veći broj lopatica konstantnog dubinskog profila, sa ravnim završetkom.

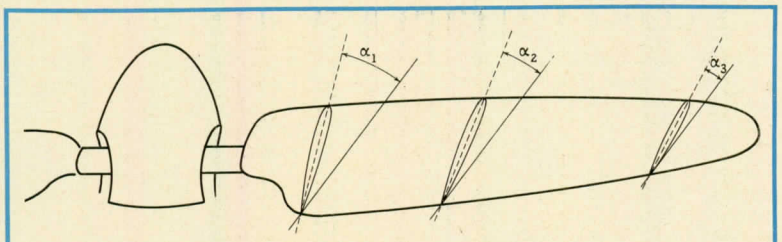
Najnoviji model predstavljaju elise koje se izučavaju od 1958. godine u Nor-Aviasion (Nord-Aviation) i kod firme Berten (Bertin), u Francuskoj, i koje izgleda, omogućavaju realizaciju aviona sa kratkim ili, čak, vertikalnim uzletanjem. U ovom slučaju elisa (ili ventilator) smešta se u grlo jednog prstena aerodinamičke forme. Interakcija vazdušnog protoka sa zidovima prstena dovodi do povećavanja stepena iskorišćenja i potiska, usled toga što se javljaju nove, aerodinamičke sile koje se dodaju na vučnu silu elise.

TURBINSKI VAZDUŠNI MOTORI

ISTORIJAT. Mnogo pre nego što su se elise pokazale nemoćne da zadovolje nove željene performanse letilica, istraživači su izučavali sisteme propulzije bez elisa. Ako se izuzmu istraživanja raketnih motora, čije je funkcionisanje nezavisno od vazduha, trebalo je čekati sve do XX v. da se pojave termičke mašine koje rade na čisto reaktivnom principu. Među prvima to su bili motor Markone (Marconnet) iz 1909., koji, u stvari, predstavlja preteču pulzoreaktivnih i statoreaktivnih motora, i motor Karavodin (Caravodine) iz 1910, koji, još u gruboj i nerazrađenoj formi, predstavlja preteču gasnih turbina. To je bio prvi motor koji je omogućavao direktno pretvaranje energije sadržane u izduvnim gasovima u mehaničku energiju, posredstvom turbinskih lopatica, mada sa veoma niskim stepenom iskorišćenja. Među slavnim pretečama ne treba zaboraviti Francuza Anrija Koandaa (Henri Coanda,) koji je u Aeronautičkom salonu 1909. prikazao avion bez elisa, snabdeven reaktivnim motorom. Ovo je bio prvi reaktivni avion koji je uzleteo, iako je uništen tokom prvog uzletanja, a sam let mu je bio veoma kontroverzan.

Otprilike u isto vreme Francuz Loren (Lorin) radi na principu jednog reaktivnog motora. Njegove studije dovele su 1913. do prijave patenta statoreaktivnog motora ili termopropulzione mlaznice, koju je zatim ponovo otkrio i prvi praktično ostvario Ledik (Leduc) između 1930. i 1950.

Princip gasne turbine definitivno je u osnovnim linijama ostvario Britanac ser Frank Vajtl (Frank Whittle) 1930, a usavršio ga je takođe on 1937. Slične studije



Sl. 30. — Uzdužna promena profila lopatice elise
$\alpha_1 > \alpha_2 > \alpha_3$.

vršene su paralelno i u Nemačkoj. One su 1939. dovele do prvog leta Hajnkela (Heinkel) i do prve eskadrile aparata u pogonu, Meseršmita (Messerschmitt) 262 »švalbe« (»Schwalbe«), 1943. Godine 1941. Italijan Kaproni (Caproni) ostvaruje let »kampinija« (»Campini«) snabdevenog klipnomlaznim motorom, formulom koja nije imala budućnosti. Iste godine je u Velikoj Britaniji izveden prvi let »glostera« (»Gloster«), a od 1943—1944. prvi operativni lovci snabdeveni turbomlaznim motorima, britanski gloster »meteor« i američki »erakobra« (»Airacobra«), izlaze serijski iz fabrika u Britaniji i Sjedinjenim Državama.

Tehnička usavršavanja omogućila su prvo dostizanje brzine od 1 000 km/h, zatim dostizanje brzine zvuka i, najzad, dostizanje brzina od 2 000 i 3 000 km/h. Dok se prvi komercijalni nadzvučni avioni nalaze u izgradnji[10], izgleda da je gornja granica primene turbomlaznih motora u atmosferi 3 do 3,5 Maha. To ne znači da će gasne turbine potpuno ustupiti svoje mesto raketnim motorima, kao što ni elise nisu ustupile u potpunosti svoje mesto turbomlaznjacima. Ovi će nastaviti da služe na brzim aparatima i naći će novu primenu za propulziju prvih stupnjeva budućih aerokosmičkih transportera. Danas se već ostvaruje savršen kontinuitet između aviona i raketa.

KLIPNOMLAZNI MOTOR. Iako ima samo istorijski značaj, ovaj tip motora predstavlja veoma interesantan pokušaj da se poboljšaju performanse u vazduhu. Ovaj pravac razvoja, koji se pokazao kao tehnički ćorsokak, ipak je pokazao da su inženjeri koji su u njemu učestvovali, načeli problem propulzije bez elisa, koji će biti rešen tek pojavom turbine, nekoliko godina kasnije. Za tehniku klipnomlaznih motora vezana su imena Francuza Koandaa (Coanda) i Lorena (Lorin), Nemca Junkersa (Junkers) i Italijana Kapronija (Caproni).

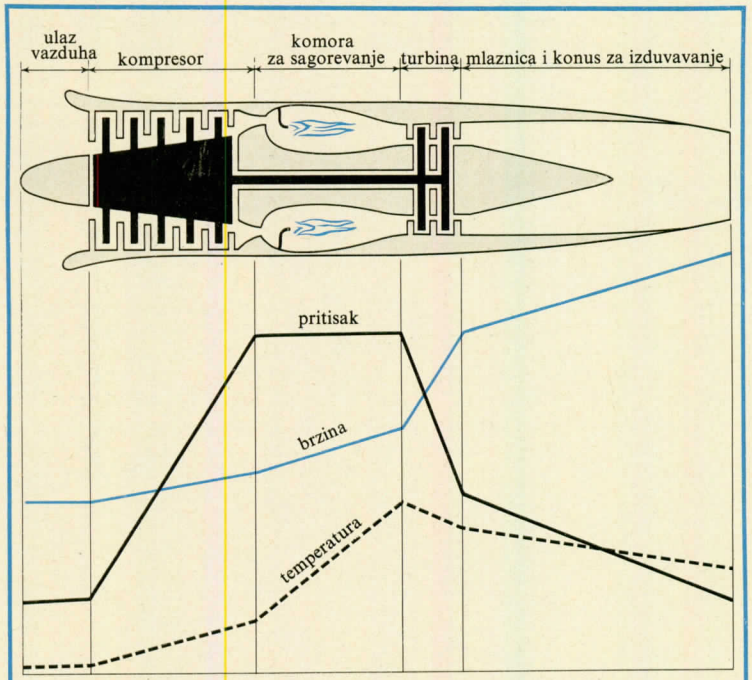
Klipnomlazni motor sastoji se u biti od klipnog motora koji pokreće kompresor; vazduh koji usisava kompresor meša se sa izduvnim gasovima iz motora i vodi u komoru za sagorevanje, a zatim u izduvnu mlaznicu.

Pored kontroverznog aviona Koandaa, 1909, jedini aparat snabdeven klipnomlaznim motorom koji je leteo, bio je Kapronijev »kampini CC2« (»Campini CC2«), koji je 1941. godine preleteo rastojanje od Milana do Rima brzinom od oko 300 km/h.

GASNA TURBINA. Pod opšti naziv turbomašina svrstavaju se svi propulzori kod kojih je osnovni element gasna turbina, jer obezbeđuje pogon svih obrtnih delova propulzora. Sama propulzija može se potom izvesti na različite načine.

OPŠTI PRINCIP RADA I SASTAVNI DELOVI. Vazduh koji se usisava kroz usisne otvore gasne turbine doživljava niz sukcesivnih transformacija radi dobijanja traženih karakteristika, potrebnih za njegovu primenu kao propulzionog agenta *(sl.* 31). Iako ove transformacije dovode do različitih karakteristika u funkciji usvojenog načina propulzije a materijali koji učestvuju u svakoj određenoj transformaciji mogu se veoma razlikovati, opšti princip rada ostaje isti. Ne treba misliti da se gasna turbina, uprkos svome izgledu, bitno razlikuje od klipnog motora. Ona je zasnovana na istom termodinamičkom principu i ima sve elemente čuvenog četvorotaktnog ciklusa Bo de Rošaa:

[10]) U fazi probnih letova. — Prim. prev.



Sl. 31. — Delovi gasne turbine i promena brzine, pritiska i temperature gasa u turbini.

kompresiju, sagorevanje, širenje i izduvavanje. Dok se u cilindru jednog klipnog motora ovi elementi ciklusa sukcesivno vremenski smenjuju, kod gasne turbine oni se odvijaju istovremeno, ali na različitim mestima. Uprošćeno govoreći, moguće je iz tog razloga shvatiti zašto jedna gasna turbina može proizvesti veću količinu energije: ona to radi kontinuirano, dok se kod klipnih motora samo u jednom taktu od ukupno četiri oslobađa energija u cilindru. Četiri osnovna elementa jedne turbomašine su: *kompresor*, *komora za sagorevanje*, *turbina* i *izduvna mlaznica*.

Kompresor. To je prvi element koji vazduh sreće pri prolazu kroz gasnu turbinu. U njemu se sabija pod osetno adijabatskim uslovima, ako se zanemari prelaz toplote na zidove cilindra. Uvek rotacioni, kompresor može biti centrifugalni ili aksijalni.

• Prvi se upotrebljavao *centrifugalni kompresor*. Vazduh se usisava uz osovinu kompresora i zahvata lopaticama koje se pružaju prema periferiji i obrću velikom brzinom. Ovaj tip kompresora ne ostvaruje veće stepene kompresije od 5 i veoma je glomazan.

S druge strane, veoma ga je lako konstruisati i zahteva neznatno održavanje usled svoje glomaznosti. Danas se koristi samo za gasne turbine malog ili srednjeg potiska. U stvari, ne može se koristiti za velike snage, pošto maksimalni prečnik lopatica ne može biti veći od određene vrednosti. Kod većih prečnika, ono što bi se dobilo na snazi, biva uveliko izgubljeno usled aerodinamičkih otpora, tako da bilans može postati i negativan. Ovakvo stanje dovelo je do primene aksijalnih kompresora.

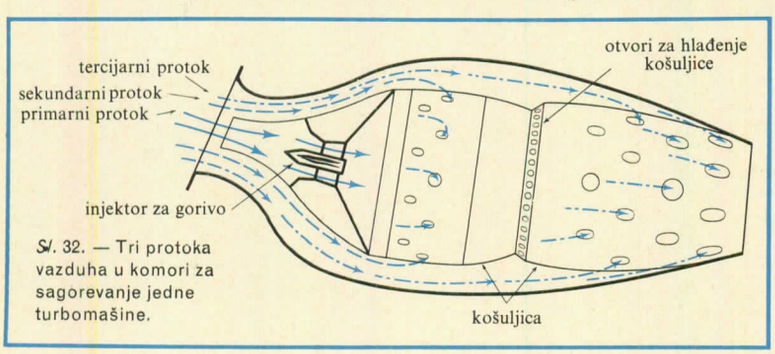
• *Aksijalni kompresor* sastoji se u osnovi od izvesnog broja redova pokretnih lopatica (stepeni rotora) postavljenih naizmenično sa redovima nepokretnih lopatica (stepeni statora). Oblik i brzina obrtanja lopatica rotora tako su projektovani da, zavisno od brzine leta i oblika lopatica statora, pritisak vazduha koji prolazi kroz kompresor raste od stepena do stepena. Za određeni prečnik lopatica efikasnost aksijalnog kompresora je, dakle, veća od efikasnosti centrifugalnog kompresora. U prvoj aproksimaciji stepen kompresije ne zavisi više samo od prečnika, već i od broja stupnjeva. Za aparate koji lete velikim Mahovim brojevima i za turbine velikog potiska, aksijalni kompresor predstavlja jedino rešenje. Dostižu se stepeni kompresije veći od 14, a broj stupnjeva može biti i 20. Da bi se još više povećao stepen kompresije, kod izvesnih turbomašina koriste se kompresori iz dva dela, koji se obrću različitim brzinama.

Komore za sagorevanje. Vazduh nakon prolaska kroz kompresor odlazi u komore za sagorevanje, u kojima se obavlja drugi takt četvorotaktnog ciklusa. Dok su prve gasne turbine imale čitavu nisku komora za sagorevanje, raspoređenih koncentrično oko ose turbine, savremena tendencija je da se zamene jednom jedinom komorom prstenastog oblika. Ovaj stepen ukupnog ciklusa je i najsloženiji tehnološki, jer u njemu simultano dolaze do izražaja zakoni hemije, fizike, geometrije, aerodinamike, termodinamike, metalurgije itd. U komorama za sagorevanje vrši se pretvaranje hemijske energije, sadržane u gorivu, u toplotnu energiju, a ova se predaje vazduhu koji dolazi iz kompresora. Ova energetska transformacija vrši se na visokim pritiscima do 6 kg/cm², i na visokim temperaturama reda 850 do 900°C. Prilikom prolaska kroz komoru za sagorevanje vazduh zadržava pritisak koji je imao na izlazu iz kompresora (ako se zanemare gubici od strujanja); međutim, njegova brzina, a pogotovo temperatura, znatno se povećavaju. Gorivo se može direktno ubrizgavati u vazdušnu struju u vidu finih kapljica, ili se prethodno može pretvoriti u paru u specijalnim uređajima. Sa svoje strane protok vazduha se deli u više protoka *(sl. 32)*, čije su uloge komplementarne.

• *Primarni protok* dovodi se direktno u blizinu gorionika i čini jezgro plamena. Tako najveći deo goriva sagoreva u najboljim mogućim uslovima, na temperaturi koja prelazi 2 000°C.

• *Sekundarni protok* dovodi se nešto dalje nizvodno i omogućava dovršavanje sagorevanja, kako ne bi ostalo nesagorivih čestica koje bi dovele do smanjenja stepena iskorišćenja i oštećenja turbine.

• *Tercijalni protok* može činiti tri četvrtine ukupnog protoka vazduha koji se dovodi u komoru za sagorevanje, a uvodi se tek u drugom delu komore, pri čemu je prethodno služio za hlađenje zidova njenog prvog dela. Osnovna mu je uloga da snizi temperaturu smeše gasova u momentu njenog ulaska u turbinu. Kada bi celokupan kiseonik iz vazduha sagoreo sa gorivom, temperatura gasa bila bi oko 2 000°C, kao i u jezgru plamena, a stepen iskorišćenja motora bio bi znatno veći. Međutim, za sada nema materijala za delove turbine koji bi mogli da izdrže temperature više od 850 do 900°C, tako da je uvođenje tercijalnog vazduha, na žalost, neophodno.



Sl. 32. — Tri protoka vazduha u komori za sagorevanje jedne turbomašine.

Turbina. U turbini se iskorišćava jedan deo energije sadržane u smeši gasova. Gasovi predaju lopaticama turbine jedan, manji ili veći, deo energije koju su primili tokom prolaza kroz kompresor i komoru za sagorevanje. Prvi red nepokretnih lopatica upravlja, uglavnom, mlaz gasa na lopatice turbine postavljene po perimetru jednog diska koji se na taj način pokreće. Tokom ovog procesa brzina gasa raste, ali mu pritisak i temperatura opadaju. Turbinsko kolo je elemenat veoma složen za izradu, a njegovo projektovanje je veoma kompleksno. Izloženo visokim temperaturama (850°C), značajnim varijacijama pritiska (oko 2 do 3 bara razlike pritiska od ulaza do izlaza), turbinsko kolo predstavlja elemenat motora na koji se koncentrišu savremena istraživanja, kako na planu korišćenih materijala, tako i na planu aerodinamike strujanja.

Izduvna mlaznica. Iako po svojoj formi na prvi pogled nalikuje prostoj izduvnoj cevi, ovaj elemenat ne služi samo zato da obezbedi izduvavanje sagorelih gasova, kao kod klipnih motora, već se, naprotiv, baš u ovom delu turbomašine stvara reaktivni potisak za propulziju. Tokom prolaza kroz unutrašnjost turbomašine brzina vazduha (ili pre smeše gasova) neprekidno raste. Na ulazu u izduvnu mlaznicu gas poseduje značajnu kinetičku energiju, uvećanu za vrednost unutrašnje energije zagrejanih gasova na povišenom pritisku. Ova masa gasa biva izduvavana velikom brzinom i time daje avionu određenu brzinu, saobrazno opštem zakonu o konzervaciji momenta količine kretanja. Potrebno je, dakle, istraživati puteve postizanja što većih brzina izduvavanja, pa je, stoga, oblik izduvne mlaznice predmet mnogobrojnih studija. Mlaznica u opštem slučaju sadrži u svojoj unutrašnjosti konus čiji je vrh upravljen prema izlazu i koji se oslanja na disk turbinskog kola. Ovaj konus ima ulogu da umanji turbulenciju gasne struje na izlazu iz turbine, odnosno da time eliminiše jedan od uzroka usporavanja gasnog mlaza.

Na kraju naglasimo još i to da turbomašina predstavlja rezultat niza kompromisa između zahteva teorije i mogućnosti tehnologije, koji često mogu biti veoma kontradiktorni. Krajnje performanse zavise uveliko od studija i ispitivanja u domenu termodinamike, mehanike, aerodinamike, hemije itd. U završnoj fazi projekta nisu više moguća parcijalna poboljšanja pojedinih organa koji predstavljaju slabu tačku. U najvećem broju slučajeva time bi došlo do narušavanja ravnoteže raznih kompromisa koji su uspostavljeni tokom projektovanja. Iz ovog razloga razvitak turbomašina ide u više grana kojima je jedino osnovni princip zajednički, dok se u koncepcijama sastavnih delova mogu veoma razlikovati.

TURBOMLAZNI MOTOR. Osnovna karakteristika ovog motora je u tome što gasna turbina obezbeđuje propulziju isključivo reaktivnim dejstvom, odnosno izbacivanjem gasa unazad. Na taj način turbina služi isključivo za pogon kompresora i obezbeđenje rada sistema za podmazivanje, pumpi za gorivo itd., dok se najveći deo energije gasova koristi u izduvnoj mlaznici, koja obezbeđuje propulziju.

Na ovom mestu potrebno je utvrditi vezu koja postoji između potiska ostvarenog turbomlaznim motorom i snage, u klasičnom smislu, jednog elisnog motora. Ekvivalentna snaga jednog turbomlaznog motora može se odrediti samo za određenu brzinu leta, pošto je jednaka proizvodu potiska i brzine kretanja aviona. Sam potisak takođe zavisi od brzine leta, pošto je proporcionalan proizvodu mase gasa koja se izduvava i razlike brzine izduvavanja gasa i brzine leta aviona.

Uopšte, tehnički opis turbomlaznog motora odgovara u potpunosti svemu što je rečeno za gasnu turbinu. Odlikuje se, međutim, u izvesnim slučajevima, specifičnom tehnologijom.

• Izvođenje *ulaza vazduha* uvek je predmet posebnih studija za svaki tip aviona. Ogromne mase vazduha koje bukvalno »guta« turbomlazni motor tokom leta poseduju određene specifične aerodinamičke karakteristike, koje je potrebno uskladiti sa opštom aerodinamikom određenog aviona. U različitim konfiguracijama leta turbomlazni motor mora biti na odgovarajući način napajan vazduhom, što zavisi od oblika ulaza vazduha. Ovaj dakle čini glavnu vezu između motora i ostalog dela aviona, čak, možda, više nego konstruktivni elementi na koje se motor oslanja. Oblik ulaza vazduha, u stvari, zavisi i od aviona i od motora koji ga pokreće.

• Postavljanje *izduvne mlaznice* takođe zavisi od koncepcije letilice na turboreaktivni pogon, pošto gasovi koje ona izbacuje imaju veoma visoku temperaturu. Potrebno je tako izvesti mlaznicu da mlaz ni u kom slučaju ne može dostići nijedan vitalan deo konstrukcije aparata, na primer, komandna krilca, bez obzira na položaj aviona u letu.

Ako je poprečni presek na izlazu gasa iz mlaznice konstantan, kada avion počne da dobija u visini, potrebno je povećati broj obrtaja motora, uglavnom zbog snižavanja spoljašnje temperature. Ovo ima za posledicu povišavanje temperature gasova na ulazu u turbinu, a ova ne sme preći određenu granicu (850 do 900°C). Čak i u slučaju da se na niskim visinama radi sa redukovanim brojem obrtaja motora, na većim visinama turbomlazni motor vrlo brzo dostiže svoj maksimalan režim rada. Potrebno je, stoga, nepekidno kontrolisati režim rada motora, kako bi se ostalo u granicama dozvoljene temperature sa gledišta lopatica turbine. Da bi se izbegle ove neugodnosti, primenjuje se rešenje u vidu mlaznice sa promenljivim izlaznim presekom, pri čemu se površina izlaznog preseka menja u zavisnosti od temperature na ulazu u turbinu. Ovo rešenje moguće je ostvariti na nekoliko načina:

— *Mlaznice sa iglom* imaju jedan konus u unutrašnjosti mlaznice čijim se uzdužnim pomeranjem menja površina izlaznog preseka.

— *Mlaznice sa pokretnim žaluzinama* mogu biti sa dve žaluzine. Ove deluju u vidu čeljusti i imaju taj nedostatak što deformišu mlaz dajući mu eliptičnu formu, a to dovodi do povećane turbulizacije. Takođe mogu imati više žaluzina koje tada deluju u vidu dijafragme.

— *Mlaznica sa sužavanjem mlaza*, konstrukcija SNEKMA (SNECMA), nema nijednog pokretnog dela. Modifikacija izlaznog preseka postiže se mlazevima komprimovanog vrelog vazduha koji deluju na periferiju mlaza gasa na izlazu iz mlaznice. Kod aviona koji se kreću supersoničnim brzinama, većim od 1,5 Maha, klasična mlaznica, neznatno sužena, dovodi do izvesnog opadanja potiska usled usporavanja struje prouzrokovanog udarnim talasima (fenomen koji se javlja kod *soničnih mlaznica*). Da bi se povećala brzina izduvavanja, odnosno razlika pritisaka, a time i potisak, potrebno je primeniti konvergentno-divergentnu mlaznicu. U difuzoru tada brzina postaje ponovo nadzvučna i uspostavlja se normalan režim rada.

Izduvna mlaznica jednog turbomlaznog motora može biti snabdevena raznim dodatnim uređajima, od kojih su dva najvažnija: *skretač mlaza*, koji se naziva i *invertor potiska*, i *utišivač*. Inverzija mlaza neophodna je da bi se kod brzih aviona obezbedilo efikasno kočenje pod svim uslovima. Princip ovoga kočenja, koji je u Francuskoj usavršila SNEKMA (SNECMA), je sledeći: red nepokretnih kružnih lopatica postavlja se na sam kraj mlaznice; u momentu kočenja izvlače se u centar mlaza dva polukružna zatvarača na izlazu iz mlaznice; ovi upravljaju mlaz na red lopatica koje ga usmeravaju u pravcu kretanja aviona. Utišivači su uvek predmet mnogobrojnih studija, ali još ne postoji neko dobro standardno rešenje ovog problema. U stvari, veoma je teško realizovati utišivače koji u isto vreme ne apsorbuju i znatnu količinu energije. Na avionima sa vetrikalnim uzletanjem postoje dodatni uređaji za pomeranje mlaznice. Oni su pronađeni u Velikoj Britaniji i koriste se na apratima »hoker P-1127« (Hawker P-1127). Kod ovog aparata turbomlazni motor ima četiri mlaznice, po dve sa svake strane aviona. Ove su izvedene u vidu lakta, tako da mogu biti okrenute u bilo koji položaj, od vertikalnog (za uzletanje, ateriranje i penjanje) do horizontalnog (za normalan let).

• *Naknadno sagorevanje* je najrasprostranjeniji način za naglo povećavanje potiska jednog turbomlaznog motora *(sl.* 33). Pošto temperatura vazduha u turbini ograničava performanse, što dovodi do povećavanja protoka vazduha koji cirkuliše kroz motor, u izduvnim gasovima ostaje znatan deo neupotrebljenog kiseonika koji se može koristiti za naknadno sagorevanje. Turbomlazni motor koji sadrži uređaj za naknadno sagorevanje, umesto da se direktno završava izduvnom mlaznicom, postavljenom neposredno iza turbine, poseduje još jednu spojnicu i jednu produžnu cev, koja se završava mlaznicom. U produžnoj cevi instalisani su injektori za gorivo i stabilizatori plamena. Sagorevanje dodatnog goriva, ubrizganog neposredno pred mlaznicom, dovodi do povećavanja potiska od oko 30%. Ova dodatna snaga staje, u stvari, veoma skupo, pošto je potrošnja goriva za naknadno sagorevanje veoma velika, a ovaj uređaj troši gorivo čak i kada ne funkcioniše, zbog postojanja produžne cevi i uređaja koji su u njoj smešteni. Pri normalnom letu pad pritiska pri protoku gasa kroz ovaj deo odgovara gubitku potiska od oko 5%, što dovodi do odgovarajućeg povećanja potrošnje goriva.

• *Turbomlazni motor sa dvojnim protokom* ima osnovni protok vazduha, koji prolazi kroz sve faze klasičnog ciklusa gasne turbine, i dodatni protok vazduha, koji se izdvaja iz kompresora i meša sa osnovnim protokom tek u izduvnoj mlaznici (*sl.* 34). Stepen iskorišćenja ovog tipa turbomlaznog motora veći je od onoga kod klasičnog turboreaktivnog motora pri brzinama od 700 do 900 km/h. Međutim, pošto se apsorbuje znatno veća količina vazduha, dolazi i do povećanja glavnog momenta u odnosu na ostale turbomlazne motore. U izvesnim slučajevima dodatni protok se može ponovo priključiti osnovnom protoku ispred turbine. Postoje i turbomlazni motori »sa ventilatorom« (*ducted fan*), koji imaju specijalan ulaz za dodatni protok vazduha. Za obezbeđenje cirkulacije ovog protoka potrebno je instalisati poseban ventilator, koji pokreće turbina niskog pritiska.

TURBOELISNI MOTOR. *Turbopropulzioni motor* (ili, tačnije, *turboelisni motor)* sastoji se od gasne turbine koja se izvodi tako da pokreće elisu. Ni u kom slučaju nije reč o nekom međustupnju između klipnog motora i turbomlaznog motora, već samo o srodniku ovog poslednjeg. U stvari, turboelisni i turbomlazni motori imaju iste osnovne sastavne elemente: kompresor, komoru za sagorevanje, turbinu i mlaznicu. Međutim, uloga ovih elemenata je različita, prema tome, i njihova konstrukcija. Što se tiče kompresora i komore za sagorevanje, modifikacije su neznatne i dolaze isključivo usled različitih režima rada ovih elemenata kod ova dva tipa motora. Ovo se, međutim, nikako ne može reći za turbine i mlaznice čije su uloge, u stvari, invertovane kod ova dva tipa motora. Kod turboelisnog motora energija saopštena turbini ne služi isključivo za pogon kompresora, pumpi za napajanje gorivom, alternatora i svih ostalih pomoćnih uređaja, već takođe, i pogotovo, za pogon elise koja pokreće avion. Turbina je znatno većih dimenzija nego kod turbomlaznog motora i tako je projektovana da apsorbuje najveći deo energije iz sagorelih gasova. Na odgovarajući način umanjena je uloga izduvne mlaznice, ali ne dotle da služi samo kao izduvna cev, kao kod klipnih motora, pošto stepen iskorišćenja turbine nije 100%. Izduvna mlaznica služi, dakle, da se u njoj iskoristi jedan deo energije koja je još sadržana u izduvnim gasovima. Ova energija obezbeđuje dodatni *zaostali potisak* turbopropulzora. U letu se ovaj potisak nadodaje na vučnu silu koju ostvaruje elisa. Učešće ovog potiska u ukupnoj energiji za pokretanje aviona povećava se sa povećavanjem brzine aviona.

Uglavnom, turbina se sastoji od dva odvojena dela koji se obrću različitim brzinama. Iako jedna jedina turbina može pokretati u isto vreme i kompresor i elisu, rešenje zasnovano na dvostepenoj turbini, kod koje jedan stepen pokreće elisu, a drugi kompresor, znatno je bolje, pošto se u ovom slučaju izbegava uticaj režima rada elise na režim rada kompresora.

Još jedan neophodan element turboelisnog motora je *reduktor* koji se postavlja na početku vratila elise. Da bi se postigao dobar opšti stepen iskorišćenja turbine, najčešće je potrebno da ove rade sa 12 000 do 14 000 obrtaja u minutu, pa i više. Maksimalni režim obrtanja elise ne može preći 2 000 obrtaja u minutu, inače bi na vrhovima lopatica došlo do nadzvučnih fenomena. Sam reduktor ne predstavlja nepremostive tehničke probleme; iako je kompleksne konstrukcije, njegova koncepcija je uglavnom klasična. Danas primena elise ograničava brzinu aviona sa turboelisnim motorom na oko 900 km/h; međutim, u toku su studije čiji je cilj realizacija elisa koje bi radile u nadzvučnom režimu. Ipak, izgleda da će njihov stepen iskorišćenja biti veoma nizak i da će nadzvučni letovi ostati monopol turbomlaznih motora.

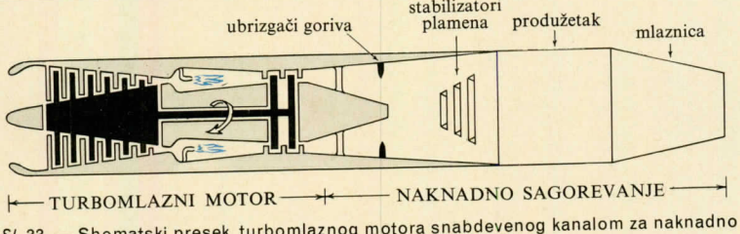
TURBOMOTORI I TURBOGENERATOR ZA HELIKOPTERE. Gasna turbina se može koristiti i za pogon helikoptera. Ovu primenu turbomašina naročito je razvila u Francuskoj firma Sid Aviasion (Sud-Aviation). U ovom slučaju gasna turbina ima oblik koji se razlikuje od onog kod turbomlaznih i turboelisnih motora; stoga je nazivaju *turbomotor*. Najveći deo energije gasova koristi se za pogon gasne turbine, koja pokreće rotor i repnu elisu helikoptera. Osnovni problem primene gasne turbine je redukcija brzine obrtanja. Turbina se obrće sa preko 30 000 obrtaja u minutu, dok se pri normalnom letu lopatice rotora obrću sa oko 35 obrtaja u minutu. Ova redukcija postiže se, na primer, kod »aluet II« (»Alouette II«) na sledeći način:

— pre svega jednim reduktorom, koji je sastavni deo turbomotora i postavlja se između vratila turbine i spojnice. On smanjuje brzinu na 5 800 obrtaja u minutu;

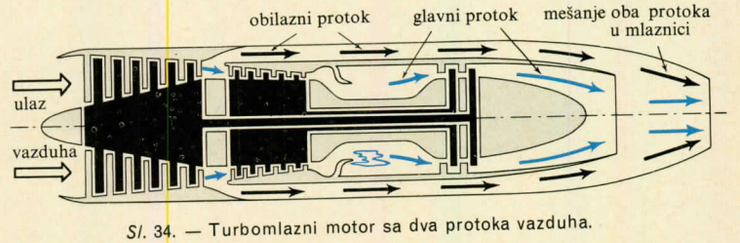
— zatim glavnom transmisionom kutijom, koja se postavlja između spojnice i vratila rotora, i ima odnos redukcije 1/16,32, u tri stepena, i snižava brzinu na 348 obrtaja u minutu. Repna elisa dobija takođe pogon preko ove transmisione kutije, ali u tom slučaju postoji i druga transmisiona kutija, ispred elise, koja ostvaruje dodatnu redukciju od 1/1,24.

Primena gasne turbine na helikopterima omogućava neprekidno raspolaganje značajnom rezervom snage (kod »aluet II i III« ova rezerva iznosi 15%, a kod »super frelona« 20%). Ovo obezbeđuje konstantne performanse helikoptera u širokom dijapazonu temperatura i visina; jedino helikopteri na turbinski pogon mogu se spustiti na platoe Himalaja. Turbina takođe omogućuje trenutno uzletanje bez prethodnog grejanja motora, kao i eliminaciju papuče za gas, pošto turbina ima regulator koji održava konstantan režim obrtanja.

Turbogenerator ima jedan predimenzionisan kompresor koji apsorbuje gotovo celokupnu snagu koju razvija turbina. Najveći deo komprimovanog vazduha prihvata se u specijalni rezervoar i šalje na krajeve lopatica pomoću sistema nepropusnih cevovoda, postavljenog u osi glavčine i šupljinama lopatica rotora. Izduvavanje vazduha vrši se upravno na osu lopatica u ravni rotora. Pošto se rotor u ovom slučaju slobodno obrće oko svoje ose, nema nikakve reakcije na konstrukciju, pa ni potrebe za repnim rotorom za kompenzaciju.



Sl. 33. — Shematski presek turbomlaznog motora snabdevenog kanalom za naknadno sagorevanje.



Sl. 34. — Turbomlazni motor sa dva protoka vazduha.

VAZDUŠNI MOTORI BEZ TURBINA

OPŠTE. Ograničenja performansi turbomašina dolaze usled ograničenja u pojedinim njihovim elementima: kod turboelisnih motora reč je o elisi koja ograničava brzinu leta zavisno od pojave kompresibilnosti na krajevima lopatica elise; kod turbomlaznih motora reč je o turbini koja ograničava potisak koji motor ostvaruje zavisno od dozvoljene temperature na izlazu iz komore za sagorevanje, da bi se osigurao normalan rad turbinskih lopatica. Osvajanje velikih brzina u gustoj atmosferi zahteva, dakle, uklanjanje ovih ograničenja. Inženjeri su se stoga orijentisali na reaktivne motore sa minimumom pokretnih delova, izostavljajući ograničavajuće elemente: kompresor i turbinu. Tako se došlo do pulzoreaktivnih i statoreaktivnih motora. Ova dva tipa propulzora doživela su samo početnu fazu razvoja, usled veoma naglog razvoja raketnih motora, koji su čoveku omogućili da napusti atmosferu. Međutim, njihov tehnički značaj i dalje ostaje, i primena kombinovanog turbo-statoreaktivnog motora, koja se predviđa za aerokosmičke rakete za lansiranje, treba da povrati čast ovim propulzorima već narednih godina.

Mlazni motori bez turbina, na direktan reaktivni pogon, imaju svog preteču u Markoneovom (Marconnet) motoru iz 1909, koji nije imao nijedan pokretni deo i čiji su se gasovi izduvavali na oba kraja; pri tom se ipak ostvarivao mali potisak usled nesimetrije uzvodnog i nizvodnog cevovoda. Francuz Loren (Lorin) radio je najpre na pulzoreaktivnom motoru pre nego što je 1913, u opštim crtama, definisao termopropulzionu mlaznicu (odnosno statoreaktivni motor), čiji su princip ponovo otkrili Rene Ledik (René Leduc) i Žan Vile (Jean Villey), oko 1930.

Prvu praktičnu realizaciju letilice sa pulzoreaktivnim pogonom predstavlja nemačka leteća bomba V1 (V od *Vergeltungswaffe* — »oružje odmazde«), čiji je propulzor As 014 izradila firma Argus. Po završetku II svetskog rata ovaj tip propulzora usavršio je u Francuskoj Aeronautički arsenal (Arsenal de l'aéronautique), dok je SNEKMA (SNECMA) izradila »eskopet« (»Escopette«), pulzoreaktivni motor bez klapni, nalik na Markoneov motor.

Prvi avion snabdeven statoreaktivnim motorom (ili termopropulzionom mlaznicom) bio je u Francuskoj Ledik 0—10 (Leduc 0—10), a zatim Ledik 0—22 »Nor Grifon« (»Nord Griffon«), koji su pokretali kombinovani turbo-stato reaktori. Ovi avioni nisu doživeli dalji razvoj. Paralelna istraživanja vršena su u Velikoj Britaniji i Sjedinjenim Državama, pod imenom »ATHODYD« (»Aero-THermo-DYnamic-Duct), za pogon aviona bez pilota i helikoptera, ali ni ova tehnika nije imala budućnost. U Francuskoj se danas ostvaruje lansiranje supersonične mete Nor Aviasiona CT—21 pomoću raketnih propulzora, a njihov let obezbeđuju dva statoreaktivna motora.

PULZOREAKTIVNI MOTOR se odlikuje pulzirajućim protokom vazduha, odakle mu i ime i zvuk koji proizvodi, karakterističan za dvotaktne motore. Sastoji se isključivo od ulaznog dela za vazduh, komore za sagorevanje i izduvne mlaznice. Potrebno je razlikovati dva tipa pulzoreaktivnih motora: *pulzoreaktivni motor sa klapnama* i *pulzoreaktivni motor aerodinamičkog dejstva*.

Pulzoreaktivni motor sa klapnama. Ovaj tip motora korišćen je na letećim bombama V1. Kod njega se smeša vazduha i goriva pali pri zatvorenim klapnama, koje zatvaraju opruge nakon usisavanja *(sl.* 35). Kada dođe do sagorevanja, smeša gasova biva snažno izbačena kroz mlaznicu, a u istom momentu u difuzoru i u komori za sagorevanje ostvaruje se veoma kratka ali značajna depresija, čija je posledica usisavanje znatne količine svežeg vazduha u motor, pošto spoljašnji pritisak potiskuje klapne prema unutrašnjosti. Klapne se brzo ponovo zatvaraju pod dejstvom opruga. Pošto je ubrizgavanje goriva sinhronizovano fenomenom koji je otkrio Hajgins (Huyghens), poznatim pod imenom *efekat Kadenasi* (Kadenacy), dolazi do ponovnog sagorevanja i ciklus se zatvara. Značajan aspekt ovog načina rada je to što do sagorevanja može doći i pri brzini nula, što nije slučaj kod statoreaktivnog pogona.

Prilikom leta, brzina letilice dovodi do veoma značajnog povećavanja protoka vazduha kroz motor. Paljenje svećicom potrebno je samo za iniciranje sagorevanja; već od drugog ciklusa dolazi do samozapaljenja smeše vazduha i goriva pri njenom kontaktu sa vrelim zidovima komore za sagorevanje. Na V1 prvi pulzoreaktori radili su sa oko 50 ciklusa u sekundi i ostvarivali potisak od 250 do 300 kg. Usled veoma brzog zagrevanja ulaznih klapni, vek trajanja ovih motora bio je često manji od jednog časa. Studije koje su nastavljene nakon rata u Sjedinjenim Državama i u Francuskoj omogućile su da se vek ovih motora produži na pet do deset časova, i da se znatno povećaju stepen iskorišćenja i potisak. Takvi pulzoreaktivni motori instalisani su u Francuskoj na meti CT 10, koja predstavlja direktnog sledbenika V1, i u Sjedinjenim Državama na krajevima lopatica helikoptera Markart (Marqurdt).

Pulzoreaktivni motor aerodinamičkog dejstva. Na razvoju ovog tipa motora radilo se neposredno nakon II svetskog rata u Sjedinjenim Državama i u Francuskoj. U Francuskoj je ovaj razvoj u SNEKMI (SNECMA) pod rukovodstvom Maršala (Marchal) i Bertena (Bertin) doveo do konkretnih realizacija pulzoreaktivnih motora tipa »eskopet« (»Escopette«) i »ekrevis« (»Ecrevisse«). Na ovim motorima nema više nijednog pokretnog dela, pošto su klapne eliminisane *(sl.* 36). Ranije opisan pulzacioni efekat ostvaruje se u ovom slučaju aerodinamičkom asimetrijom sklopa, odnosno forme poprečnog preseka za strujanje gasova. Reč je, u stvari, o uređaju koji je otvoren sa oba kraja, u kome se usled njegovog oblika i pulzacionog karaktera sagorevanja ostvaruje strujanje gasova naizmenično više u jednom nego u drugom smeru. Treba zapaziti da je na pulzoreaktivnim motorima ovog tipa ulazni otvor za vazduh upravljen unazad. Ovakva dispozicija ima cilj da se izbegne povraćanje goriva i da ograniči pojavu kontrareakcije prema napred, koristeći je eventualno za propulziju. Kao i modeli sa klapnama, ni ovi pulzoreaktori nisu doživeli neku širu praktičnu primenu, osim kao pomoćni motori za autonomno uzletanje jedrilica i za propulziju malih aparata bez pilota. Izgleda, ipak, da bi njihova primena kao dodatnih motora, naročito pri uzletanju, kod izvesnih tipova aviona bila interesantna.

STATOREAKTIVNI MOTOR ILI TERMOPROPULZIONA MLAZNICA. Bar na prvi pogled ovaj tip motora predstavlja najjednostavniji mogući postojeći motor, pošto se u suštini sastoji od cevi većih dimenzija, otvorene sa oba kraja, sa vencem gorionika postavljenih u njenom centru. Nema nijednog pokretnog dela, ako se izuzmu pomoćni uređaji.

Osnovni uslov koji mora da zadovolji termopropulziona mlaznica, da bi ostvarila propulziono dejstvo, jeste to da joj poprečni presek na usisu vazduha bude manji od poprečnog preseka za izduvavanje sagorelih gasova. Raspodela statičkih pritisaka na unutrašnjim zidovima motora dovodi do pojave rezultantne sile upravljene u pravcu kretanja. Mlaznica se, dakle, sastoji od difuzora, centralnog cilindričnog dela i od blagog konfuzora *(sl.* 37).

- *Kompresija vazduha* ostvaruje se na prednjem difuzoru isključivo aerodinamičkim dejstvom. Stepen kompresije dostiže 6 pri brzini od 2 Maha, a oko 100 pri brzini od 4 Maha.

- *Sagorevanje* se vrši u cilindričnom delu propulzora. Osnovna uloga ovog dela je da obezbedi korektno strujanje gasova u unutrašnjosti mlaznice, pošto i najmanji poremećaji strujanja dovode do smanjenja ukupnog stepena iskorišćenja propulzije. Sagorevanje je nužno da bi se zadovoljio zakon o održanju energije. Međutim, ostvarenje propulzione sile nezavisno je od sagorevanja. U stvari, u izrazu za koeficijent potiska ne javlja se nijedan član koji zavisi od termičkog procesa[11]).

Ovo se može proveriti u aerodinamičkom tunelu, pošto uvođenje cilindričnog tela nezavisnog od mlaznice dovodi do pojave propulzione sile u njoj *(sl.* 38). To omogućuje eksperimentisanje u aerodinamičkom tunelu sa simulacijom sagorevanja, pošto je na aerodinamičkom planu sagorevanje ekvivalentno parcijalnom blokiranju izlaznog otvora.

- *Širenje i izduvavanje gasova* ostvaruje se u zadnjem konfuzoru.

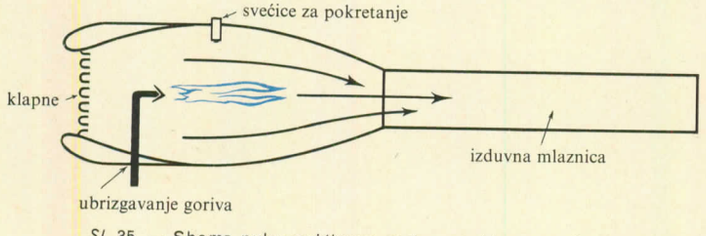
Termopropulziona mlaznica, čiji je princip rada otkrio najpre Rene Loren (René Lorin) a zatim Rene Ledik (René Leduc) i Žan Vile (Jean Villey), nije bila primenjivana na avionima sve do posle II svetskog rata. Tek 21. aprila 1949. poleteo je prvi put Ledik 0—10 (Leduc 0—10), čije je konstruisanje započeto još 1939. Glavni nedostatak ovog tipa motora je u tome što ne omogućuje letove ispod jedne određene brzine, pošto se kompresija vazduha ostvaruje isključivo na račun brzine. Tako je Ledik 0—10 lansiran sa jednog aviona nosača. Na isti način, današnji aparati na statoreaktivni pogon lansiraju se u prvoj fazi pomoću raketnih motora. Da bi parirali ovom nedostatku, Ledik, s jedne strane, i firma Nor Avijasion (Nord-Aviation), sa druge, razvili su kombinaciju turbo-statoreaktivnog motora.

---

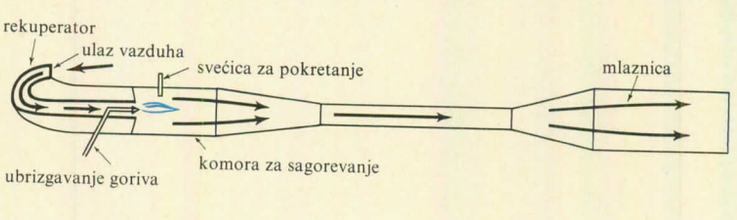
[11]) Izraz za koeficijenat potiska C_{xT} glasi:

$$C_{x_T}=\frac{2}{S}\left[\frac{M_1^2}{M_0^2}\omega_1-\omega_0\right]$$

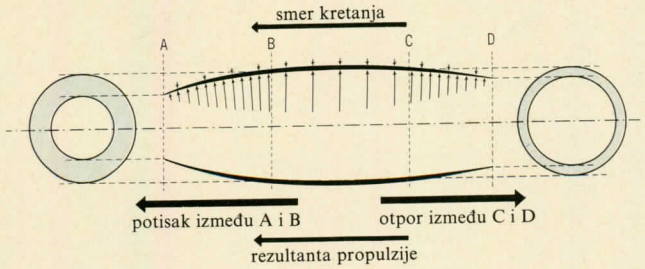
S je referentna površina aviona; M_0, ω_0, ω_1 i M_1 su Mahov broj i referentni poprečni presek beskonačno uzvodno, odnosno nizvodno.



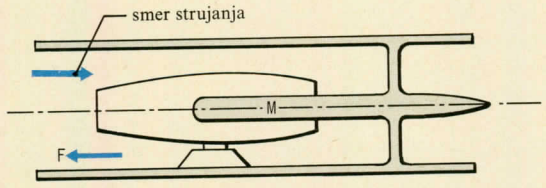
Sl. 35. — Shema pulzoreaktivnog motora sa klapnama (tip V1).



Sl. 36. — Pulzoreaktivni motor sa aerodinamičkim dejstvom.



Sl. 37. — Raspodela pritisaka u termopropulzionoj mlaznici.



Sl. 38. — Simulacija sagorevanja u termopropulzionoj mlaznici u aerodinamičkom tunelu (vreteno M, nezavisno od mlaznice, rađa u mlaznici silu propulzije F).

Kombinacija turboreaktivnog motora i termopropulzione mlaznice. U jednoj koaksijalnoj konfiguraciji, kao u slučaju aparata »ledik 0—22« i »nor grifon« (»Nord Griffon«), kombinacija turboreaktivnog motora i termopropulzione mlaznice ima za cilj da letilici obezbedi komplementarne prednosti ova dva tipa propulzije i da joj omogući samostalno uzletanje. Kod primene za velike brzine (3 Maha i više), turboreaktivni motor obezbeđuje propulziju do oko 0,5 Maha, oba motora su u radu u prelaznim režimima do velikih Mahovih brojeva, kada je u pogonu samo termopropulziona mlaznica, dok se turboreaktivni motor obrće u praznom hodu ili se čak zaustavlja, da bi se izbeglo izlaganje njegovih obrtnih delova značajnim termičkim šokovima koji se javljaju pri ovim režimima leta. Izgleda da bi ovakva kombinovana propulzija trebalo da bude primenjena za pogon prvih stepena budućih aerokosmičkih transportera. Istraživanja u ovom smeru su u toku u Sjedinjenim Državama, čak i u Evropi, gde na ovome rade u koprodukciji Nor Avijasion, SNEKMA i nemačka grupacija ERNO (ERNO). Ovakav prvi stepen imao bi tu prednost da se može više puta koristiti, a omogućio bi ubrzavanje aerokosmičkih letilica do Mahovih brojeva od 6 do 7.

Bezvazdušni motori

UVOD. Funkcionisanje svih poznatih motora sa unutrašnjim sagorevanjem zavisi od kiseonika iz vazduha. U tome nisu izuzetak ni avionski motori. Osvajanje svemira izvan granica atmosfere ne može se pak zamisliti bez ostvarenja autonomne propulzije, sposobne da radi isto tako dobro, ako ne i bolje, u vakuumu kao i u atmosferi. Tako je razvoj hemijskih raketnih motora omogućio dosadašnja osvajanja svemirskog prostora. Međutim, ovi tipovi propulzora predstavljaju, u stvari, samo logičnu vezu između aeronautičkih, odnosno vazdušnih motora, i čitave familije bezvazdušnih motora, isključivo namenjenih primeni u svemirskim prostranstvima. Izvesni članovi ove familije već su danas u eksperimentalnom stadijumu u laboratorijama.

HEMIJSKI RAKETNI MOTORI

OPŠTE. Pošto se sva ljudska otkrića zasnivaju na postojećem iskustvu i logici, bilo je normalno da su se inženjeri zaduženi za realizaciju aerokosmičkih motora, sposobnih za rad bez kiseonika, obratili pre svega hemiji. Ono što se više ne može uzimati tokom leta treba nositi sa sobom. Pri tom je moguće zamisliti različite principe rada, ali se svi oni zasnivaju na nekom hemijskom procesu koji je u znatnoj meri egzotermičan, odnosno kojim se oslobađaju znatne količine toplote. Tri osnovne klase razmatrane su zavisno od stanja hemijskih komponenti koje se koriste i koje se nazivaju *propergoli*. Tako je moguće koristiti:

— mešavinu prahova (raketni motori sa čvrstim propergolima);

— jednu ili više tečnosti (raketni motori sa tečnim propergolima);

— prah u vidu bloka i tečnost (hibridni raketni motori ili raketni motori sa mešovitim propergolima).

Danas postoji jasna razlika između rakete i njenog propulzora, pod nazivom »raketni propulzor« ili »raketni motor«, koja se može samo i dalje razvijati u budućnosti. Ranije je pojam *raketa* pokrivao i jedno i drugo, pošto se ceo uređaj i sastojao od jedne cevi, manje ili više aerodinamičkih linija, koja je sadržala neku raketnu mešavinu. Danas su rakete evoluirale toliko da postoje posebne tehnologije, s jedne strane, za raketu nosač i njene kompleksne uređaje, i, sa druge, za njen pogonski motor. Danas između ova dva pojma postoji razlika koja je isto toliko izrazita kao između jednog supersoničnog aviona i njegovog turboreaktivnog motora. U oba slučaja, međutim, koncepcija sklopa zahteva očigledno intimno podešavanje oba osnovna elementa u sklopu.

ISTORIJAT. Začetak raketnih motora dovodi se u vezu sa legendom o kineskom mandarinu Van Hou (Wang Hou); on je pokušao da se vine u vazduh pomoću jednog zmaja, koji je pokretalo četrdeset sedam raketa. Poginuo je — prema legendi — u eksploziji svog aparata, negde tri hiljade godina pre naše ere. Istorijski govoreći, nije mnogo verovatno da su se rakete pojavile pre prvog milenijuma pre naše ere. Herodot i Tit Livije govore o *strelama od šupljeg bambusa ispunjenim nekom materijom koja je u stanju da gori čak i kada je poprskana vodom*, ne pominjući da li su ovi objekti bili nečim lansirani ili su se sami kretali. Naprotiv, krajem prvog veka Leo VI (Leon VI) izgleda kao da ukazuje na poreklo samostalne propulzije pomoću raketa kada govori o vatri *koja se, praćena grmljavinom i dimom, uzdiže u vazduh kao neki goreći meteori*, a koja se lansira pomoću cevi obloženih bronzom. Nema više nikakve sumnje o čemu je reč kada Arabljani govore o *jajetu koje leti i gori*.

Godine 85. naše ere, pod vladavinom Vi Tija (Vi Tey), u Kini su prvi put korišćene rakete na bojnom polju protiv tatarskih zavojevača. Nakon potpunog mraka srednjeg veka rakete se ponovo pojavljuju u Antiohiji. Rodžer Bekon (Roger Bacon) 1620, preuzimajući ideju Markusa Grekusa (Marcus Graecus), koji je živeo u VIII veku, usavršava kompoziciju raketne mešavine i, uspevši da povoljno dozira šalitru, ostvaruje *vatru koja teži da poleti*.

Za vreme raznih ratova rakete se često ponovo pojavljuju: Padovljani 1379. napadaju grad Mestre; 1381. dolazi do bombardovanja Bolonje; u Orleanu vojnici Jovanke Orleanke napadaju engleske ratne mašine; 1449. Dinoa (Dunois) zauzima Pon-Odmer (Pont-Audemer) zahvaljujući raketama, koje je, najverovatnije, koristio u iste svrhe i jedan Bretonac kod Korbeja (Corbeil), nazvan Metr Žan (Maitre Jean) sudeći po njegovom nadimku Butfe (Boutefeu)[12]). Usavršavanje tehnike raketne propulzije zasluga je Šmidlapa (Scmidlap) (1437), Franca Helma (Franz Helm) (1530), Klausa od Utrehta (Claës d'Utrecht) (1640), a naročito Simenovica (Siemenowicz), koji je 1650. realizovao prvu višestepenu raketu.

Godine 1779. napad 5 000 raketara Tipu-Saiba (Tippou-Saib) na britansku armiju kod Seringapatama u Indiji ponovo oživljava u Evropi ideju o izradi raketa. Po povratku iz Indije ser Viljem Kongrev (William Congreve) usavršava rakete teške desetak kilograma koje su imale domet od oko 2 000 m. Posle toga, rakete se koriste u svim ratovima iz vremena Napoleona, ali su 1855. pri opsadi Sevastopolja bile potučene topovima. Tehnika raketa koja lagano evoluira tokom više od tri hiljade godina ponovo se stidljivo pojavljuje u I svetskom ratu sa raketom »iguman« (Le Prieur), koja je predstavljala neprijatelja broj jedan balona za osmatranje. Drugi svetski rat najavljuje definitivnu vladavinu raketa. Septembra 1944. rakete V2 uvode se prvi put u dejstvo. One predstavljaju početnu osnovu celokupne raketne industrije, kao i osvajanje svemira. Pet velikih imena vezano je za istraživanja koja su dovela do današnjeg stepena razvoja raketa:

— Ciolkovski (1857—1935) u SSSR;

— Esno-Pelteri (Esnault-Pelterie, 1881—1957) u Francuskoj;

— Godar (Goddard, 1882—1945) u Sjedinjenim Državama;

— Obert (Oberth, rođ. 1894) najpre u Nemačkoj, a zatim u Sjedinjenim Državama;

— V. fon Braun (W. von Braun, rođ. 1912) najpre u Nemačkoj, a danas u Sjedinjenim Državama.

PRINCIP PROPULZIJE RAKETNIM MOTORIMA. Poznatu još iz davnina, propulzionu moć izvesnih mešavina prahova prvi put je teorijski objasnio tek u XVII v. Blez Paskal (Blaise Pascal), koji je 1660 pisao:

Gasovi razvijeni eksplozijom deluju svojim pritiskom na zidove suda u kome se nalaze. Pritisci na bočne zidove međusobno se uravnotežavaju: međutim, pritisak na zatvorenom kraju veći je od onoga koji deluje na kraj sa otvorom. Ova činjenica objašnjava pokretanje rakete u smeru suprotnom od smera izduvavanja gasova.

Princip rada današnjeg raketnog motora potpuno odgovara pomenutom tekstu. Hemijski proces sagorevanja propergola (čvrstih ili tečnih sastojaka koji se koriste u motoru) oslobađa veoma znatnu količinu gasova čiji je pritisak u unutrašnjosti motora veoma velik, a koji izlaze jedino kroz otvor mlaznice, smešten na zadnjem delu rakete. Pritisci koji deluju na bočne zidove izjednačavaju se, dok pritisak koji deluje na zatvoreni kraj propulzora nije ničim kompenzovan, pošto se na suprotnom kraju nalazi otvor. U atmosferi pritisak vazduha se delimično suprotstavlja pritisku sagorelih gasova i time u odgovarajućoj meri smanjuje stepen iskorišćenja propulzora. Naprotiv, u vakuumu osnovni princip važi u potpunosti.

[12]) Le boutefeu (franc.) — baklja za potpaljivanje topova. — Prim. prev.

Propulziona sila koju ostvaruje raketni motor može se izračunati iz drugog Njutnovog zakona. U vakuumu, i za jednu određenu konstantnu brzinu izduvavanja, ova propulziona sila, ili *potisak*, jednaka je proizvodu brzine izduvavanja i mase gasa izduvane u jedinici vremena. Brzina izduvavanja igra, dakle, veoma značajnu ulogu u performansama raketnih motora; stoga se propergoli najčešće i klasiraju prema svom *specifičnom impulsu*. Ovaj pojam predstavlja odnos brzine izduvavanja i standardnog ubrzanja Zemljine teže i izražava se u sekundama[13]). Specifični impuls znatno varira zavisno od toga da li se propulzija odigrava u vakuumu ili u atmosferi. I u jednom i u drugom slučaju poželjno je raspolagati propergolom koji ima znatan specifični impuls jer, što je ovaj veći, više je moguće poneti tereta, odnosno utoliko je veća krajnja brzina aparata za istu masu propergola.

RAKETNI MOTORI SA ČVRSTIM PROPERGOLIMA. Poznat od davnina pod imenom rakete na prah, ovaj tip propulzora koristio je isključivo sagorevanje crnog baruta, koji se sastoji od intimne mešavine uglja, sumpora i šalitre (odnosno nitrata kalijuma NO_2K). S ovom mešavinom radile su gotovo sve rakete između dva rata, ali je ubrzo bila napuštena usled opasnosti od eksplozije, što je uvek postojalo i bilo uzrok mnogobrojnim nezgodama. Mnoge mešavine prahova bile su od tada usavršene da bi se izbegao ovaj osnovni nedostatak. U opštem slučaju prah koji se danas koristi u raketnim motorima sa čvrstim propergolima, sastoji se od mešavine više proizvoda, pri čemu su ovi veoma fino samleveni i homogeno izmešani, a fabrikacija se u svim fazama kontroliše sa velikom preciznošću. U ovom slučaju jedan od sastojaka mešavine uvek je jedan moćan hemijski oksidant, koji igra ulogu sagorevača, a drugi neki dezoksidant, koji služi kao gorivo. Razni drugi dodaci sa osobinama energičnih katalizatora takođe se u opštem slučaju dodaju mešavini, bilo radi povišenja temperature sagorevanja ili povećanja mase produkata sagorevanja, pošto od ove dve osnovne karakteristike zavisi brzina izduvavanja. Oksidant je uglavnom neki perhlorat (kalijuma ili hidrazina) pomešan sa nekim organskim jedinjenjem koje služi kao gorivo. Danas su u toku istraživanja radi povećanja specifičnog impulsa ovog tipa raketnih motora primenom još moćnijih oksidanata, kao što su perhlorati amonijaka (ClO_4NH_4) i nitrozila (ClO_4NO_2). Isti rezultat može se postići i dodavanjem metalnih prahova koji oslobađaju znatnu količinu energije pri sagorevanju, kao što su aluminijum ili berilijum. Prvi od ovih već danas ulazi u sastav mnogih mešavina prahova. Propulziona materija raketnog motora sa čvrstim propergolima može se sastojati i od jednog jedinog hemijskog elementa čiji je sastav hemijski stabilan pri normalnim temperaturama, ali se raspada na dva dela, od kojih jedan sadrži oksidante, a drugi sagorljive sastojke, koji se jedine na visokoj temperaturi. To su uglavnom nitridi, kao nitroceluloza ili nitroglicerin. Raketni motor sa čvrstim propergolima je, svakako, najjednostavniji propulzor koji danas postoji. Shematski, on se sastoji od jednog ili više blokova praha, naslaganih jedan na drugi u cilindričnom omotaču koji služi kao komora za sagorevanje, pa je, prema tome, sposoban da izdrži visoke unutrašnje pritiske. Motor se kompletira sistemom za paljenje, uređajem za zaustavljanje sagorevanja i izduvnom mlaznicom. Ovakav motor ne postavlja u opštem slučaju probleme optimalnog rasporeda delova, kao kod raketnog motora sa tečnim propergolima, usled toga što nema potrebe za kompleksnim sistemom cevovoda i mnogobrojnih pomoćnih uređaja. Ako se izuzme koncepcija mlaznice, koja predstavlja opšti problem za sve raketne motore, kod ovog motora jedino izvođenje cilindričnog omotača i blokova praha zahteva primenu specijalnih tehnika.

Konstrukcija omotača zahteva razvoj veoma specijalizovanih tehnika kao što su primena armiranih plastičnih materija na bazi staklenih fibera ili fluoriranje. Pored posedovanja određenih hemijskih i energetskih svojstava, gorivni blokovi moraju zadovoljavati veoma stroge norme u pogledu dimenzija i oblika, zavisno od namene raketnog motora. Blokovi se izrađuju presovanjem ili ekstruzijom i izvode se najčešće u vidu zvezdastog poprečnog preseka da bi se povećala površina za sagorevanje. Najčešće, homogeni čvrsti propergoli sagorevaju radijalno, po sukcesivnim slojevima paralelnim uzdužnoj osi propulzora, ili, nešto ređe, frontalno od prednjeg prema zadnjem kraju. Određivanje forme poprečnog preseka treba u opštem slučaju da obezbedi konstantnu površinu sagorevanja tokom celokupnog rada, kako bi se ostvario postojani potisak i konstantna brzina izduvavanja. Sve površine koje nisu obuhvaćene sagorevanjem treba da su prekrivene specijalnim materijama koji se nazivaju *inhibitori*. Varirajući veličinu i formu površina za sagorevanje, moguće je ostvariti blokove velikog potiska a kratkotrajnog dejstva *(akceleratori za lansiranje)* ili, pak, blokove manjeg potiska dužeg dejstva *(propulzori za krstarenje)*.

Gama današnjih raketnih motora sa čvrstim propergolima ide od blokova od nekoliko centimetara u prečniku i dugih nekoliko decimetara, kod protivtenkovskih i raketnih oružja, do blokova od 2 do 3 m u prečniku i dugih 4 do 5m, koji se mogu nadovezivati jedan na drugi, čineći propulzore duge 20 do 30 m, i duže. Ovi blokovi su u stanju da razviju potiske od 500 do 600 t, a služe za lansiranje satelita i balističkih raketa. Uzgred, interesantno je konstatovati da je razvoj čvrstih propergola, koji su se primenjivali u početku astronautičkih istraživanja, bio prekinut za desetak godina, kada su uveliko dominirale rakete snabdevene motorima sa tečnim propergolima. One zahtevaju mnogo kompleksniju kontrolu pre lansiranja i ne mogu biti dugo napunjene gorivom, usled korozivnog dejstva tečnog goriva na rezervoare i cevovode. Za vojne svrhe, dakle, raketni motori sa čvrstim propergolima su znatno povoljniji, čime se i objašnjava ponovno interesovanje za njih, koje se proširuje i na domen astronautike. Ovo obnavljanje interesovanja još više je izraženo poboljšavanjem performansi motora sa čvrstim gorivom.

Prednosti relativne jednostavnosti raketnih motora sa gorivom u vidu praha umanjene su jednim nedostatkom koji danas ograničava njihovu primenu. Kada se jednom inicira sagorevanje, ako se ovo zaustavi nekim pogodnim metodom, na primer, odbacivanjem mlaznice, ponovno iniciranje sagorevanja nije više ni u kom slučaju moguće. Istraživanja koja su u toku kao da ukazuju na puteve za otklanjanje ovog nedostatka.

RAKETNI MOTORI SA TEČNIM PROPERGOLIMA. Konstrukcija raketnog motora sa tečnim propergolima znatno je kompleksnija od konstrukcije motora sa čvrstim gorivima. Ovakav motor sadrži:

— jedan ili, češće, dva rezervoara za propergole;

— veoma kompleksan sistem cevovoda koji dovode propergole do komore za sagorevanje;

— sistem napajanja, koji obezbeđuje konstantan protok propergola;

— uređaj za ubrizgavanje propergola u komoru za sagorevanje;

— komoru za sagorevanje;

— izduvnu mlaznicu.

Ovoj opštoj shemi treba još pridodati ceo komplet pomoćnih organa, kao što su: ventili, regulatori za pritisak, sistem za hlađenje, razni aparati i instrumenti za kontrolu i sigurnost itd. Celokupno dosadašnje iskustvo hemije, metalurgije, čak i elektronike, neophodno je za realizaciju jednog ovakvog uređaja. Uprkos veoma visokim investicijama i pogonskim troškovima, ovi uređaji su bili primenjivani jer su veoma dugo bili jedini koji su bili u stanju da razviju potiske potrebne za astronautička istraživanja. Čak i danas, kada su propulzori sa čvrstim propergolima, zahvaljujući razvoju svoje tehnologije, u stanju da razviju slične potiske, motori sa tečnim gorivom igraju značajnu ulogu u primeni zahvaljujući činjenici da tečni propergoli imaju veće specifične impulse.

Propergoli koji se koriste, mogu biti *monergoli*, odnosno u vidu jednog jedinog hemijskog jedinjenja ili u vidu mešavine dve tečne komponente koje se drže u istom rezervoaru i koje su stabilne na normalnim temperaturama. Razlaganjem u komori za sagorevanje monergoli intenzivno oslobađaju energiju i veliku količinu gasovitih produkata. Ova egzotermna reakcija može se ubrzati ili provocirati delovanjem nekog katalizatora, u kom slučaju se monergoli nazivaju *katergoli*. Glavni monergoli u primeni su hidrazin (N_2H_4) i oksižen (H_2O_2). Oksižen se veoma mnogo koristio u Nemačkoj pod šifrom T-*Stoff*, a razlagao se u komori za sagorevanje ubrizgavanjem natrijum-permanganata, nazvanog Z-*Stoff*, koji je služio kao katalizator.

Primena *diergola*, odnosno dva propergola stokirana u dva različita rezervoara, više je rasprostranjena. Po pravilu jedan od njih je oksidant, a drugi gorivo. Iako je u ovom slučaju kompleksnost motora još više uvećana u odnosu na motore koji koriste monergole, usled dupliranja cevovoda, sistema za ubrizgavanje i napajanje itd., diergoli se danas isključivo primenjuju zbog većih specifičnih impulsa koje je moguće ostvariti. Najčešće primenjivani diergoli zasnivaju se na sledećim oksidantima:

— *Oksižen* (H_2O_2), koji reaguje sa hidratom hidrazina (N_2H_4—H_2O) obogaćenog alkoholom ili sa dimetil-hidrazinom (N_2H_2 $[CH_2]_2$), poznatim u anglosaksonskim zemljama pod imenom U. D. M. H.

— *Tečan kiseonik* (O_2), koji predstavlja kriogeni propergol zbog svoje veoma niske temperature stokiranja, primenjivao se na raketama V2 sa alkoholom ili benzinom kao gorivom. Može se takođe koristiti sa dimetil-hidrazinom. Međutim, jedan od najmoćnijih parova propergola je bez konkurencije tečan kiseonik u kombinaciji sa tečnim vodonikom (H_2).

— *Azotna kiselina* (NO_3H) koja se primenjivala u Francuskoj za pogon raketa u atmosferi, može se kombinovati sa mnogo hemijskih jedinjenja kao gorivima: kerosinom, anilinom ($C_6H_5NH_2$), ksilidinom ($C_6H_3NH_2[CH_3]_2$) itd.

— *Azot peroksid* (N_2O_4), veoma moćan oksidant, koristi se kod nekih raketnih motora u kombinaciji sa aerozinom, koji predstavlja mešavinu jednakih količina dimetil-hidrazina i hidrazina (N_2H_4).

— *Jedinjenja fluora* se veoma aktivno istražuju usled svoje velike moći oksidacije. Trifluoror hlora (ClF_3) izgleda da u ovom smislu ustupa mesto fluor-oksidu (F_2O), koji omogućuje ostvarivanje velikih specifičnih impulsa, naročito u kombinaciji sa hidrazinom i njegovim jedinjenjima, ili čak sa tečnim vodonikom.

Kod parova diergola treba razlikovati dve bitno različite kategorije: hipergolične parove koji automatski stupaju u reakciju sagorevanja čim, ubrizgani u komoru za sagorevanje, dođu u međusobni kontakt, i na hipergolične parove kod kojih se sagorevanje mora inicirati nekim pomoćnim sistemom, po pravilu električnim. Hipergolični parovi koji se najčešće primenjuju su: azot-peroksid u kombinaciji sa dimetil-hidrazinom i tečan kiseonik u kombinaciji sa tečnim vodonikom.

Danas se radi na istraživanjima još jedne mogućnosti tečnih propergola, na *triergolima*. Međutim, čak iako se pokaže da propulzioni stepen iskorišćenja mešavine tri tečnosti, smeštene u tri rezervoara, može biti velik, izgleda da će tehnološke komplikacije onemogućiti ako ne realizaciju ovakvih motora, onda svakako njihovu širu primenu.

Raketnom motoru sa tečnim propergolima neophodno je obezbediti ravnomerno dovođenje propergola u komoru za sagorevanje. Za ovo se koriste dva osnovna

[13]) Klasična definicija specifičnog impulsa je odnos potiska i protoka mase propergola. Ove dve definicije matematički su identične.

metoda: *pritisak gasa* i primena *turbopumpi (sl.* 39. i 40). U prvom slučaju jedan rezervoar sa inertnim gasom, odnosno gasom koji hemijski ne reaguje sa propergolima, po pravilu, helijum, drži se na visokom pritisku i povezuje sa rezervoarima za propergole. Uprkos ubrizgavanju u komoru za sagorevanje, u rezervoarima se na taj način održava konstantan pritisak, pa se time i obezbeđuje ravnomerno napajanje komore propergolima. Ovakav uređaj se naročito često primenjuje kod raketnih motora malih dimenzija i malog potiska. Za napajanje raketnih motora velikih potisaka, kao što su oni koji obezbeđuju propulziju lanserima satelita i vasionskih brodova, koristi se gotovo isključivo sistem pumpi na turbinski pogon. Ove turbopumpe moraju biti veoma malih dimenzija, usled čega im je broj obrtaja veoma velik (60 000 obrta u minutu i više), da bi se omogućili protoci potrebni za rad motora. U izvesnim slučajevima, kao kod pomoćnih raketnih motora na nekim avionima (S. E. P. R. 841 na francuskom »miražu III«), izvodi se takozvani »neautonomni sistem«, čiji se pogon pumpi ostvaruje preko spojnica koje ih povezuju sa turbinama.

Raketni motori sa tečnim propergolima mogu razvijati veoma velike potiske. Tako propulzor F1 prvog stepena rakete »Saturn V« američkog »Apolo« programa ima potisak od 680 000 kg. Tehnološka kompleksnost ovih motora znatno se povećava teškoćama oko stokiranja goriva na duže vreme, kao i komplikovanom procedurom lansiranja. Sa druge strane, koliko se lako mogu ugasiti, jednostavnim prekidom napajanja propergola, toliko se lako mogu i ponovo pustiti u pogon, kada su posredi hipergolične mešavine.

HIBRIDNI RAKETNI MOTORI. Jedina dva stanja propergola koja su praktično dopustiva pri njihovoj primeni za propulziju raketa, su čvrsto stanje i tečno stanje. Postoji, međutim, i treća mogućnost, ma koliko neočekivana, a to je istovremena primena tečnih i čvrstih propergola. Raketni motori koji rade na ovom principu nazivaju se *hibridni raketni motori* ili raketni motori sa *litergolima*. Njihov rad se zasniva na korišćenju jednog tečnog propergola kao oksidanta i jednog čvrstog propergola kao goriva[14]) (*sl.* 41). Ova kombinacija dovodi do konstrukcija koje se u pogledu tehnološke kompleksnosti, nalaze između dve već pomenute i koje su sposobne za mnogobrojne svemirske misije.

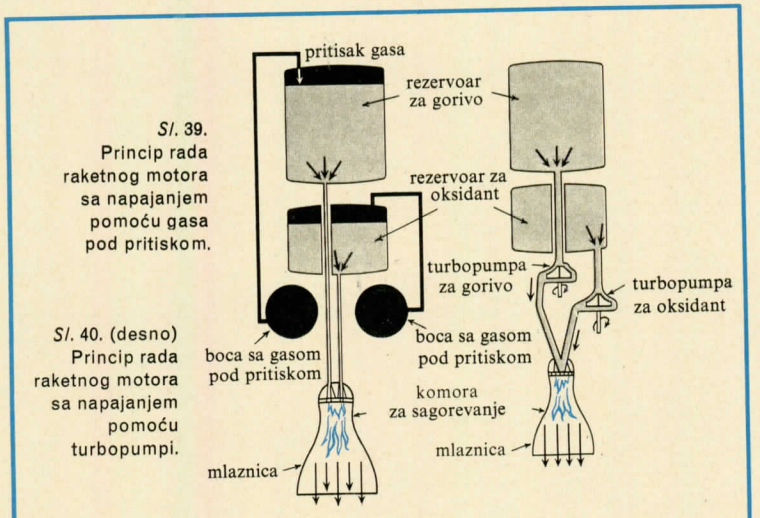
Tečan propergol se stokira u jednom rezervoaru i ubrizgava u komoru za sagorevanje koja ima oblik veoma nalik na onu kod raketnog motora sa gorivom u vidu praha. Ako je par propergola hipergoličan, što je najinteresantniji slučaj, njihovo jednostavno dovođenje u kontakt dovodi trenutno do sagorevanja, uz značajno oslobađanje gasova i veoma nagli porast temperature i pritiska.

Iako je princip rada ovih motora već 1940. u Nemačkoj otkrio Andruson (Andrusson), koji je ispitivao reakciju prethodno zagrejanog azot-protoksida (N_2O) i ugljenika, razvoj raketnih motora bio je veoma spor. Dugo su jedino Amerikanci i, svakako, Rusi radili na istraživanjima u ovoj oblasti. U Francuskoj je 1956. ONERA započela izvesna ozbiljnija istraživanja u ovom smeru, koja su dovela do lansiranja 1965. jedne meteorološke rakete sa raketnim motorom ovog tipa. Amerikanci danas koriste ovakve propulzore za izvesne manevre u svemiru, kao što su korekcija putanje, svemirski randevu, ili za kočenje pre ulaska u atmosferu.

Osnovna prednost hibridnih raketnih motora za obavljanje ovakvih manevara, koji često mogu biti veoma delikatni, jeste lakoća sa kojom motor može biti zaustavljen i ponovo pušten u pogon. Dovoljno je, u stvari, shematizirano, zaustaviti protok tečnosti ili ga ponovo pustiti da bi se ovo ostvarilo. Par propergola, pošto je hipergoličan, automatski stavlja u pogon motor čim dođe u međusobni kontakt. Iz ovog razloga rakete za kočenje pri spuštanju sondi na planete biće sigurno ovog tipa.

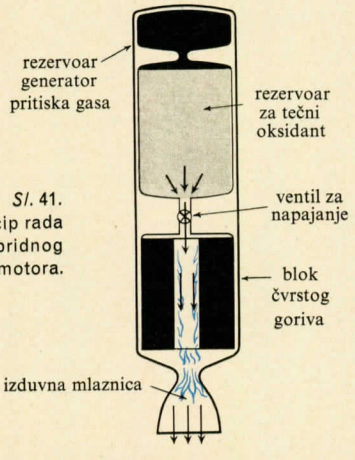
Sa druge strane, hibridni sistem se lako može prilagoditi korišćenju triergola. Ubrizgavanje još jedne tečnosti u komoru za sagorevanje može povećati specifični impuls hibridnog hipergoličnog para ili, što je često veoma interesantno, učiniti hipergoličnim jedan par litergola, koji to inače nije, ali koji poseduje veoma interesantne energetske karakteristike. Najzad, hibridni raketni motori su veoma pogodni za korišćenje jedinjenja fluora u propulziji.

[14]) Invertovana hibridna kombinacija, koja je sa energetskog stanovišta manje interesantna, sastojala bi se u korišćenju tečnog goriva i čvrstog oksidanta.



Sl. 39. Princip rada raketnog motora sa napajanjem pomoću gasa pod pritiskom.

Sl. 40. (desno) Princip rada raketnog motora sa napajanjem pomoću turbopumpi.



Sl. 41. Princip rada hibridnog raketnog motora.

NEHEMIJSKI MOTORI

OPŠTE. Hemijski raketni motori izgledaće našim unucima sigurno isto toliko arhaični koliko nama danas izgleda Aderov parni motor na *Eolu*. Ogromna količina energije i impozantna masa, već danas neizbežne karakteristike svemirskih brodova, ubuduće kod interplanetarnih putovanja moraju biti sve izraženije. Masa jednog svemirskog broda za interplanetarne letove bila bi na Zemlji jednaka težini nekog transatlantskog broda. Da bi se ovo izbeglo, da bi se učinio korak unapred u kosmičkoj propulziji, potrebno je postaviti sledeća pitanja:

— Zašto nositi sa Zemlje sve sastojke potrebne za propulziju tokom celokupnog leta?

— Zašto koristiti hemijske reakcije?

Odgovori na ova dva pitanja predmet su današnjih istraživanja usmerenih ka realizaciji propulzora namenjenih isključivo radu u kvazi-apsolutnom bezvazdušnom prostoru vasione. Ova istraživanja ne predstavljaju ništa drugo do konkretizaciju ideja koje je 1931. izneo veliki preteča kosmonautike Rober Esno-Pelteri (Robert Esnault-Pelterie) u svojoj čuvenoj knjizi *Astronautika*:

Nameće se, dakle, zaključak da će potčinjavanje energije sadržane unutar atoma učiniti čoveku mogućim, čak i lakim, posete svim planetama Sunčevog sistema.

PRINCIP RADA. Zakon o konzervaciji količine kretanja pokazuje da je potisak raketnog motora jednak proizvodu izbačene mase i brzine izbacivanja. Kod današnjih raketa, 75 do 95% od ukupne mase, u momentu napuštanja Zemljine površine, sastoji se od materije namenjene tome da bude izbačena brzinom koja po svojoj apsolutnoj vrednosti nije naročito velika. Ova brzina izbacivanja često je manja od 4 km/s kod hemijskih raketnih motora, dok je najveća poznata brzina, brzina svetlosti, jednaka 300 000 km/s. Pošto hemijski proces ulazi u izraz za brzinu izbacivanja jedino preko temperature, teorijska istraživanja su se ubrzo usmerila na druge moguće principe rada. Cilj je, dakle, ostvarivanje potisaka izbacivanjem male mase, ali zato veoma velikom brzinom.

U svemiru je otpor kretanju praktično zanemarljiv, pa se srednji ili, čak, mali potisci ostvarivani tokom dugog trajanja leta svemirskog broda, potpuno dovoljni da mu prenesu konstantno ubrzanje, koje dovodi do značajnog vremenskog skraćenja puta prema drugim planetama. Tipovi budućih motora odgovaraju, dakle, isključivo svemirskim misijama, pošto bi u gustim slojevima atmosfere njihov stepen iskorišćenja bio suviše mali, a smanjeni potisak nesposoban da im prenese početne brzine neophodne za njihovu misiju.

GLAVNI TIPOVI NEHEMIJSKIH MOTORA. Pošto se neophodnost povećavanja specifičnih impulsa raketnih motora imperativno nametala a mogla se predvideti nesposobnost hemijskih procesa da ovome zadovolje, istraživači su se u prvom redu okrenuli nuklearnoj energiji. Već su vršena istraživanja usmerena ka realizaciji mlaznih motora čija bi komora za sagorevanje na kerosin bila zamenjena jednim razmenjivačem toplote povezanim sa atomskim reaktorom. Polazeći od ovih teorijskih studija, a pošto je statoreaktivni motor već izvesno vreme bio u primeni, istraživanja su se orijentisala na *nuklearni statoreaktivni motor*. Proračuni pokazuju da je 100 g fisionog materijala u stanju da oslobodi istu količinu energije koju bi oslobodilo 250 t ugljovodonika. U stvari, ovi motori predstavljaju određeni interes i za pogon aviona, pošto omogućavaju realizaciju veoma velikih teretnih aviona sa autonomijom sličnom onoj koju imaju nuklearne podmornice. Još je interesantnije što se jedan ovakav motor može primeniti kao glavni motor za aerokosmičke transportere, sposobne za povratak na Zemlju. Ovakav motor bio bi u stanju da dovede više

stupnjeva transportera do graničnih slojeva atmosfere. Njegova realizacija zavisi, međutim, od mogućnosti ostvarenja nuklearnog reaktora velike snage, a male težine (uključujući zaštitu od zračenja). Ovakvi projekti, iako su u osnovi usmereni na primenu u atmosferi, direktno vode ka svemirskim propulzorima, koji su u biti bezvazdušni motori usled totalnog odsustva kiseonika u kosmičkim prostranstvima i koji bi morali da ponesu potrebnu rezervu oksidanata.

Nuklearna raketa. Ovaj nuklearnotermički propulzor sastoji se od dva glavna elementa: toplotnog izvora, koji se sastoji od jezgra nuklearnog reaktora i materije koja se izbacuje — vodonika. Kod ovog propulzora vodonik se koristi ne zbog svojih hemijskih svojstava, već isključivo kao propulzioni materijal. On se dovodi na temperaturu od oko 3 000°C i izbacuje kroz mlaznicu brzinom od oko 8 km/s, odnosno brzinom dvaput većom od one kod najboljih hemijskih propergola. Jedan ovakav propulzor izrađen je u Sjedinjenim Državama, ali nikada nije poleteo, kao ni kivi, ptica po kojoj je dobio ime. U stvari, ovaj eksperimentalni motor ispitivan je na železničkim šinama. Njegova primena u atmosferi zavisi od rešenja problema radioaktivnosti izduvavanog fluida. Čak i izvan granica atmosfere primena ovog propulzora još postavlja probleme koji se odnose na razvoj materijala sposobnih da dugo izdrže temperature od 3 000°C, kao i na izvođenje hlađenja nuklearnog reaktora po zaustavljanju.

Termoelektrični motor najčešće se koristi vodonikom, koji se, prolazeći, na primer, između elektroda električnog luka, zagreva do visoke temperature, a potom se širi u mlaznici. Ovakav motor, koji bi u izvesnim slučajevima omogućio udvajanje korisne mase jedne interplanetarne sonde, još nije praktično ostvarljiv usled nedostataka materijala otpornih na uslove rada u njemu.

Jonski motor koristi se jonizovanim gasom, odnosno naelektrisanim česticama kao propulzionim materijalom. Današnji jonski motori upotrebljavaju cezijum zagrejan na 1 300°C, koji prolazeći kroz poroznu ploču od volframa, biva jonizovan. Joni se tada ubrzavaju pri prolazu kroz elektrostatičko polje od nekoliko hiljada volti. Elektrode igraju, dakle, ulogu linearnog akceleratora čestica i omogućuju ostvarivanje brzina izbacivanja od nekoliko desetina kilometara u sekundi. Osnovni nedostatak ovog tipa propulzora je u tome što mlaznica ubrzo biva naelektrisana suprotno od gasnog mlaza, što ima za posledicu prvo usporavanje izbacivanja, a zatim i njegovo potpuno zaustavljanje. Danas se istraživanja usmeravaju ka iznalaženju načina za neutralisanje naelektrisanja čestica u momentu njihovog prolaska kroz mlaznicu.

Motor na plazmu. Teorijski, ovaj motor izgleda da ima najviše izgleda da postane motor budućih kosmičkih brodova, iako još postavlja dosta problema koje treba rešiti pre nego što bi mogao i praktično biti ostvaren. Njegov princip rada je u sledećem: propulzor radi pre svega kao generator plazme, odnosno on razara atomsku strukturu propulzionog fluida dovodeći ga na veoma visoke temperature, što ima za posledicu stvaranje mešavine elektrona i jezgra, koji čine neutralan gas nazvan *plazma*. Ostvarenje plazme moguće je u veoma intenzivnom električnom polju, na koje se dodaje magnetsko polje koje usmerava i ubrzava plazmu ka mlaznici. Iako su temperature, u smislu klasične termodinamike, u ovom motoru izvanredno visoke, ne postavlja se naročito pitanje materijala, pošto je reč o koordiniranoj ekscitaciji čestica koje neprekidno ostaju udaljene od zidova motora usled delovanja elektromagnetnog polja. U ovakvim motorima mogu se dostići brzine izduvavanja koje se približavaju brzini od 1 000 km/s, ali se potisak koji je danas moguće ostvariti još uvek meri gramima. Međutim, to su tek prve laboratorijske realizacije. Njihov dalji razvoj zavisi u prvom redu od realizacije električnih generatora od nekoliko stotina kilovata, veoma malih dimenzija, sposobnih za dugotrajan neprekidan rad, koji su u stanju da iz male količine materije izvuku znatnu količinu energije.

Fotonski motori. Ovi propulzori još su u domenu ideja, pošto je reč ni manje ni više već o tome da se ukrote protoci svetlosnih fotona. Njihova masa je beskonačno mala, ali im je brzina jednaka 300 000 km/s, tako da bi specifična potrošnja bila veoma niska. Tehnika realizacije ovakvog propulzora tek treba da bude otkrivena, kao, uostalom, i drugih tipova budućih propulzora, ali bi ona omogućila ostvarivanje mnogo većih snaga od onih koje su ostvarljive sa hemijskim raketnim motorima. U stvari, energija koju ovakvi propulzori preuzimaju od materije, nekoliko desetina milijardi puta je manja od ukupne energije koja se teorijski sadrži u materiji, shodno Ajnštajnovoj formuli: $E=mc^2$.

Projektili i rakete

ISTORIJAT

Na istorijskom planu sve do drugog svetskog rata nije moguće praviti razliku između, s jedne strane, raketnih motora i, druge, raketa i projektila. Međutim, već 1930. u predgrađu Berlina, Rajnikendorfu, osnovan je prvi eksperimentalni centar za razvoj raketa (Raketenflugplatz), koji je pripadao Astronautičkom udruženju (Verein für Raumschiffarht), koje je osnovala jedna grupa istraživača, među kojima su bili pioniri astronautike u Nemačkoj Herman Obert (Hermann Oberth) i Verner fon Braun (Wehrner von Braun). Ovu organizaciju ubrzo prisjedinjuje sebi vojni eksperimentalni centar u Kumersdorfu, kojim rukovodi general Dornberger (Dornberger). Od 1937. probni letovi, koji predstavljaju prve korake osvajanja vasione, vrše se na novom poligonu za gađanje Grajfsvalder Oi (Greifswalder Oie) na Baltičkoj obali. Ovaj ubrzo prerasta u čuveni centar Peneminde (Peenemünde), gde su usavršene rakete A3, A5 i A4, od kojih je poslednja postala ratna raketa Vergeltungswaffe Zwei (oružje odmazde broj dva) ili skraćeno V2.

Tokom celokupnog II svetskog rata nemački inženjeri rade na usavršavanju raketnih motora i na njihovoj primeni u različitim domenima. U početku namenjeni propulziji aviona, ovi motori se ubrzo koriste za pogon aparata bez pilota, preteče svih današnjih raketa i projektila. Na čisto aeronautičkom planu, pored raketnog planera DFS 228 i presretača »meseršmita 163« (Messerschmitt 163), treba specijalno pomenuti realizaciju Bahema BP 20 Nater (Bachem BP 20 Natter), čudnog aparata sa pilotom, koji predstavlja prelazni vid oružja između klasičnih presretača i raketa zemlja-vazduh. Po prisustvu pilota i po svom naoružanju, koje se najpre sastojalo od jednog topa a zatim ubrzo zamenjeno raketama, »nater« (»zmija«) veoma je nalik na avion, ali je to prvi avion sa vertikalnim uzletanjem. Dalje, po svojoj propulziji, kao i po tehnici puštanja u pogon, on predstavlja preteču protivavionskih raketa. U stvari, bio je lansiran u vertikalnom položaju, duž specijalnih vođica, pomoću eksplozivnih patrona, a, kao i u slučaju raketa zemlja-vazduh, lansirao se svega nekoliko minuta pre prolaska formacije bombardera, koje je bio u stanju da napadne zbog svoje brzine uzletanja od 11 000 m/min.

U klasi odbrambenih protivavionskih projektila, nemačka industrija je pred kraj drugog svetskog rata proizvela nekoliko originalnih oružja. Hs-117 »Schmetterling« (»leptir«), poznat i po svojoj skraćenici V3, koršćen je najviše. Gonjena dvema raketama na azotnu kiselinu, ova mašina letela je brzinom od 1 000 km/h i dostizala visinu od 15 000 m. »Wasserfall« (»vodopad«), takođe na azotnu kiselinu, dostizao je 2 500 km/h, dok je »Rheintochter« (»ćerka Rajne«) imala brzinu od 1 500 km/h i bila efikasna sve do visine od 6 000 m. Kategorija oružja nošenih na avionima obuhvata Hs-298 i raketu X4, od kojih je ova poslednja bila teledirigovana. Tako su Nemci za svega nekoliko godina istražili gotovo sve moguće vojne primene raketa i projektila, pošto je gotovo sigurno da su u vodama blizu Penemindea eksperimentisali sa raketama lansiranim sa podmornica. Međutim, realizacijom leteće bombe V1, na pulzoreaktivni pogon, i rakete V2, sa raketnim motorom, oni su pokazali svoje pravo tehničko majstorstvo.

Tokom ovog vremena, istraživanja u ovom smeru u drugim zemljama bila su tek u početnom stadijumu, tako da je zaostajanje u odnosu na razvoj u Nemačkoj bilo znatno. Dovoljno je samo setiti se da su Nemci pred kraj rata počeli sa realizacijom višespratne rakete A9-A10, nazvane »antipodni bombarder«, koja je trebalo da dostigne ciljeve sa druge strane Atlantika. Posle prekida neprijateljstava nemački naučnici bili su »rekviririani« od velikih sila koje su ih naterale da rade za njih, što je omogućilo realizaciju u prvo vreme vojnih raketa i projektila, a docnije i raketa za lansiranje satelita.

Veliki broj studija i realizacija imao je dvostruki cilj: da bi se, s jedne strane, došlo do novih raketnih oružja i projektila, za koje se dugo pogrešno verovalo da će moći u potpunosti da zamene klasično naoružanje, a sa druge strane da bi se osvajao svemir, pre svega, produbljivanjem čovekovih saznanja o atmosferi, a zatim istraživanjem regiona više ili manje udaljenih od Zemlje.

U današnje vreme rakete za osvajanje svemira i vojni projektili često proizlaze jedni iz drugih, ili se bar u svom razvoju koriste istom tehnologijom. Paralelno s tim počinje da se ostvaruje nova generacija projektila. To su *antiprojektilni projektili*, namenjeni uništavanju interkontinentalnih raketa pre nego što stignu na cilj. Ovakvi uređaji, koji zahtevaju čitavu infrastrukturu za remont i upravljanje, veoma su kompleksni sa elektronskog stanovišta. Mreža ovakvog tipa upravo je u toku realizacije u Sjedinjenim Državama; međutim, još nije moguće dati više detalja o ovakvim sistemima koji su u domenu dobro čuvane vojne tajne.

Razne kategorije projektila i raketa

KLASIFIKACIJA PROJEKTILA I RAKETA. Pod opštim pojmom *projektil* klasifikuje se veliki broj raznovrsnih pokretnih objekata koji svi imaju jednu zajedničku karakteristiku: da raspolažu sistemom propulzije koji je autonoman i automatski, kao i, manje ili više, kompleksnim uređajem za upravljanje koji zamenjuje pilota. Među ovim projektilima ima ih koji su snabdeveni propulzorima sposobnim da rade u bezvazdušnim uslovima, kao što su hemijski raketni motori. Samo ovi poslednji mogu biti klasifikovani pod pojmom *rakete*, svi ostali su prosto projektili.

Postoji veliki broj kriterijuma na osnovu kojih je moguće klasifikovati projektile. Najrasprostranjeniji među njima je onaj koji se zasniva na njihovoj primeni. Na taj način, razlikuju se, uglavnom projektili i rakete za vojnu primenu i rakete za naučnu, ili čak komercijalnu primenu, pri čemu treba posebno izdvojiti rakete za lansiranje satelita i kosmičkih brodova.

VOJNI PROJEKTILI I RAKETE

Moderno naoružanje armija postaje sve složenije na tehnološkom planu. Ako se izuzme sporadično korišćenje nekih tipova raketa u bitkama (rakete kod Kongreva u napoleonovskim ratovima i rakete »iguman« u prvom svetskom ratu), može se konstatovati da je sve do drugog svetskog rata vojnik raspolagao isključivo projektilima koji su koristili samo određeni inicijalni impuls: snagu mišića pri izbacivanju strela, mehaničku silu kod ratnih mašina iz srednjeg veka ili, najzad, paljenje eksplozivnog punjenja kod pušaka, revolvera, topova itd. Dva nova pojma uvedena su, i dalje razvijana, počevši od 1940: *autopropulzija* i *upravljanje*. Projektili sa autopropulzijom, ali kojima se ne upravlja, čine jednu kategoriju u okviru koje se nalaze veoma raznovrsne mašine. Za njih je karakteristična činjenica da poseduju propulzor koji se stavlja u pogon nakon lansiranja. S druge strane, nisu moguće nikakve korekcije putanje projektila nakon momenta lansiranja usled odsustva sistema za upravljanje.

• *Protivavionski i protivtenkovski projektili* čine najelementarniju podgrupu. Oni prethode oružjima vazduh-vazduh ili vazduh-zemlja, na primer, ali je njihova putanja određena isključivo orijentacijom nosača za lansiranje i početnom brzinom.

• Drugu podgrupu, koja prethodi pojavi projektila zemlja-zemlja, projektila za osmatranje i projektila-meta, čini leteća bomba V1, čija je putanja bila određena orijentacijom lansirne rampe, dok je mesto pada bilo približno izračunavano nivoom punjenja rezervoara za gorivo i potrošnjom pulzoreaktivnog motora.

• V2, prethodnik svih savremenih balističkih raketa, iako nije raspolagao nikakvim sistemom za upravljanje, čini treću podgrupu jer mu je putanja istovremeno bila određena vremenom penjanja, trajanjem rada njegovog propulzora i nagibom koji je zauzimao u tački kad je propulzija prestala.

• Najzad, dolazi do pojave prvih projektila koji raspolažu istovremeno i autopropulzijom i sistemom za upravljanje, i koji čine današnju generaciju vojnih projektila. Ovi projektili, nezavisno od vrste propulzije kojom raspolažu (neki od njih imali su pogon na vazdušne motore, ali su danas gotovo svi ovi prevaziđeni), klasifikuju se na osnovu sredine iz koje se lansiraju: zemlje, vazduha ili mora.

PROJEKTILI KOJI SE LANSIRAJU IZ KOPNENIH BAZA mogu imati dvostruku ulogu: da povećaju domet dejstva artiljerije, u izvesnim slučajevima, ili da zamene taktičku, čak i strategijsku, bombardersku avijaciju. Treba razlikovati dve glavne kategorije: projektile *zemlja-zemlja* i projektile *zemlja-vazduh*.

Projektili zemlja-zemlja. Njihova osnovna misija je uništavanje pokretnog ili nepokretnog cilja koji se takođe nalazi na zemlji. Teledirigovani protivtenkovski projektili, na primer, francuski projektili SS-11 ili SS-12, čiji je domet oko jednog kilometra, zamenjuju dejstvo protivtenkovske artiljerije, dok rakete malog ili srednjeg dometa (sa klasičnim ili nuklearnim bojevim glavama), od nekoliko kilometara do 500—600 km, zamenjuju ili dopunjuju dalekometnu artiljeriju i taktičku bombardersku avijaciju. Izvan ovih dometa, odnosno sa dometom od 2 500 do 8 000 km, balističke rakete sa nuklearnim ili čak termonuklearnim punjenjem izvršavaju misije slične misijama strateške bombarderske avijacije. Ovakve rakete danas se lansiraju iz podzemnih bunkera, okruženih salama za komandovanje i kontrolu, radionicama i skladištima, koje se takođe nalaze pod zemljom. Ovakvi centri, zaštićeni od nuklearnog bombardovanja, nalaze se u Sjedinjenim Državama, u Francuskoj i u drugim zemljama.

Projektili zemlja-vazduh. Ove najvećim delom čine odbrambena protivavionska oružja namenjena uništavanju ili aviona ili balističkih projektila. Postoji čitava gama ovih oružja, koja se veoma razlikuju po svojoj tehnologiji i načinu lansiranja, od protivavionskih raketa, namenjenih borbi sa niskoletećim avionima, kao raketa Houk (Hawk), ili sa avionima na velikim visinama, kao rakete Najk (Nike), na primer, od kojih su neki tipovi sa nuklearnim punjenjem, do protivprojektilskih projektila, koji su još u fazi razvoja ili eksperimentisanja. Zgodno je u ovu kategoriju klasificirati i projektile-mete, kao i projektile za fotografsko osmatranje. U ovoj poslednjoj kategoriji još ima projektila čiji se pogon sastoji od vazdušnih propulzora, kao što je francuska projektil-meta CT-41, snabdevena statoreaktivnim motorom, koja se kreće brzinom od 3 Maha.

PROJEKTILI KOJI SE LANSIRAJU SA AVIONA. Razlikuju se tri kategorije ovih projektila, zavisno od misije koja im je namenjena.

Projektili vazduh-vazduh. Posedujući veoma velike brzine, ova oružja malih dimenzija namenjena su napadu na druge avione. Neka od njih upravljaju se radarom, ali izgleda da su najefikasnija ona sa autodirigovanjem pomoću detektora infracrvenog zračenja.

Projektili vazduh-zemlja mogu služiti za taktičku podršku, kada se ispaljuju sa sporoletećih aviona ili iz helikoptera (AS-11 i AS-12 u Francuskoj). Mogu to biti i rakete za bombardovanja na velikim rastojanjima, kao što je američka raketa »raskal« (Rascal). Međutim, usled sve naglijeg smanjivanja broja strateških bombardera, kao i zbog povećanja preciznosti raketa zemlja-zemlja, ovaj tip projektila nema neku budućnost.

Projektili vazduh-morske dubine. Namenjeni napadu na zaronjene podmornice, ovi projektili još nemaju veliku primenu.

PROJEKTILI KOJI SE LANSIRAJU SA ZARONJENIH PODMORNICA. Ovakvi projektili, kao što je američki »polaris«, mogu imati domet od nekoliko hiljada kilometara. Ovo strahovito oružje izgleda da je imalo svoj začetak u nemačkim eksperimentima krajem II svetskog rata. Snabdeveni nuklearnim punjenjem, ovi projektili su nezamenljiva dopuna zemaljskim bazama balističkih projektila.

PROJEKTILI KOJI SE LANSIRAJU SA BRODOVA mogu imati uglavnom istu namenu kao i oni koji se lansiraju sa zemlje ili iz aviona, što će reći da u zavisnosti od svoje koncepcije mogu biti projektili za napad na druge brodove ili za napad na instalacije smeštene na obali, za uništavanje aviona ili, najzad, za uništavanje zaronjenih podmornica. Usled nestabilnosti rampe za lansiranje, koja se nalazi na palubi broda, ovi projektili su snabdeveni specijalnim uređajima za stabilizaciju, koji stupaju u dejstvo u momentu lansiranja. Uređaji za akviziciju i za upravljanje su takođe specijalne koncepcije.

NAUČNE I KOMERCIJALNE RAKETE

Korišćenje raketa nije ograničeno samo na vojnu primenu. Danas, pored raketa za lansiranje satelita i kosmičkih brodova, postoje i mnogobrojne naučne misije koje se poveravaju raketama, a očekuje se da će uskoro doći i do njihove primene u komercijalne svrhe.

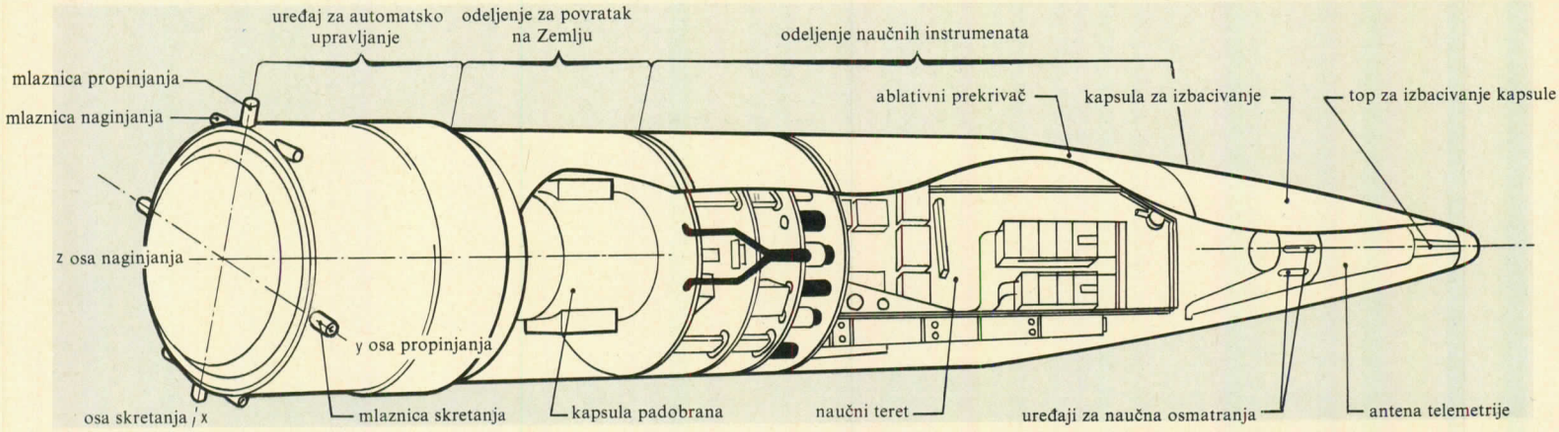
RAKETE ZA ISTRAŽIVANJE VISOKIH SLOJEVA ATMOSFERE odigrale su prvorazrednu ulogu u osvajanju svemira. One su naučnike i inženjere snabdele informacijama koje su bile neophodne da bi se pristupilo lansiranju satelita i kosmičkih brodova. Dok avioni i baloni ne mogu ni u kom slučaju dostići visine veće od 30 do 40 km, eksperimentalne rakete-sonde dostižu visine od 400 do 500 km. One omogućavaju na taj način ne samo istraživanje spoljnih slojeva Zemljine atmosfere, već i vanatmosferskih zona u kojima danas kruži veliki broj satelita.

Postojanje satelita i kosmičkih sondi, koje se lansiraju prema Mesecu ili prema planetama Sunčevog sistema, ne umanjuje interesovanje za rakete-sonde u istraživanjima atmosfere. U stvari, kosmički brodovi prolaze veoma brzo kroz slojeve atmosfere i počinju da šalju naučne informacije na Zemlju tek pošto su izašli na orbitu. Rakete-sonde ostaju, dakle, i danas jedini instrumenti za istraživanje velikih visina od 300 do 400 km. Istraživanja u ovoj oblasti usmerena su na izučavanje sastava atmosfere zavisno od visine, promena temperature i pritiska, intenziteta kosmičkog zračenja, struja i vetrova na visinama (preko emitovanja natrijumskih oblaka), varijacija magnetskog polja, električnih osobina gornjih slojeva atmosfere itd. U najopštijem slučaju, rakete-sonde sastoje se od jednog stepena za propulziju. Iznad njega je smešten koristan teret, koji se sastoji od sklopa odgovarajućih naučnih instrumenata za datu misiju, aparata za telemetriju, namenjenih odašiljanju na Zemlju informacija prikupljenih tokom leta, i, najzad, sistema za rekuperaciju korisnog tereta radi naknadne obrade informacija registrovanih u grafičkom ili fotografskom vidu, na primer. U izvesnim slučajevima rakete su snabdevene kino-kamerama ili televizijskim uređajima. Naučni instrumenti instalisani u sondi zavise uveliko od fenomena koji se istražuju.

Izvođenje nekog eksperimenta sa raketama-sondama može se zamisliti na dva različita načina. Najčešće, merenja se obavljaju i tokom faze propulzije i tokom balističke faze koja joj sledi. Podaci se tada odašilju na Zemlju pomoću telemetrije ili se registruju u samim instrumentima. Pri izvođenju izvesnih merenja, međutim, kada rad raketnog motora može da poremeti bilo funkcionisanje instrumenata, bilo samu veličinu koja se meri, ona se ne vrše tokom faze penjanja. U ovom slučaju, kada raketa dostigne svoj najviši položaj, kapsula koja sadrži instrumente za merenje odvaja se od tela rakete i lagano spušta prema Zemlji uz pomoć padobrana. U ovoj fazi leta vrši se registracija informacija, ili se one odašilju na Zemlju pomoću telemetrije. Ovaj metod, koji je naročito često korišćen u Sovjetskom Savezu, specijalno je interesantan kada je potrebno uzeti uzorke atmosfere na različitim visinama.

RAKETE ZA ASTRONOMSKA OSMATRANJA. Interesovanje za ovakve rakete, koje je danas neosporno, ostaće, sigurno, čak i posle lansiranja astronomskih satelita, naročito kada je reč o izučavanju uticaja astronomskih, a pogotovo sunčevih fenomena, na atmosferu. Naročito interesantan fenomen su pomračenja Sunca, koja omogućavaju proširivanje naših saznanja o sunčevom spektru i njegovoj apsorpciji u raznim slojevima atmosfere. U koristan teret ovakve rakete, pored naučnih instrumenata i uređaja za rekuperaciju, ulazi i sistem za automatsko upravljanje rakete prema Suncu (*sl.* 42). Uređaj koji su koristili Francuzi, novembra 1966, obezbeđivao je upravljanje prema Suncu sa preciznošću reda četvrtine stepena i ujedno ograničavao rotaciju kapsule sa instrumentima oko sopstvene ose na 0,25 stepena u sekundi. Prilikom ovog eksperimenta, koji je izvršen u Argentini, dve rakete »titus« (Titus), koje je u Francuskoj konstruisala ONERA, lansirane su u intervalu od 30 sekundi do visine od oko 170 km. U stvari, da bi se vršila osmatranja ultravioletnog spektra Sunca, mora se preći visina od 120 km.

RAKETE ZA AERODINAMIČKA ISTRAŽIVANJA nisu u redovnoj primeni, ali su neke od njih već omogućile izvođenje izvanredno korisnih ispitivanja ponašanja izvesnih formi krila pri velikim Mahovim brojevima, u stvarnim



Sl. 42. — Koristan teret rakete »Titus«, lansirane novembra 1966, u Argentini, radi osmatranja pomračenja Sunca.

uslovima leta u atmosferi. Ovakva ispitivanja doprinose kompletiranju ispitivanja vršenih u aerotunelima, pošto se izvode sa modelima većih dimenzija i u uslovima veoma bliskim onima kod normalne primene. Prilikom ovih eksperimenata na vrh rakete postavlja se model krila koje se ispituje, snabdeven elektronskim sistemom preciznih mernih instrumenata, koji mere napone, brzinu i druge relevantne parametre. Već od 1953. ovakve rakete su korišćene u Sjedinjenim Državama za ispitivanja pri velikim brzinama, sve do 2 400 km/h. U Francuskoj ONERA je proizvela čitavu gamu ovakvih raketa, od kojih su neke služile za ispitivanja oblika krila supersoničnog francusko-britanskog transportnog aviona »konkord« (»Concorde«).

KOMERCIJALNE RAKETE se još uvek nalaze u fazi studija i projekata. Izgleda, međutim, da bi poštanske rakete veoma brzo mogle da postanu stvarnost, uzimajući u obzir napredak tehnologije, naročito povećanje preciznosti uređaja za upravljanje. Još od 1930. vršene su u Nemačkoj i Austriji probe transportovanja pisama iz jedne doline u drugu. Nedavno je u Francuskoj završen projekat jedne poštanske rakete srednjeg dometa. Do sada nema još nijedne realizacije ovakve vrste, iako bi se mogle zamisliti, u svakom slučaju tehnički, ako ne i ekonomski, interkontinentalne poštanske rakete. Drugu mogućnost za komercijalnu primenu raketa predstavljao bi transport putnika, ali je realizacija ovakve zamisli još veoma daleko.

RAKETE ZA LANSIRANJE SATELITA I KOSMIČKIH SONDI

Iako je, u stvari, reč samo o jednoj kategoriji naučnih raketa, rakete za lansiranje satelita imaju specijalno mesto u klasifikaciji projektila i raketa zbog velikog broja izvršenih lansiranja i važnosti koju imaju za osvajanje kosmosa. Rakete za lansiranje imaju uglavnom dva do četiri stepena propulzije (*sl.* 43). Sklop jedne rakete za lansiranje sastoji se od dve, tri ili četiri rakete postavljene jedna na drugu. One se potpaljuju posle dužeg ili kraćeg vremena od završetka sagorevanja i odvajanja prethodnog propulzionog stepena. Primena više stepena olakšava postizanje potrebnih brzina za satelizaciju ili oslobađanje satelita, odnosno kosmičkih brodova.

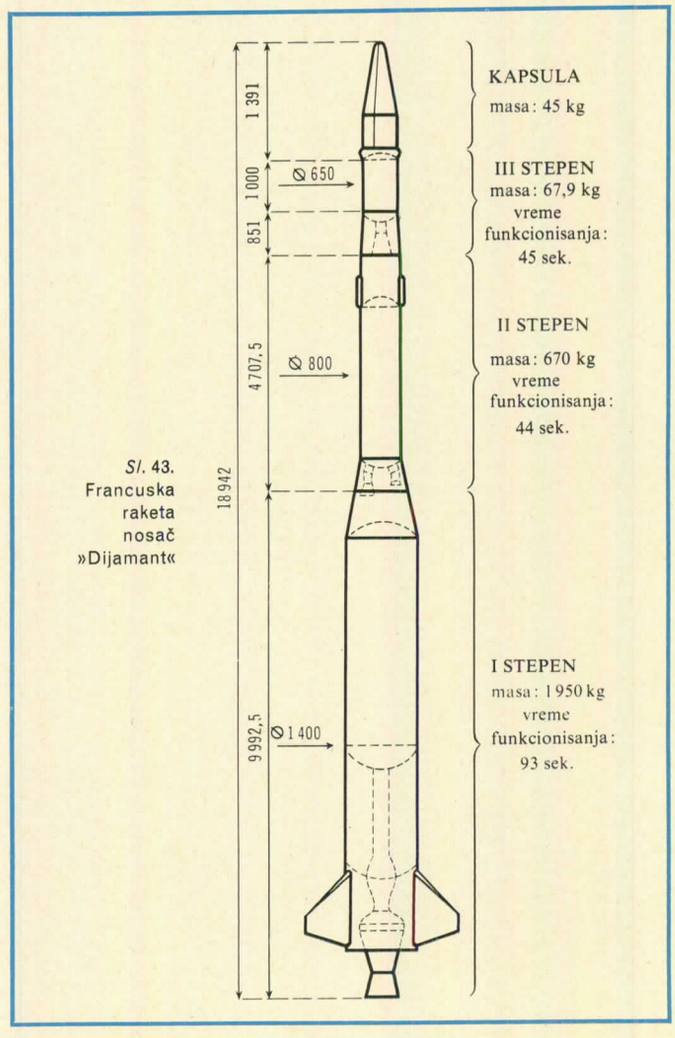
OPŠTI SASTAV RAKETE ZA LANSIRANJE. Kao svi projektili, i rakete za lansiranje imaju uglavnom osnovne delove slične onima kod aviona, a i metodi fabrikacije su im veoma slični. Treba razlikovati četiri osnovna dela jedne rakete za lansiranje: ram, propulzor, kaseta uređaja za upravljanje i koristan teret.

1. *Ram*, koji služi kao osnovni kostur rakete, mora biti što je moguće lakši, pošto konačna brzina rakete zavisi u osnovi od odnosa njene ukupne mase i mase ponetih propergola. Iz ovoga proizlazi da se strukturni elementi rakete često svode samo na rezervoare za tečne propergole. Može se desiti da ovi rezervoari, kada su prazni, nemaju dovoljnu čvrstoću za operacije oko montaže rakete. U tom slučaju neophodno je dovesti ih na određen unutrašnji natpritisak.

2. *Propulzor* je blisko povezan sa konstrukcijom rakete preko rezervoara. Može biti sa čvrstim ili tečnim propergolima, pri čemu oba tipa propergola mogu biti simultano korišćena na istoj raketi. Prvi stupanj rakete za lansiranje je i najsnažniji. On obezbeđuje polaznu akceleraciju (engl. *booster*), koja treba da savlada najveće otpore, kako delovanje Zemljine teže, tako i otpor prizemnih slojeva atmosfere koji su i najgušći. Kod najvećih dosadašnjih američkih raketa za lansiranje, »Titana III C« i »Saturna V«, potisci u momentu lansiranja iznose više od 1 000, odnosno 3 000 tona. Uređaji za upravljanje raketom povezani su sa različitim propulzionim stepenima da bi regulisali orijentaciju mlaza usmeravanjem mlaznica.

3. *Kaseta uređaja za upravljanje* smešta se, uglavnom, na vrh poslednjeg propulzionog stepena i sadrži električne, elektronske i mehaničke uređaje koji obezbeđuju kontrolu svih faza propulzije, kao i stabilizaciju i upravljanje rakete nosača, od ispaljivanja do izbacivanja korisnog tereta u orbitu. Ovaj krajnje kompleksan uređaj obezbeđuje i odvajanje pojedinih propulzionih stepena, na osnovu telekomandovanih naredbi sa Zemlje, zatim, na isti način, potpaljivanje narednih propulzionih stepena i, najzad, odvajanje satelita. Pored ovoga, on registruje sve karakteristike leta, naročito performanse motora, i odašilje ih na Zemlju telemetrijom. Usled složenosti funkcija koje obavlja, ovaj uređaj najčešće ima značajne dimenzije. Na primer, na raketi »Saturn«, on je dugačak 90 cm i težak oko 2 tone.

4. *Koristan teret*, smešten iznad kasete uređaja za upravljanje, sastoji se uglavnom iz satelita ili vasionskog vozila. Njegova masa i dimenzije u zavisnosti su od zadatka same rakete. Američka raketa »Titan III C«, čija je maksimalna težina pri uzletanju reda od 645 t, može da plasira u nisku Zemljinu orbitu satelit teži od 10 t, sa maksimalnim volumenom od 100 m³. Ista raketa može



Sl. 43. Francuska raketa nosač »Dijamant«

da lansira sinhroni satelit od oko 1 t u ekvatorijalnu kružnu orbitu, a takođe i sonde od 2,4 i 1,5 tona, prema Mesecu ili Marsu.

VERIFIKACIJA I HRONOLOGIJA PRED ISPALJIVANJE. Pre lansiranja satelita u kosmos, nekoliko časova pre ispaljivanja, kada je već celokupan sistem i rakete i satelita, montiran i prekontrolisan, počinje čuveno odbrojavanje ili, stručnije rečeno, *negativno odbrojavanje hronologije lansiranja*. Tokom ove hronologije pune se rezervoari stupnjeva tečnim propergolima i uporedo se vrši verifikacija ispravnosti rada kasete sa uređajima, od koje suštinski zavisi odvijanje celokupne operacije. Ova konačna verifikacija dolazi nakon niza provera kojima se podvrgavaju svi elementi kasete sa uređajima pre početka hronologije odbrojavanja. Ove provere vrše se elektronskim uređajima koji su tako programirani da simuliraju sve slučajeve, koji se mogu pojaviti u radu, naročito one koji mogu poremetiti opšti lanac komandi. Prilikom finalne verifikacije, tokom odbrojavanja, najveći deo ovih provera vrši se ponovo.

Ako bilo koji od ovih testova detektuje određenu grešku, hronologija odbrojavanja se automatski obustavlja. Na isti način, simultano se testiraju svi uređaji, na Zemlji: kamere, kinoteodoliti, razni registratori, radar za praćenje, reperne stanice na kosmodromu pojedinih stanica, prijemnici i odašiljači telekomandi i telemetrije (na Zemlji i na raketi nosaču) itd. Na isti način kao i pri testiranju unutrašnjeg funkcionisanja uređaja rakete i njenog korisnog tereta (koji se takođe neprekidno testira sve do ispaljivanja rakete), svaki negativan odgovor na pojedini test dovodi do prestanka negativnog odbrojavanja hronologije i do povratka na neku od ranijih tačaka, više ili manje udaljenu, zavisno od važnosti testa i mogućih konsekvenci, ili čak do povratka na početak odbrojavanja.

Negativno odbrojavanje hronologije lansiranja francuske rakete »Dijamant«, koja je izbacila u orbitu prve francuske satelite.

H — 6 h 45 min.	— polazak ekipe prema bazi za lansiranje;
H — 6 h 15 min.	— personal i materijal na mestu; početak punjenja rezervoara;
H — 4 h	— opšta kontrola kosmodroma;
H — 3 h 55 min.	— kraj punjenja rezervoara;
H — 3 h 15 min.	— evakuacija personala (izuzev personala komandne kule); početak postavljanja pirotehničkih uređaja;
H — 3 h	— uspostavljanje i kontrola veze sa stanicom Bretinji i stanicom Dijana;
H — 1 h 05 min.	— izvlačenje rakete;
H — 35 min.	— povlačenje personala iz komandne kule;
H — 30 min.	— zatvaranje vrata centra za komandovanje; uručivanje ključa pulta operatoru pulta za ispaljivanje;
H — 9 min.	— napajanje mašine iz spoljašnjih baterija; kontrola ispravnosti napajanja uređaja za upravljanje prvog stupnja; početak kontrole kola telemetrije;
H — 5 min.	— napajanje prijemnika telekomandi; kontrola napona napajanja elektronskih uređaja i telekomandi;
H — 4 min.	— puštanje u rad magnetskih registratora;
H — 3 min. 20 s.	— prekidanje spoljašnjeg napajanja telekomandi; pokretanje registratora na trake;
H — 3 min.	— napajanje kasete sa uređajima iz internih baterija; kontrola telemetrije;
H — 2 min.	— otvaranje ventila visokog i niskog pritiska prvog stupnja; kontrola uređaja za pilotiranje prvog stupnja;
H — 1 min. 15 s.	— iniciranje motora za potpaljivanje prva dva stupnja;
H — 1 min.	— povezivanje mašine sa internim baterijama; kontrola uređaja za pilotiranje drugog stupnja i napona u mašini;
H — 40 sek.	— startovanje programa sekvencioniranja (odbrojavanja sekundi) i kasete sa uređajima;
H — 20 sek.	— izvlačenje pupne vrpce satelita D-1;
H — 10 sek.	— puštanje u pogon kamera, osciloskopa i svih ostalih registratora koji se koriste na Zemlji;
H — 7 sek.	— puštanje u pogon fiksnih kamera;
H — 5 sek.	— pokretanje kinoteodolita i kamera za praćenje;
H — 2 sek.	— otkačinjanje pupne vrpce kasete sa uređajima i pupne vrpce između propulzionih stepena uz potpaljivanje raketa protiv naginjanja;
H — 0	— ISPALJIVANJE.

Upravljanje projektila i raketa

OPŠTE. Za realizaciju projektila i raketa nije dovoljno samo obezbediti autonomnu i automatsku propulziju, već je neophodno ostvariti i sitem za pilotiranje i navigaciju na samoj mašini, koji je u stanju da funkcioniše bez ljudske intervencije. Neophodni zahtevi koje sistem za upravljanje treba da zadovolji razlikuju se zavisno od toga da li je reč o projektilu za primenu u vojne svrhe ili za naučnu primenu. U prvom slučaju uslovi tajnosti su u prvom planu zahteva koji se postavljaju pred sistem upravljanja, koji, osim toga, mora biti izveden tako da nikakve protivmere ne mogu poremetiti njegov rad. Nasuprot tome, kada je reč o raketi za naučne svrhe, mogu biti primenjeni klasičniji metodi telekomandovanja, najčešće zasnovani na radio-električnom principu, koji ni u kom slučaju ne dolazi u obzir za korišćenje u vojne svrhe. Upravljanje projektilima deli se, uglavnom u dve veće kategorije: *teledirigovanje* (ili, u izvesnim slučajevima, telekomandovanje), koje podrazumeva postojanje operatora na Zemlji ili na nekoj drugoj letilici, i *autodirigovanje*, koje se ostvaruje jednim autonomnim uređajem na projektilu, koji obezbeđuje upravljanje po unapred zadanom programu, a uz prikupljanje i korišćenje određenih spoljašnjih informacija.

TELEDIRIGOVANJE ILI TELEKOMANDOVANJE

Daljinsko upravljanje nekim pokretnim objektom najčešće se izvodi radio-talasima; to je radio-upravljanje. Međutim, ono se može koristiti i drugim principima prenošenja naredbi, na primer, direktnom vezom preko provodnika. Nezavisno od principa koji je usvojen, neophodno je razlikovati četiri osnovne grupe telekomandovanja: *ručno teledirigovanje u domenu vidljivosti, automatsko teledirigovanje u domenu vidljivosti, indirektno teledirigovanje* i *automatsko indirektno teledirigovanje*.

RUČNO TELEDIRIGOVANJE U DOMENU VIDLJIVOSTI. Vrši ga operator koji neprekidno drži pokretan objekt u svom vidnom polju i komanduje njegovim kretanjem preko komandnog pulta. Pult može biti više ili manje kompleksan, a poneki put se sastoji samo od ručice kojom se upravlja na način kako se to radi na avionima. Ovaj metod može se primenjivati ili sa Zemlje ili sa nekog helikoptera, aviona ili bilo kakvog drugog pokretnog objekta.

AUTOMATSKO TELEDIRIGOVANJE U DOMENU VIDLJIVOSTI. Ovaj metod, koji se koristi isključivo za vojne projektile, još uvek zahteva prisustvo operatora, koji u svom vidnom polju drži projektil kojim upravlja. Preciznije, operator drži krst končića svog optičkog pribora na meti koju projektil treba da pogodi, ali pri tom ne manipuliše direktno ručicom za telekomandovanje. Jedan računar neprekidno prima informacije o položaju projektila i o orijentaciji optičkog pribora operatora, obrađuje ih i u stanju je da automatski upravlja projektilom.

INDIREKTNO TELEDIRIGOVANJE. Ovaj tip teledirigovanja podrazumeva postojanje sistema informisanja o položaju projektila i uređaja za odašiljanje naredbi za pilotiranje. Pošto je projektil van direktnog vidnog polja operatora, ovaj se neprekidno obaveštava o položaju projektila bilo radarom, bilo nekim drugim sistemom za lociranje (optička ili radio-električna interferometrija, fizografija ili sl.). Pilotiranje se vrši ručno, sa Zemlje ili sa nekog pokretnog objekta.

AUTOMATSKO INDIREKTNO TELEDIRIGOVANJE. U ovom slučaju koristi se isti princip kao i u prethodnom, ali se informacije o projektilu automatski predaju elektronskom računaru koji već poseduje memoriju o planu leta i koji, upoređujući stvarnu putanju sa teorijskom, odašilje sistemu za pilotiranje projektila potrebne instrukcije za otklanjanje eventualnih skretanja.

P r i m e d b a. Do sada smo koristili termine teledirigovanje i telekomandovanje kao potpune sinonime. U stvari, termin teledirigovanje je vojni termin i odgovara pilotiranju nekog pokretnog objekta prema određenom cilju koji može biti pokretan ili nepokretan. S druge strane termin telekomandovanje podrazumeva ne samo teledirigovanje po unapred određenoj putanji već i ideju o daljinskom prenošenju određenih komandi koje mogu biti u potpunosti nezavisne od pilotiranja: puštanje u pogon kamera, odvajanje pojedinih stupnjeva zaštitnih ploča, izvlačenje antena za telemetriju itd. Iz ovog razloga, termin telekomandovanje se radije primenjuje kada je reč o civilnim primenama raketa.

AUTODIRIGOVANJE

Pri ovom principu upravljanja, čija je primena gotovo isključivo vojna, postoje samo automatski uređaji smešteni na projektilu.

Ovi uređaji mogu u izvesnim slučajevima biti u vezi sa radio-električnim odašiljačima na Zemlji. Ovo je, na primer, bio slučaj pri prvoj značajnoj eksperimentalnoj primeni radio-dirigovanja, izvedenoj 1947. uz pomoć jednog transportnog četvoromotorca, pri čemu je jedini zadatak posade bio da isključi ručne kamande za pilotiranje. Autodirigovanje se može izvesti na tri različita načina: *direktnim autodirigovanjem, indirektnim autodirigovanjem* i *apsolutnim autodirigovanjem*.

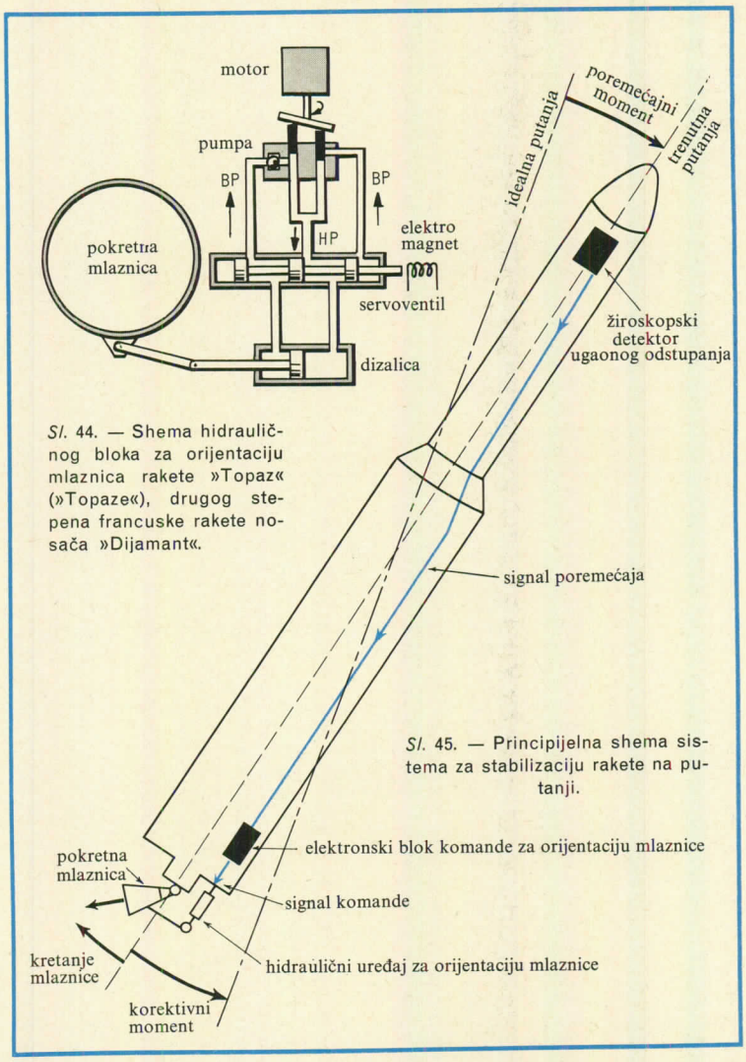
DIREKTNO AUTODIRIGOVANJE omogućava projektilu da se upravi na cilj time što ga prethodno detektuje, bilo korišćenjem infracrvenog zračenja, bilo pomoću radarskog sistema. Ovaj se princip naročito koristi za projektile vazduh-vazduh. U slučaju korišćenja infracrvenog zračenja pilot aviona presretača postavlja svoj aparat u rep neprijateljskog aviona, tako da je ćelija, osetljiva na infracrveno zračenje, smeštena u nosu projektila vazduh-vazduh, u stanju da uhvati zračenje koje emituje izlazna mlaznica aviona koji predstavlja cilj. Od momenta uključenja propulzije projektila ćelija detektora neprekidno upravlja projektil po putanji koja odgovara maksimalnom intenzitetu zračenja, sve do sudara koji inicira eksplozivno punjenje projektila. Isti princip može se isto tako koristiti za rakete zemlja-vazduh, ponekad čak i za projektile vazduh-zemlja, protiv objekata koji emituju infracrveno zračenje (brodovi, dimnjaci fabrika itd.).

INDIREKTNO AUTODIRIGOVANJE koristi se najčešće za navigaciju na velikim rastojanjima. Projektil u ovom slučaju prima informacije o svom polo-

žaju radio-električnim putem od niza prethodno postavljenih stanica na Zemlji, čime kontroliše svoju navigaciju. U stvari, ovakav metod ne može se koristiti u ratu, bar ne na celokupnoj putanji, tako da za njega postoji samo ograničeno interesovanje pri korišćenju projektila u mirnodopsko vreme. U ovom slučaju mnogo je povoljnije koristiti telekomandovanje, a indirektno autodirigovanje može poslužiti samo kao kontrolna ili sigurnosna mera.

APSOLUTNO AUTODIRIGOVANJE. Ovo obezbeđuje pilotiranje, stabilizaciju i navigaciju projektila prema određenom cilju isključivo korišćenjem uređaja koji se nalazi na projektilu, bez ikakve veze sa spoljašnjim svetom, osim u određenim slučajevima, kao što je, na primer, korišćenje astronomskih repera. U principu, ovakvi uređaji su zaštićeni od bilo kakvih protivmera neprijatelja. Otuda izvanredno interesovanje za korišćenje apsolutnog autodirigovanja u vojne svrhe.

Glavni deo sistema za apsolutno autodirigovanje zasniva se na primeni žiroskopa izvanredne preciznosti, čija se precesija sme menjati samo za zanemarljivo malu vrednost pri dugotrajnom funkcionisanju. Njihov princip se zasniva na primeni žiroskopskog sistema sa tri ose, odnosno na korišćenju tri žiroskopa orijentisana u tri pravca prostora, koji igraju ulogu akcelerometara. Njihova pokazivanja, dva puta integrisana, omogućuju u svakom momentu određivanje položaja projektila. Upoređivanje sa prethodno utvrđenim planom leta dozvoljava tada eventualno vršenje automatskih korekcija u pilotiranju i navigaciji. Ovaj metod se naziva *autodirigovanje prema inerciji*. Uz pomoć slobodnih žiroskopa i jednog hronometra koji konstantno drži griničko vreme, moguće je ostvariti *žiroskopsko upravljanje*. Upoređivanje pokazivanja slobodnog žiroskopa, koji je neprekidno postavljen paralelno liniji polova, sa žiroskopskim horizontom, određuje geografsku širinu položaja. Upoređivanje pokazivanja žiroskopa konstantno upravljenog prema tački prolećne ravnodnevice sa pokazivanjem magnetskog kompasa, omogućuje utvrđivanje lokalnog zvezdanog vremena, odnosno geografske dužine, poređenjem sa griničkim vremenom. Drugi jedan metod apsolutnog autodirigovanja je *astronomsko* ili *radio-astronomsko autodirigovanje*, koje se ostvaruje pomoću teleskopa ili radio-teleskopa, neprekidno upravljenih prema nekoj fiksnoj tački prostora. U slučaju teleskopa ova tačka može biti neka zvezda, a u slučaju radio-teleskopa, neki radio-izvor. Polazeći od ovog fiksnog pravca prema nekoj tački na nebeskoj sferi, upoređivanjem sa horizontom i sa pokazivanjem žiroskopskog kompasa, moguće je u ugrađenom računaru odrediti u svakom momentu astronomsku visinu i azimut, što je dovoljno za određivanje položaja projektila.



Sl. 44. — Shema hidrauličnog bloka za orijentaciju mlaznica rakete »Topaz« (»Topaze«), drugog stepena francuske rakete nosača »Dijamant«.

Sl. 45. — Principijelna shema sistema za stabilizaciju rakete na putanji.

STABILIZACIJA I PILOTIRANJE RAKETA NOSAČA

Nakon ispaljivanja, raketa za lansiranje satelita ili kosmičkih brodova neprekidno se prati sa Zemlje mnogobrojnim uređajima za lociranje, za telemetriju i za telekomandovanje, koji se nakon izlaska u orbitu koriste za dalje praćenje satelita. Raketa-nosač prima u principu, preko uređaja za telekomandovanje, sve informacije sa Zemlje koje se tiču njene putanje, a sa svoje strane obaveštava tehničare na Zemlji o svom stvarnom kretanju posredstvom telemetrije. Program celokupne misije, kao i trenutne informacije o stvarnom kretanju, šalju se u računar koji je u stanju da posredstvom telekomandi dovede do korekcija stvarne putanje, bilo automatski bilo prenoseći informacije na operatora koji može da proceni oportunost izvođenja korekcija. U stvari, na samoj raketi-nosaču smešten je u kasete za uređaje sistem za autodirigovanje, čija je uloga, s jedne strane, da neprekidno održava orijentaciju projektila prema planu misije (progresivno naginjanje prema horizontali a pod određenom uglom prema ekvatoru, u slučaju izvođenja nekog satelita u orbitu, na primer), a sa druge strane da vrši neprekidnu stabilizaciju rakete na unapred određenoj putanji. Jedna od tehnika koja se primenjuje sastoji se u sledećem: zavisno od tražene putanje, programator sadrži zapise tri ugla za orijentaciju zavisno od vremena i odašilje ove informacije, u određenim intervalima, u jedan žiroskopski sistem sa tri ose, koji preko elektronskog komandnog bloka odašilje naredbe za pokretanje hidrauličnom bloku za upravljanje (*sl.* 44), koji deluje na orijentaciju mlaznica.

Rad uređaja za pilotiranje dopunjuje se dejstvom stabilizatora na putanji. Čim dođe do poremećaja prouzrokovanog nekim nepredviđenim uzrokom (*sl.* 45), žiroskopski sistem detektuje ugaono skretanje i odašilje signal poremećaja u elektronski blok za komandovanje. Elektronski blok pretvara ovaj signal u naredbu hidrauličnom bloku, koji deluje na orijentaciju mlaznica.

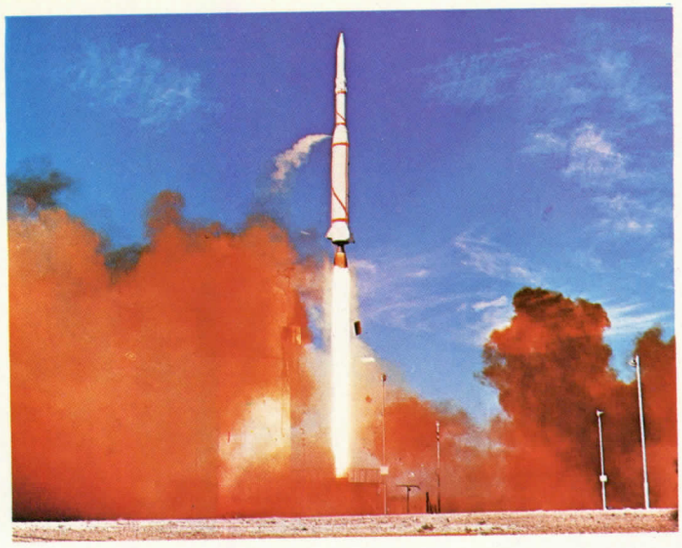
Sateliti i kosmički brodovi

ISTORIJAT

Čovek je oduvek maštao o tome da može napustiti Zemlju i istraživati Mesec i druge planete, čak i zvezde. Međutim, veoma dugo ova maštanja bila su mnogo više poetska i literarna nego tehnička. U dva romana puna fantazije, *Države i imperije Meseca* (1657) i *Komična istorija država na Suncu* (1662), Sirano de Beržerak (Cyrano de Bergerac) zamišlja mnogobrojne načine za osvajanje interplanetarnih prostora, među kojima pominje i rakete. Nešto bliže našem vremenu, francuski pisac Žil Vern, u knjigama: *Od Zemlje do Meseca* (1865) i *Putovanje oko Meseca* (1870), i engleski romansijer H. Dž. Vels (H. G. Wells), u knjizi *Prvi ljudi na Mesecu* (1901), podstiču maštu svojih savremenika astronautskim idejama. Nešto kasnije, pored istraživanja usmerenih na razvoj raketa, koja čine prvu etapu u osvajanju svemira, počinju da se objavljuju prve teorijske studije čisto astronautičkih problema. Godine 1920, u Francuskoj, Rober Esno-Pelteri (Robert Esnault-Pelterie) predlaže da se za pogon interplanetarnih brodova koristi nuklearna energija, čija je primena u to vreme bila takođe samo predmet teorijskih studija. U isto vreme u Sovjetskom Savezu Konstantin Ciolkovski izrađuje prvi projekat veštačkog satelita. Na sličnim studijama rade: u Sjedinjenim Državama Robert Hačings Godard (Robert Hutchings Goddard), a u Nemačkoj Herman Obert (Hermann Oberth) i Eugen Senger (Eugen Sänger). Posle II svetskog rata, izvanredno brzi razvoj tehnologije omogućava naslućivanje skorog nastupanja astronautičke ere. Umnožava se broj naučnih rasprava koje se odnose na veštačke satelite: A. Klark (A. Clarke, 1945), E. Esklangon (E. Esclangon, 1947—1948), R. Ingl (R. Engel, 1949) itd. Godine 1948, u Sjedinjenim Državama, ministar odbrane Džejms V. Forestal (James V. Forrestal) iznosi predlog programa lansiranja jednog veštačkog zemljinog satelita, a 1950, na inicijativu Aleksandra Ananofa (Alexandre Ananoff) održava se prvi međunarodni astronautički kongres.

Prvi zvaničan akt koji objavljuje uvođenje astonautike u tehnološku stvarnost savremenog sveta, potpisan je 29. jula 1955, kada Sjedinjene Države najavljuju svoju nameru da lansiraju jedan veštački zemljin satelit u vreme Međunarodne geofizičke godine, 1957—1958. Dva dana kasnije i Sovjetski Savez najavljuje svoj projekat.

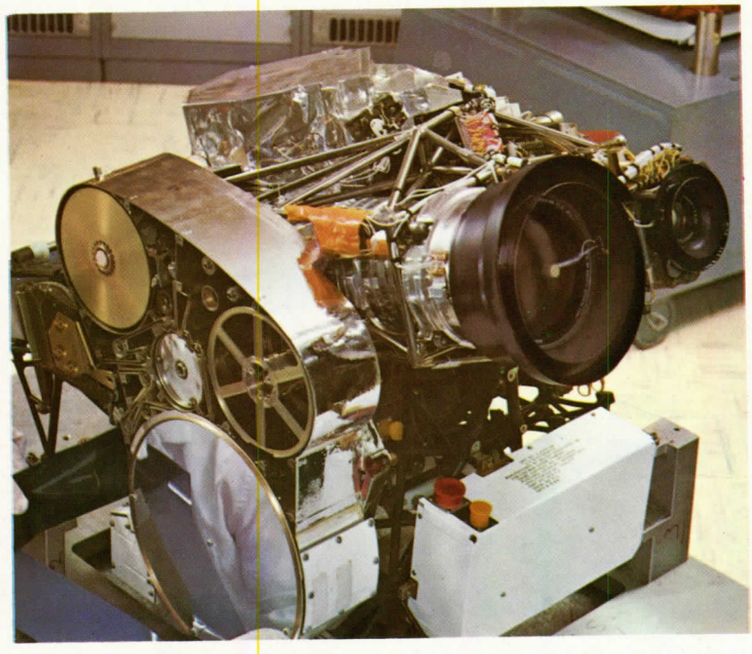
Od ovih istorijskih datuma osvajanje kosmosa postaje gotovo svakodnevna stvarnost. Stotine satelita i kosmičkih brodova svih vrsta već su lansirane u Sovjetskom Savezu, Sjedinjenim Državama i Francuskoj. Velika kosmička avantura započinje 4. oktobra 1957, kada je u Sovjetskom Savezu lansiran prvi satelit u svetu — »Sputnjik I«, koji je u isto vreme i prvi satelit koji nosi živo biće, psa Lajku. Godine 1958. Amerikanci lansiraju svoj prvi satelit »Eksplorer I« (»Explorer I«), nazvan »Alfa LVIII« (»Alpha LVIII«). Odmah zatim pogledi se upravljaju na Mesec, nebesko telo najbliže Zemlji, i, 1959, Sovjetski Savez je ponovo pozornica tri svetske premijere: kosmička sonda »Lunik I«,



Lansiranje nosača satelita »Dijamant«.



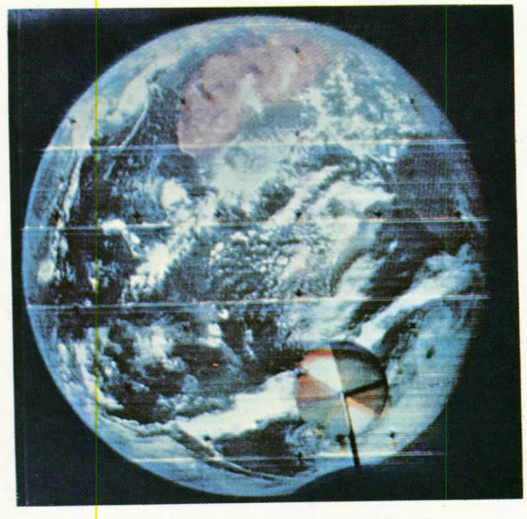
»Vostok« — tip kosmičkog broda sa kakvog su poleteli u kosmos prvi ruski kosmonauti.



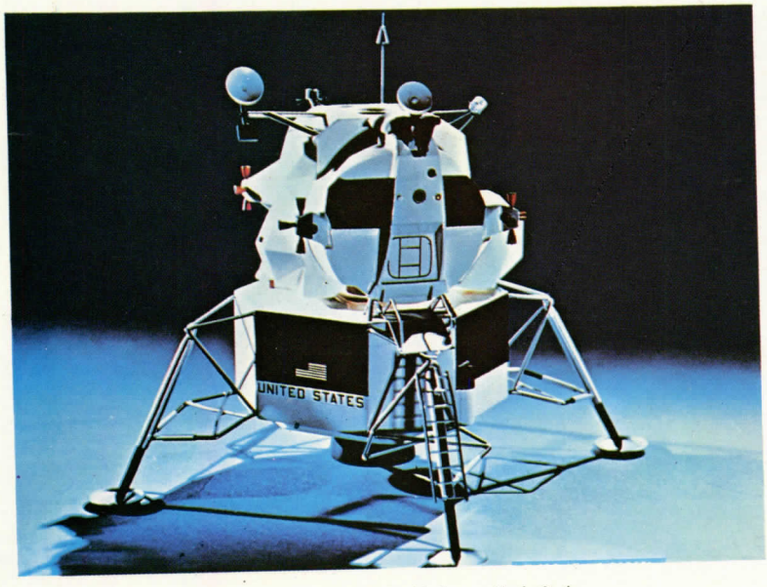
Fotografski uređaj (automatsko snimanje i razvijanje) Mesečevih satelita »Lunar Orbiter«.



Astronaut Vajt izvan kabine »Gemi-nija IV« u beztežinskom prostoru.



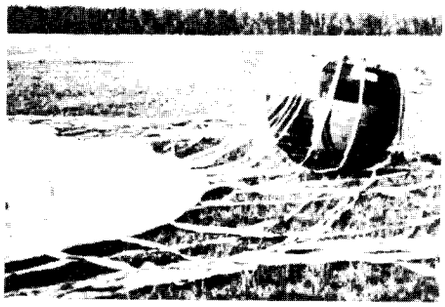
Zemlja snimljena sa satelita »Dodž«.

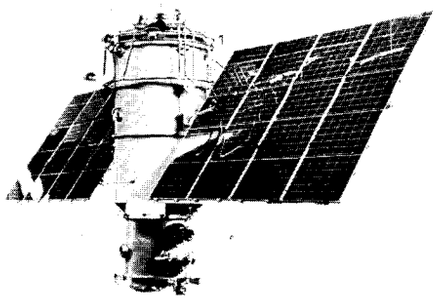


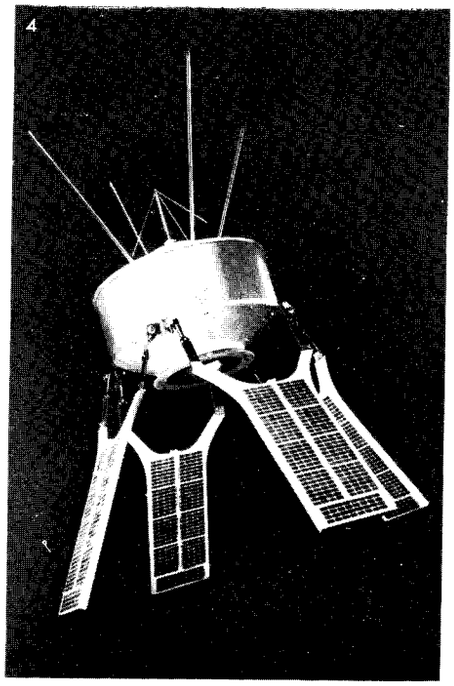
Mesečev modul za vezu između vasionskog broda »Apolo« i Meseca.

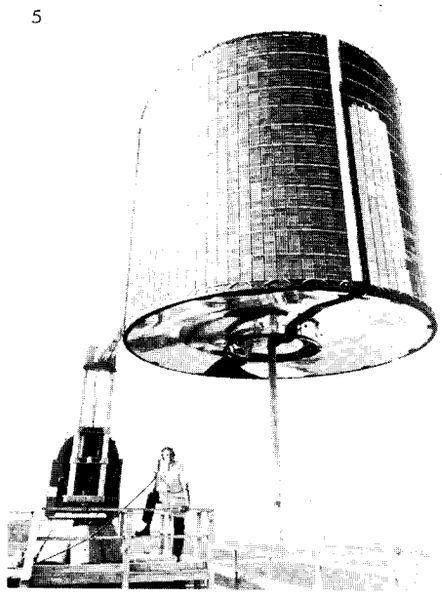
Fot. S. C. A., Larousse, Keystone, Kodak, U. S. Air Force, N. A. S. A.











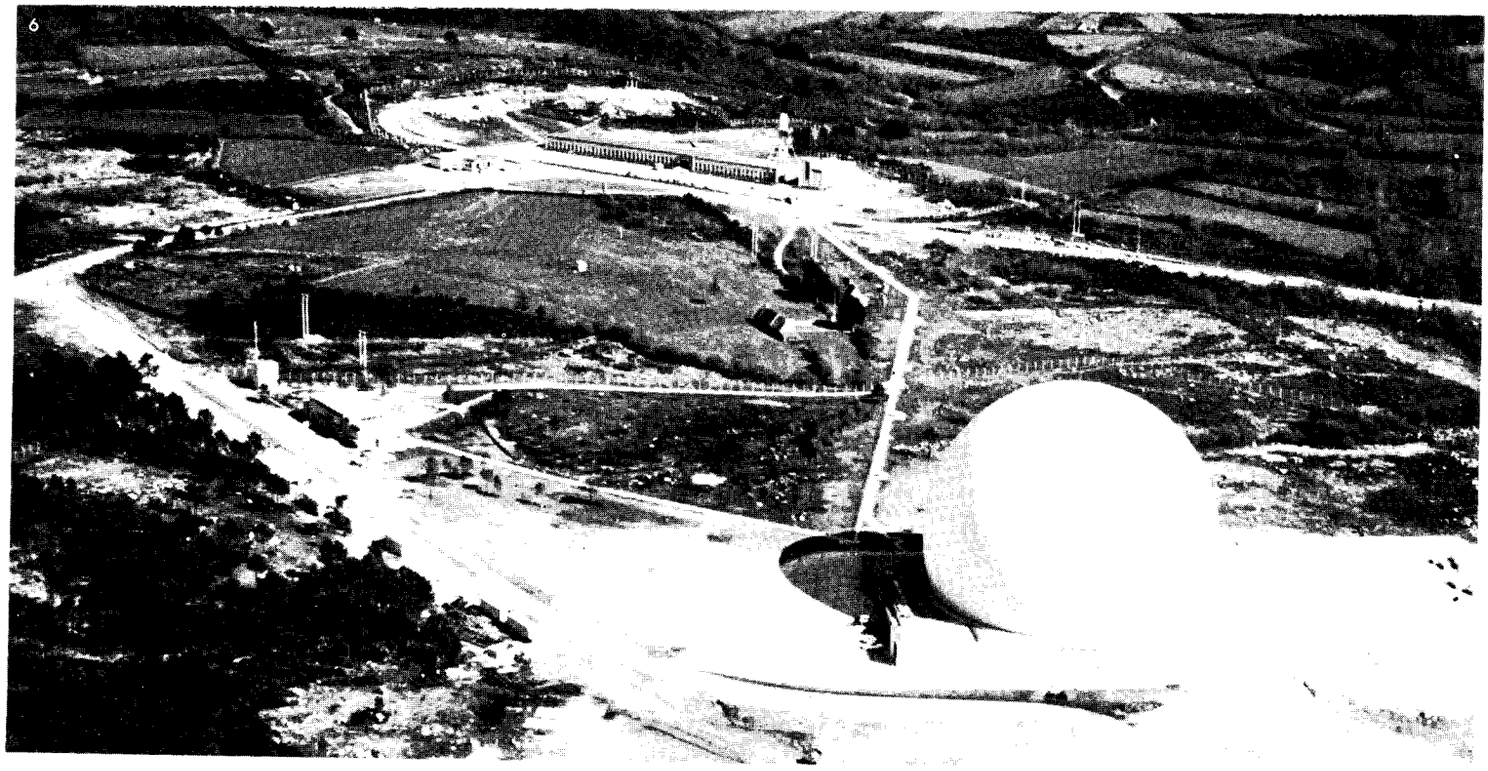
PRIMENE
VASIONSKIH ISTRAŽIVANJA

Astronomija: 1. Fotografija tla planete Mars snimljena pomoću vasionske sonde »Mariner IV«; 2. Pokušaj izbacivanja kapsule na planetu Veneru.

Meteorologija: 3. Meteorološki satelit »Kosmos 114«.

Geodezija: 4. Geodetski satelit »Dijadema« konstruisan na Doplerovom principu i na upotrebi lasera.

Telekomunikacije: Stacionirani satelit »Jutarnja ptica« (»Early Bird«); 6. Telekomunikaciona stanica *via* satelit u Plemer-Bodu.



Fot. U. S. I. S., A. P. N., Matra, X, A. Perceval.

lansirana 2. januara, promašuje svoj cilj, ali postaje prvi veštački planetoid Sunčevog sistema; »Lunik II«, lansiran 12. septembra, razbija se o površinu Meseca 14. istog meseca; dok 6. oktobra »Lunik III« šalje na Zemlju prve fotografije skrivene strane našeg satelita. 11. juna 1960. Amerikanci osvajaju rekord u odašiljanju signala sa velikih udaljenosti; njihov »Pionir V« (»Pioneer V«) šalje informacije sa udaljenosti od 29 miliona kilometara.

Od 1960. eksperimentalna istraživanja orijentišu se na rekuperaciju satelita i time pripremaju teren za povratak astronauta. 12. avgusta Amerikanci vraćaju na Zemlju kapsulu »Diskaverera XIII« (»Discoverer XIII«), a 19. avgusta vraća se na Zemlju »Sputnjik V«, sa svojim putnicima koje čine dva psa. 12. aprila 1961. u Sovjetskom Savezu je lansiran i vraćen na Zemlju prvi astronaut, Jurij Gagarin, pošto je kružio po orbiti oko Zemlje u »Vastoku I«. Amerikanci ponavljaju isti podvig sa Džonom Glenom (John Glenn) i kosmičkim brodom »Frendšip VII« (»Friendship VII«), 20. februara 1962.

10. jula 1962. američki satelit »Telstar I« (»Telstar I«) omogućava prvu televizijsku vezu između Sjedinjenih Država i Evrope, a 27. avgusta raketa »Atlas-Edžina B« (»Atlas-Agena B«) lansira u pravcu Venere američku sondu »Mariner II«, koja stiže u blizinu Venere sredinom decembra. Prva žena kosmonaut, Valentina Tereškova, lansirana je iz Sovjetskog Saveza 16. juna 1963. vasionskim brodom »Vastok VI«, dok 12. oktobra 1964. tri čoveka lete istovremeno u kosmos sovjetskim vasionskim brodom »Vashod I«.

Čine se dalji koraci ka osvajanju planeta i u Sjedinjenim Državama i u Sovjetskom Savezu. 28. novembra 1964. američka sonda »Mariner IV« snima prve fotografije planete Marsa, a 27. februara 1965. sovjetska sonda »Venus IV« prolazi na 24 000 km od planete Venere i izbacuje prema njoj jedan projektil.

Godine 1965. prvi ljudi napuštaju kosmičke kapsule i lebde u kosmosu. Rus Leonov to čini iz »Vashoda II«, 18. marta, a Amerikanac Vajt (White) 3. juna, iz »Džeminija IV« (»Gemini IV«). Iste godine, 26. novembra, u Francuskoj je lansiran prvi satelit A-1, uz pomoć francuske rakete »Dijamant« (»Diamant«), a 6. decembra satelit Fr-1, koji je lansirala američka raketa »Skaut (»Scout«).

Godine 1966. počinje prva faza osvajanja Meseca. I Sovjetski Savez i Sjedinjene Države uspevaju da ubace satelite u Mesečevu orbitu i da prve laboratorije »meko« spuste na površinu Meseca.

* * *

Godine 1968. dolazi do prvih spektakularnih podviga u osvajanju Meseca. Od 15. do 21. septembra sovjetska kosmička sonda »Zond-5« obleće oko Meseca na rastojanju od 1 950 km, vraća se u Zemljinu orbitu i spušta bez oštećenja u Indijski okean. Iste godine američki program za osvajanje Meseca »Apolo« (»Apollo«), na čijoj realizaciji u jednom momentu radi 350 000 stručnjaka, beleži još spektakularniji uspeh. Kosmički brod »Apolo-8«, sa tri kosmonauta, lansiran 21. decembra raketom nosačem »Saturn-5«, kruži po orbiti oko Meseca i bezbedno se spušta na Tihi okean 27. decembra. Kosmonauti u njemu: F. Bormen (F. Borman), Dž. Lavel (J. Lovell) i V. Enders (W. Anders), prvi su ljudi koji sa rastojanja od 110 km posmatraju površinu Meseca. Sledeći kosmički brodovi iz serije »Apolo« pripremaju konačno iskrcavanje čoveka na Mesec. »Apolo-9«, takođe sa tri kosmonauta, kruži deset dana u Zemljinoj orbiti isprobavajući specijalni modul za iskrcavanje na Mesec. »Apolo-10«, od 18. do 26. maja 1969. ponavlja misiju »Apola-8«. Ovoga puta, međutim, dvojica kosmonauta, u Mesečevoj orbiti, prelaze u mesečev modul i u njemu prilaze površini Meseca na svega 15 km.

Najzad, 21. jula 1969. dolazi do ostvarenja vekovnog čovekovog sna, prvi čovek zakoračuje na neko drugo nebesko telo. Ovaj istorijski podvig izvodi posada američkog vasionskog broda »Apolo-11«: Nil Armstrong (Neil Armstrong), Majkl Kolins (Michael Collins) i Edvin Oldrin (Edwin Aldrin), od 16. do 24. jula. Dvadesetog jula u 20.17 po Griniču, kosmonauti Armstrong i Oldrin, meko se spuštaju na površinu Meseca u mesečevom modulu »Orao« (»Eagle«); 21. jula, u 02.56 po Griniču, Nil Armstrong prvi zakoračuje na tlo Meseca u predelu Mora tišine i izjavljuje: »Ovo je mali korak za čoveka, ali džinovski skok za čovečanstvo«. Ovaj istorijski trenutak posmatraju milioni ljudi na Zemlji, na svim kontinentima, posredstvom telekomunikacionih satelita. Astronauti Armstrong i Oldrin, koji izlazi iz modula nešto kasnije, prikupljaju 30 kg uzoraka mesečevog tla i ostavljaju na Mesecu naučne instrumente. U 17.35 po Griniču »Orao« uzleće sa Meseca i spaja se sa matičnim brodom, kojim se astronauti vraćaju na Zemlju 24. jula.

Istraživanja Meseca se nastavljaju. Misija »Apolo-12«, od 14. do 24. novembra 1969, dovodi na Mesec još dva astronauta, Č. Konrada (C. Conrad) i A. Bina (A. Bean). Oni se iskrcavaju u Okean bura, u neposrednoj blizini američke kosmičke sonde »Servejer-3«, koja se na Mesecu nalazi od 1967. godine, demontiraju neke delove ove sonde, postavljaju naučne instrumente i donose na Zemlju nove uzorke mesečevog tla. Misija »Apola-13«, lansiranog 11. aprila 1970, trpi neuspeh usled kratkog spoja, izazvanog na sistemu za napajanje kiseonikom, koji dovodi do požara i eksplozije na servisnom modulu, dok se brod nalazio 300 000 km od Zemlje. Nezgoda na »Apolu-13«, koja se posle niza dramatičnih okolnosti srećno završila, pokazala je ipak da je spasavanje u kosmosu moguće. Sovjetski program za istraživanje Meseca suštinski se razlikuje u koncepciji od američkog, pošto se zasniva na misijama automatskih kosmičkih stanica bez posade. Oktobra 1970. godine sovjetska automatska stanica »Luna-16« meko se spušta na površinu Meseca, prikuplja izvesnu količinu uzorka tla, uzleće sa površine Meseca i donosi uzorke na Zemlju. Sve ovo obavlja se telekomandovanjem.

***) Period 1968—1970. je prevodiočeva dopuna.

Principi lansiranja veštačkih satelita

OPŠTE. Davno već, izučavajući astronomiju i opšte zakone mehanike, ljudi su došli do osnovnih uzroka koji dovode do obrtanja satelita oko planeta, na primer, Meseca oko Zemlje, i upoznali osnovne zakone koji regulišu ovo kretanje. Podvrgavajući se univerzalnim zakonima koje je otkrio Njutn a generalisao Ajnštajn, satelit se obrće oko planete brzinom koja, zavisno od rastojanja satelita od planete, u potpunosti kompenzuje privlačnu silu date planete centrifugalnom silom istog intenziteta a suprotnog smera. Tako je Mesec, koji se obrće oko Zemlje na srednjem rastojanju od 384 000 km, izložen privlačnoj sili Zemlje u jačini od oko $2{,}1 \cdot 10^{17}$ kg, što uslovljava postojanje centrifugalne sile istog intenziteta kojoj odgovara brzina obrtanja Meseca od 1 km/s. Veštački sateliti koji se obrću oko Zemlje moraju zadovoljiti isti ovaj uslov u pogledu brzine obrtanja, a zavisno od svog rastojanja od centra Zemlje. Međutim, ovaj uslov nije i dovoljan.

USLOVI ZA LANSIRANJE SATELITA

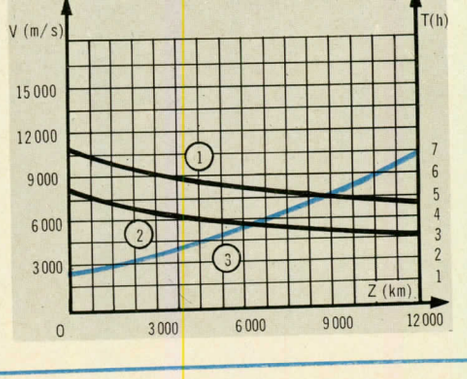
Brzina je osnovni faktor pri lansiranju nekog tela u kosmos. Proračuni pokazuju da svaki pokretan objekt koji napušta Zemlju brzinom bar jednakom 11,2 km/s, treba teorijski da nastavi da se udaljava u beskonačnost. Takav pokretni objekt se definitivno oslobađa delovanja zemljine teže, otuda termin *brzina oslobađanja*[15]), uobičajen za ovu karakterističnu veličinu. Lansiran brzinom od 11,2 km/s, pokretni objekt opisuje jednu granu parabole čija je žiža u centru Zemlje. Ako je lansiran brzinom većom od ove, pokretni objekt opisuje jednu granu hiperbole. Za brzine manje od 11,2 km/s putanja objekta je elipsa čija je jedna od žiža u centru Zemlje. Postizanje određene brzine nije, međutim, dovoljan uslov za satelizaciju nekog objekta. Moraju biti zadovoljena još dva dodatna kriterijuma: tačka u prostoru u kojoj je ova brzina bila saopštena satelitu i smer ove brzine. Nije dovoljno, u stvari, kao što je zamišljao Žil Vern, ostvariti neki moćan katapult. Ako se čak izuzme rizik od dezintegracije satelita u momentu lansiranja i od izgaranja u atmosferi, zakoni mehanike pokazuju da bi se ovaj pokretni objekt razbio o površinu Zemlje pre nego što bi izveo puni obrt oko nje. U stvari, za sve brzine lansiranja manje od 11,2 km/s eliptična putanja po kojoj se objekt kreće, obavezno ponovo prolazi kroz tačku u kojoj mu je bila saopštena ova početna brzina. Nije, dakle, moguće ubaciti neki satelit u orbitu oko Zemlje ako on ne raspolaže autopropulzijom koja prestaje da deluje tek izvan granica gustih slojeva atmosfere.

Ako satelit ponovo prođe kroz tačku u kojoj je bio lansiran, on u njoj ponovo ima isti intenzitet i smer brzine kao i prilikom lansiranja. Pošto elipsa koju opisuje ima žižu u centru Zemlje, lako je uveriti se da se njegova orbita definiše u prostoru pravcem brzine lansiranja u odnosu na centar Zemlje. Pošto se ni u kom slučaju ne sme dozvoliti da satelit u svom kruženju naiđe bilo na Zemljinu kuglu bilo na guste slojeve njene atmosfere, teorijski su dopustivi samo oni pravci brzine koji su upravni na pravac Zemljinog poluprečnika koji prolazi kroz tačku lansiranja. Lansiranje pod drugim uglovima, dakle, nije moguće.

JEDNAČINA KRUŽNE ORBITE

Za određenu visinu postoji samo jedna određena brzina koja dovodi do kružne orbite veštačkog satelita *(sl. 46)*. Ako je R poluprečnik Zemljine kugle (približno jednak 6 350 km), a z visina orbite, *orbitalna brzina* V_z satelita koji opisuje kružnu orbitu (najjednostavniji teorijski slučaj), iznosi:

[15]) Brzina oslobađanja za bilo koju planetu data je formulom $V = \sqrt{2gR}$, gde je g — intenzitet sile teže, a R — poluprečnik planete.



Sl. 46. Satelit u kružnoj orbiti.

$$V_z = R\sqrt{\frac{g_0}{R+z}}$$

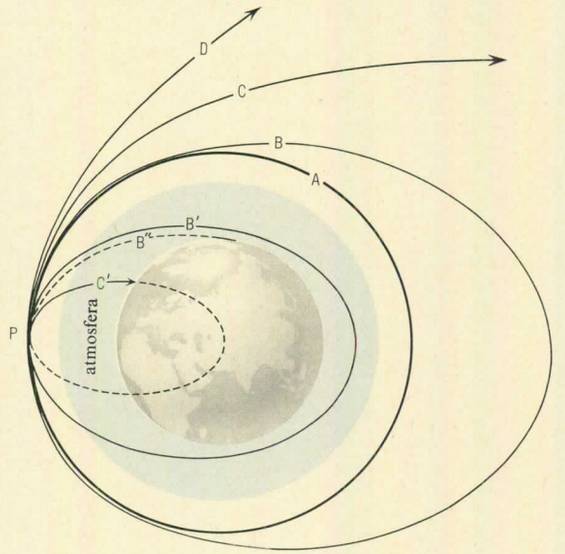
U ovoj formuli g_0 je intenzitet teže na površini Zemlje. Treba zapaziti da ova veličina, koja karakteriše silu privlačenja, varira sa visinom po zakonu $g_z = g_0\left(\frac{R}{R+z}\right)^2$. Na kružnoj orbiti vreme T_z jednog obrta iznosi:

$$T_z = \frac{2}{R}\sqrt{\frac{(R+z)^3}{g_0}}$$

Na primer, za visinu od 400 km orbitalna brzina iznosi oko 7,65 km/s. Ako pretpostavimo da se sa iste visine i pri istim uslovima, ali različitom brzinom *(sl.* 47), lansira neki drugi satelit, može doći do jednog od sledeća dva slučaja.

• Ako je brzina pri lansiranju veća od orbitalne brzine, ali u isto vreme manja od brzine oslobađanja, satelit opisuje eliptičnu orbitu koja je u svim tačkama izvan kružne orbite, i čiji je ekscentricitet utoliko veći, ukoliko je veća brzina pri lansiranju. Tačka lansiranja predstavlja tada perigej orbite. Apogej je utoliko udaljeniji, ukoliko je brzina veća, i, u graničnom slučaju, kada brzina dostigne brzinu oslobađanja, orbita postaje parabolična. Preko ove brzine orbita je hiperbolična.

• Ako je brzina pri lansiranju manja od orbitalne brzine, orbita je elipsa koja se nalazi unutar kružne orbite, a tačka lansiranja predstavlja apogej orbite. Pod ovim uslovima postoji rizik da satelit, pri svom prvom obrtaju, ili ponovo uđe u guste slojeve atmosfere, ili, čak, da se sudari sa površinom Zemlje. Ovo je tehnika koja se primenjuje u slučajevima podorbitalnih letova. Današnji sateliti uvek se lansiraju brzinom koja je bar jednaka orbitalnoj brzini koja daje kružnu orbitu. Utrošak energije, potreban da se satelitu saopšti veća brzina na orbiti bližoj Zemlji, uvek je manji od utroška potrebnog da se satelit popne na višu orbitu, pa makar se sa nje lansirao i manjom brzinom.



Sl. 47. — Razne orbite satelita u tački P u zavisnosti od brzine pri lansiranju V; A — kružna orbita (brzina V_A). $V > V_A$; B — eliptična orbita (P = perigej); C — parabolična putanja; D — hiperbolična putanja. $V < V_A$; B' i C' — hipotetične eliptične orbite (P = apogej), podorbitalni let; B'' — stvarna putanja satelita B', uzimajući u obzir delovanje usporavanja u atmosferi.

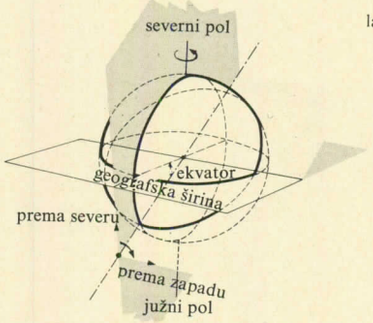
POLOŽAJ ORBITE U ZAVISNOSTI OD GEOGRAFSKE ŠIRINE LANSIRANJA

RAVAN ORBITE. Orbita nekog veštačkog satelita Zemlje uvek se nalazi u ravni koja prolazi kroz središte Zemlje. Postoji, dakle, beskonačno veliki broj ravni u kojima se mogu nalaziti orbite satelita. U svakoj od ovih ravni moguće su sve forme orbita o kojima je već bilo govora, i to u oba smera rotacije. Na taj način moguć je veliki broj varijacija veštačkih satelita čije se mogućnosti lansiranja menjaju u zavisnosti od geografske širine.

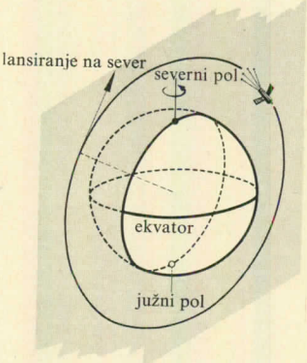
LANSIRANJE IZ TAČKE NA PROIZVOLJNOJ GEOGRAFSKOJ ŠIRINI. Ako se tačka lansiranja satelita nalazi na nekoj proizvoljnoj geografskoj širini koja nije jednaka nuli *(sl.* 48), postoji bezbroj ravni u kojima se orbita može nalaziti; to su sve one ravni koje prolaze kroz pravac koji spaja tačku lansiranja sa središtem Zemlje. Ova familija ravni čini simetrične kvadrante, pa je dovoljno ispitati karakteristike jednog od njih da bi se došlo do karakteristika čitave familije. Lansiranje u pravcu severa postavlja orbitu u ravan koja sadrži oba Zemljina pola *(sl.* 49). Takav *polarni satelit* sa svoje orbite može osmatrati celokupnu površinu Zemlje, prilikom svog obrtanja oko nje, usled rotacije same Zemljine kugle. Na osnovu prostorne geometrije moguće je pokazati da se ovaj tip satelita može ubaciti u orbitu sa bilo koje geografske širine. Ako se neki drugi sateliti lansiraju rigorozno iz iste tačke, ali tako da im je smer brzine upravljen više na zapad, ravni njihovih orbita biće postavljene pod odgovarajućim uglom u odnosu na duž koja spaja polove. U graničnom slučaju, kada se lansiranje vrši rigorozno na zapad *(sl.* 50), ravan orbite nagnuta je u odnosu na ekvatorijalnu ravan pod uglom koji je jednak geografskoj širini tačke lansiranja. Sa neke tačke na određenoj geografskoj širini, koja nije jednaka nuli, moguće je, dakle, lansirati satelite samo u orbitalnim ravnima koje sa ekvatorijalnom ravni čine ugao čija se vrednost nalazi između vrednosti geografske širine tačke lansiranja i 90°, usled toga što je orbitalna ravan u potpunosti određena vektorom brzine u momentu lansiranja.

LANSIRANJE IZ POLARNIH REGIONA. Iz regiona polova moguće je, dakle, lansirati samo satelite čije orbitalne ravni čine sa ekvatorijalnom ravni ugao od oko 90°; odnosno moguće je lansirati samo polarne ili kvazi-polarne satelite. Međutim, ovakvi sateliti mogu se lansirati sa bilo koje geografske širine, pod mnogo povoljnijim uslovima. Stoga je interesovanje polarne baze za lansiranje satelita veoma ograničeno, što se nikako ne može reći za meteorološke, aerološke ili slične raketne sonde. Jedino tačno sa pola moguće je lansirati polarne satelite, a sa energetskog gledišta ovo je nepovoljno, pošto je komponenta Zemljine rotacije jednaka nuli.

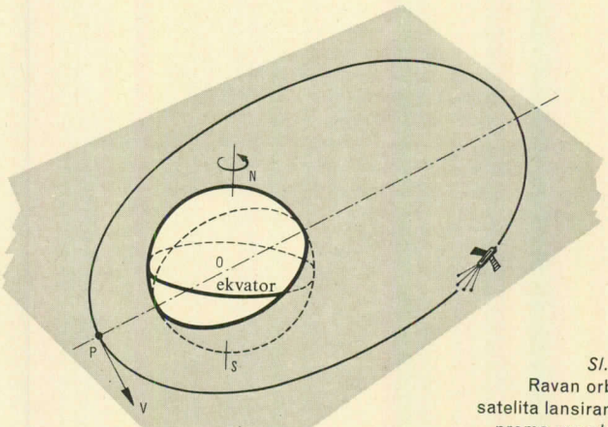
LANSIRANJE IZ EKVATORIJALNIH REGIONA. Lansiranje satelita iz baza koje se nalaze u blizini ekvatora znatno je interesantnije, pošto se može izvršiti pod bilo kojim uglom u odnosu na ekvatorijalnu ravan. Iz ekvatorijalnih lansirnih baza lako je ubaciti satelite u *ekvatorijalne orbite (sl.* 51), što je naročito interesantno i što nije moguće postići direktno ni sa koje druge tačke Zemljine



Sl. 48. — Ravni mogućih orbita iz tačke lansiranja P, čija geografska širina nije nula.



Sl. 49. — Lansiranje prema severu sa proizvoljne geografske širine: slučaj *polarnog satelita.*



Sl. 50. Ravan orbite satelita lansiranog prema zapadu iz neke tačke čija geografska širina nije nula.

kugle. U stvari, uvek je moguće transformisati jednu orbitu, nagnutu prema ekvatoru pod određenim uglom, u ekvatorijalnu orbitu. Dovoljno je saopštiti satelitu, u momentu njegovog prolaza kroz ekvatorijalnu ravan, takav impuls koji će slaganjem sa impulsom od trenutne vrednosti brzine satelita dati rezultantnu brzinu u ekvatorijalnoj ravni. U praksi, za ovakav manevar potrebno je utrošiti znatnu količinu energije.

OBLIK ORBITA

Veštački sateliti koji se danas lansiraju, kruže najčešće na malim visinama u odnosu na Zemljin poluprečnik. Neki od njih su čak ubačeni u orbite koje se nalaze veoma blizu prvih atmosferskih slojeva. Određivanje oblika i tačnih karakteristika ovakvih orbita veoma je teško, ali zato veoma interesantno sa naučnog stanovišta.

UTICAJ ATMOSFERE. Ubacivanje nekog satelita u orbitu vrši se obavezno izvan granica atmosfere. Međutim, ova konstatacija je relativna, pošto nije reč o nekom naglom diskontinuitetu. U stvari, sateliti koji kruže na niskim orbitama izloženi su kočenju koje je vrlo neznatno, ali ne i zanemarljivo, i koje dolazi usled delovanja retkih gasovitih čestica koje su još prisutne na ovim visinama. Ovo kočenje deformiše progresivno i ravnomerno orbitu satelita. Nakon jednog obrtaja satelit ne prođe ponovo baš tačno kroz istu tačku, već nešto izgubi u visini. Na taj način, umesto da opisuje zatvorenu orbitu, on se kreće po spirali koja konvergira prema središtu Zemlje, tako da se posle određenog broja obrtaja nađe u guščim slojevima atmosfere gde sagori.

UTICAJ ZEMLJE. Sva prethodna teorijska razmatranja oblika orbita izvedena su iz zakona mehanike, i to, pre svega, iz Keplerovih zakona. U stvarnosti, ovi se zakoni moraju korigovati, često u znatnoj meri, usled toga što mase u pitanju nisu materijalne tačke. Ako se neki satelit i može smatrati masom bez dimenzija, u odnosu na dimenzije Zemlje, to sigurno ne važi i za Zemlju. Stoga se orbitalne putanje ne mogu detaljno izučavati na bazi pretpostavke da je celokupna masa Zemlje koncentrisana u jednoj tački. Orbita nekog satelita se na taj način modifikuje usled neravnomernog rasporeda masa na površini Zemlje. Ova činjenica sa druge strane dozvoljava da se na osnovu izučavanja putanja satelita dođe do zaključaka o obliku Zemlje.

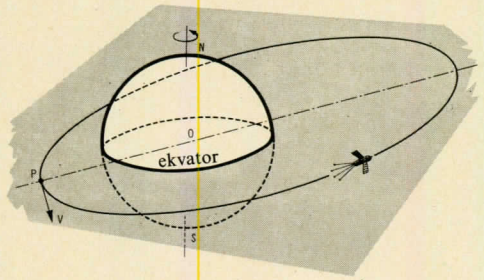
UTICAJ OSTALIH NEBESKIH TELA. Sunce i Mesec ne nalaze se na takvim rastojanjima koja bi isključila njihovo privlačno delovanje na Zemljine satelite. Njihovo delovanje dovodi do modifikovanja orbita čak i onih satelita koji kruže na malim rastojanjima od Zemlje. Ovaj uticaj može biti veoma znatan u slučaju satelita koji kruže po eliptičnim orbitama velikog ekscentriciteta. Kada se neki satelit kreće po nekoj ovakvoj orbiti prema svom apogeju, i istovremeno prema Mesecu, na njega Mesec deluje znatnom privlačnom silom koja progresivno povećava brzinu satelita, pa time i visinu njegovog apogeja. Na isti način povećaće se i rastojanje njegovog perigeja od Zemlje *(sl.* 52). Tako može doći do jednog neočekivanog fenomena ako satelit prolazi u blizini Meseca *(sl.* 53). U ovom slučaju, satelit može biti izložen dodatnom impulsu, tako da mu brzina, iako nije u potpunosti privučen prirodnim Zemljinim satelitom — u kom slučaju bi se razbio o njegovu površinu — postaje veća od brzine oslobađanja na visini na kojoj se kreće. Tada on napušta svoju orbitu oko Zemlje i postaje veštački planetoid Sunčevog sistema. Ovo se, u stvari, i dogodilo američkom satelitu »Rejndžer V« (»Ranger V«). Videti sl. 52 i 53.

Nekoliko navedenih uzroka koji dovode do modifikovanja orbita veštačkih satelita ili putanja kosmičkih brodova, poslužiće kao primer opasnosti sa kojima se mogu sretati kosmičke letilice na svojim putovanjima. Sa druge strane, ove modifikacije orbita dovode do proširenja čovekovih saznanja o nebeskoj mehanici i o osnovnim karakteristikama nebeskih tela. Tako je, npr., izučavanje kretanja satelita po orbitama sa velikim ekscentricitetom omogućilo da se shvate uzroci koji dovode do toga da se svi današnji sateliti kreću po svojim orbitama u prelaznom režimu, koji će postati kvazi-ustaljen tek nakon mnogo godina, i to samo u slučaju da se ovi kreću po orbitama malog ekscentriciteta.

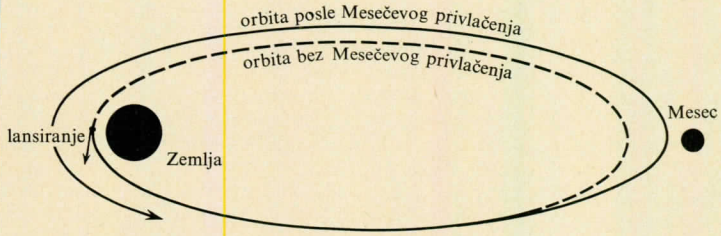
PROMENE ORBITA

Ono što čine prirodni uzroci, pokušava da uradi i čovek menjajući orbite satelita, i u tome uspeva. Ovakve promene orbita predstavljaju prve korake budućeg saobraćaja u kosmosu i uvod u tehnike budućnosti. Promena orbite zahteva u svakom slučaju izvestan utrošak energije, pošto ovakav manevar teži da poremeti neko stanje ravnoteže. Promene orbita počele su da se izvode tek onda kada je bilo omogućeno izbacivanje satelita velike mase. Zavisno od smera brzine koji se daje satelitu razlikuju se tri slučaja promene orbite: *kočenje paralelno pravcu kretanja, ubrzavanje paralelno pravcu kretanja* i *promena orbitalne ravni*.

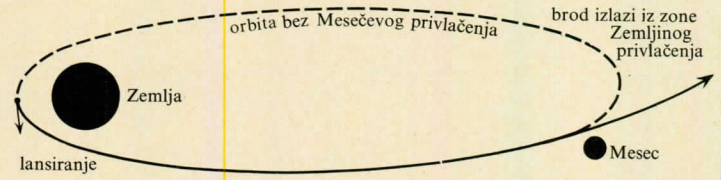
KOČENJE PARALELNO PRAVCU KRETANJA. Progresivno ili naglo smanjenje brzine satelita u orbiti, bez obzira na uzroke, uvek dovodi do prelaska satelita na neku drugu orbitu bližu Zemlji. Na prvi pogled ovo izgleda paradoksalno, pošto je brzina kruženja satelita po orbiti utoliko veća ukoliko je orbita bliža Zemlji. U stvari, kratak impuls kočenja usporava satelit na njegovoj



Sl. 51. Lansiranje satelita prema zapadu sa ekvatora (ekvatorijalni satelit).



Sl. 52. — Povećavanje ekscentriciteta orbite satelita usled delovanja Mesečeve teže.



Sl. 53. — Delovanje Mesečeve teže na Zemljin satelit impulsom koji ga izvodi iz zone delovanja zemljine teže.

prvobitnoj orbiti, tj. umanjuje intenzitet centrifugalne sile kojoj je izložen, tako da ga sila teže sve više privlači Zemlji. Tokom ove faze spuštanja, privlačna sila zemljine teže, koja postaje sve veća, daje satelitu novo ubrzanje. Njegova brzina tako neprekidno raste pri spuštanju, sve do momenta kada se nađe na novoj orbiti, na kojoj se opet privlačna sila teže i centrifugalna sila nađu u ravnoteži, pošto je brzina satelita na njoj veća od brzine na početnoj orbiti.

Sve što je rečeno važi samo za kratkotrajna kočenja malog intenziteta. U stvari, ako je impuls kočenja kratak ali intenzivan, ubrzavajuće dejstvo privlačne sile zemljine teže menja smer vektora brzine satelita, što dovodi do deformacije orbite (promene vrednosti njenog ekscentriciteta). Ukoliko je perigej početne orbite veoma udaljen od Zemlje, može doći do uspostavljanja ponovne ravnoteže na nekoj drugoj orbiti. Sa druge strane, kod gotovo svih današnjih satelita ovakav impuls približio bi perigej orbite Zemlji tako da bi se ovaj našao unutar gustih slojeva atmosfere. Upravo ovaj metod se i koristi za vraćanje satelita na Zemlju. Ako se satelit nalazi na kružnoj putanji, aktiviranje raketa za kočenje moguće je izvršiti u bilo kojoj tački putanje, a potrošnja propergola potrebna za izvođenje povratka na Zemlju uvek je ista. Ako se satelit nalazi na nekoj orbiti velikog ekscentriciteta, opet je moguće aktivirati rakete u bilo kom položaju, ali je potrošnja energije, ako se to uradi u perigeju, mnogo veća nego u apogeju. U stvari, na osnovu Keplerovog zakona o površinama, koji reguliše kretanje nebeskih tela, brzina satelita u njegovom perigeju mnogo je veća od brzine u apogeju. Za istu vrednost umanjenja brzine, ako se ovo izvrši u apogeju, doći će do znatno veće modifikacije forme orbite nego u perigeju. Iz ovoga proizlazi da se, za unapred određen ugao povraćaja satelita u atmosferu, veličina impulsa koji mu se saopštava bira zavisno od oblika njegove orbite i od tačke na kojoj se vrši kočenje. Ako se još uzmu u obzir i uslovi progresivnog kočenja satelita koje vrši atmosfera, teorijski se mogu odrediti uslovi pod kojima će doći do povratka kosmičkih brodova na Zemlju.

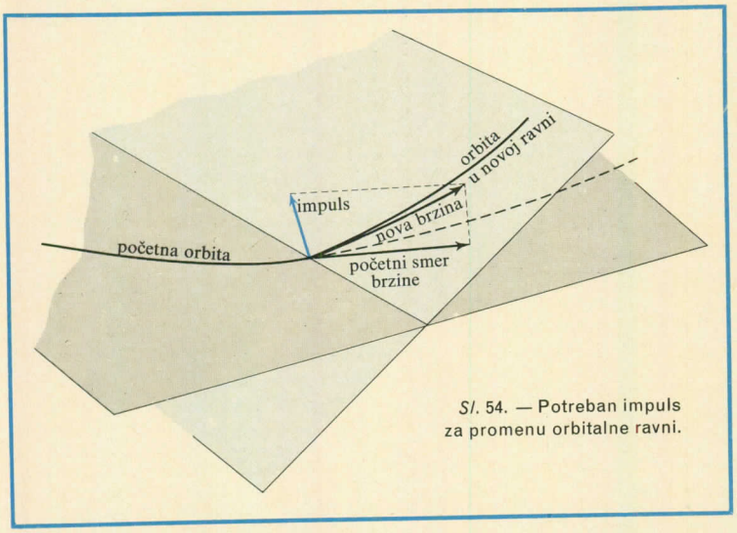
UBRZAVANJE PARALELNO PRAVCU KRETANJA. Reč je o manevru koji je po svemu identičan sa prethodnim, ali suprotnog dejstva. Svako povećavanje brzine satelita u nekoj određenoj orbiti povećava intenzitet centrifugalne sile i udaljava satelit od Zemlje, postavljajući ga u novu orbitu, udaljenu od Zemlje, čiji se ekscentricitet takođe razlikuje od ekscentriciteta prvobitne orbite. Očigledno je da je u ovoj orbiti brzina satelita manja nego u prethodnoj. Energija koja odgovara razlici između ove nove brzine i brzine koju je satelit imao na kraju primene ubrzavajućeg impulsa jednaka je energiji potrebnoj za kompenzaciju Zemljinog privlačenja tokom prelaska na orbitu udaljeniju od Zemlje.

U slučaju ekvatorijalnih satelita, manevar promene orbite igra veoma važnu ulogu, pošto može dovesti do transformacije nekog satelita koji kruži na relativno

bliskim rastojanjima od Zemlje u *sinhroni satelit*, nazvan još i *nepokretni satelit* ili *stacionarni satelit*. Primenom tačno određenog impulsa satelit se prebacuje u orbitu koja se nalazi na oko 37 000 km od Zemljine površine, na visinu na kojoj mu je brzina obrtanja jednaka brzini obrtanja Zemlje. Ovakav satelit koji se kreće od zapada na istok, odnosno u istom smeru kao i Zemlja, prividno je stacionaran, pošto neprekidno ostaje u istom geografskom položaju. U odnosu na Zemaljske repere, on, dakle, izgleda nepokretan, ali se, u stvari, sa stanovišta nebeske mehanike, obrće oko središta Zemlje brzinom koja je sinhronizovana sa brzinom obrtanja naše planete. Ova privilegovana orbita ima izvanredne prednosti za telekomunikacione satelite.

Promena orbite takođe se koristi za lansiranje kosmičkih sondi namenjenih istraživanjima Meseca ili planeta. Sonda se najpre ubacuje u neku Zemljinu orbitu koja se nalazi u ravni kroz koju će Mesec, ili planeta u pitanju, proći u momentu kada se kosmički brod nađe u njegovoj blizini. U tačno određenom momentu, jednim impulsom brzine sonda se premešta na eliptičnu orbitu većeg ekscentriciteta, po kojoj će u svom kretanju obići oko planete koja se ispituje. Kada se nađe u njenoj blizini, sonda se ubacuje u orbitu planete odmerenim delovanjem raketa za kočenje. Nakon toga moguće je novim kočenjem dovesti sondu na silaznu putanju, na isti način kao što se to radi pri povratku na Zemlju, s tom razlikom što u najvećem broju slučajeva nema atmosfere koja bi obezbedila prirodno i progresivno kočenje. Povratak na Zemlju izvodi se obrnutim putem.

Druga jedna mogućnost, čiji je naučni značaj veoma velik, sastoji se u tome da se satelit snabde motorom malog potiska ali u stanju da dugotrajno funkcioniše. Ovakva kontinualna propulzija omogućuje progresivno premeštanje kosmičkog broda na sukcesivne orbite, tako da se dobija putanja u vidu spirale koja se postepeno udaljuje od Zemlje (fenomen obrnut kočenju u atmosferi). Sateliti ovog tipa, lansirani u ravnima pod različitim uglom prema ekvatoru, omogućili bi sistematsko istraživanje u neposrednoj blizini Zemlje, čak i daljih regiona, ukoliko bi njihovi motori imali dovoljnu autonomiju.



Sl. 54. — Potreban impuls za promenu orbitalne ravni.

PROMENA ORBITALNE RAVNI. Da bi se ostvario ovakav manevar, potrebno je kosmičkom brodu dati takav impuls brzine koji bi sa dotadašnjom brzinom doveo do rezultante brzine u ravni buduće orbite *(sl.* 54). Ovakva promena orbite zahteva znatan utrošak propergola; stoga se on koristi samo u slučajevima korigovanja male amplitude. Ovakav manevar, koji ima naročit značaj za lansiranje kosmičkih sondi, veoma je delikatno izvoditi pomoću telekomandi kada se kosmički brod nalazi na većoj udaljenosti od Zemlje.

Sateliti

PRINCIP. Svi pokretni objekti lansirani u kosmos, bilo da je reč o veštačkim Zemljinim satelitima ili kosmičkim sondama, poseduju izvesne zajedničke karakteristike, i pored razlika u veličini i misiji, i nezavisno od toga da li nose putnike ili ne nose. Pre svega, oni moraju posedovati dovoljnu otpornost da bez posledica izdrže znatna ubrzanja kojima su izloženi u momentu lansiranja. Zatim, moraju funkcionisati u gotovo apsolutnom vakuumu, u uslovima ekstremnih temperatura, i to dugotrajno, bez kvarova i bez mogućnosti remonta. Najzad, svi ovi imperativni uslovi moraju biti zadovoljeni u minimumu prostora i uz minimum težine. Svaki kubni centimetar mora biti zauzet i svaki gram iskorišćen. Iz svega ovog izlazi da realizacija jednog satelita mora biti rezultat timskog rada značajne ekipe inženjera svih struka. Nezavisno od tehnološke realizacije, koncepcija sklopa jednog satelita od četrdesetak kilograma zahteva angažovanje grupe od oko trideset visokokvalifikovanih inženjera.

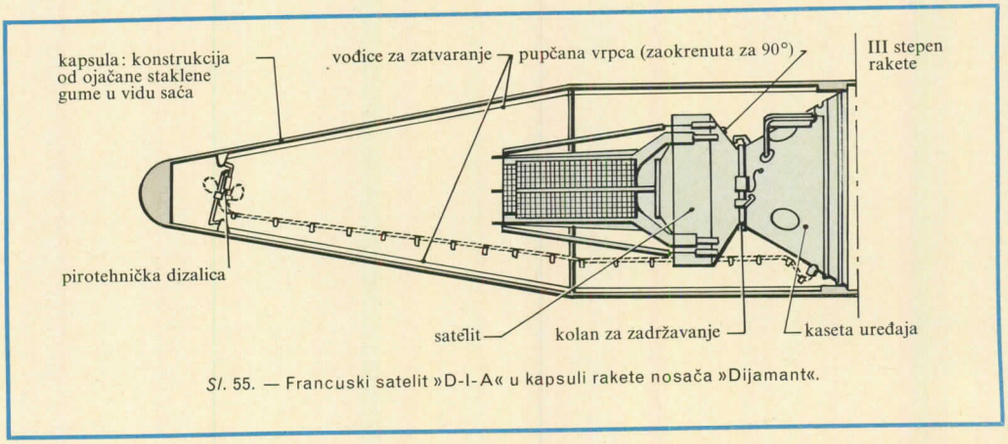
SATELIT BEZ POSADE

Ovakav satelit mora biti u stanju da dugotrajno funkcioniše bez direktne ljudske intervencije, ako se izuzme intervencija preko telekomandi, i to samo u određenim slučajevima. Oni stoga moraju posedovati veoma kompleksan elektronski sistem čiji je zadatak da neprekidno obaveštava posmatrače na Zemlji o različitim fazama odvijanja eksperimenta. Osnovni problem pri tome predstavlja snabdevanje energijom tokom celokupnog korisnog veka satelita u orbiti. Izvesni sateliti u ovu svrhu koriste baterije s gorivom ili nuklearne izvore, dok se drugi snabdevaju preko sunčevih baterija, kao, npr., francuski satelit »D-I A« *(sl.* 55).

SATELIT S POSADOM

Pored karakteristika u pogledu zapremine i težine, sateliti namenjeni odašiljanju ljudi u kosmos, kao što su, npr., kapsule »Džemini«, moraju sadržati elemente koji će obezbediti život astronauta tokom njihovog boravka izvan atmosfere. Sa druge strane, iz istih razloga, kosmički brodovi sa posadom sadrže izvesne uređaje za pilotiranje, namenjene boljoj stabilizaciji kosmičke kabine u svim konfiguracijama leta. Ovi uređaji sastoje se u osnovi od minijaturnih raketa koje astronauti mogu puštati u pogon i pomoću njih korigovati određene položaje kapsule koji mogu biti nepovoljni po ispravno odvijanje eksperimenta. Sateliti sa posadom snabdeveni su i specijalnom opremom (kao što su termička zaštita i rakete za kočenje), namenjenom za obezbeđenje povratka kabine na Zemlju. Operacija vraćanja je uveliko olakšana ako kosmička kapsula ima aerodinamičnu formu koja joj omogućuje da se spusti na površinu Zemlje, slično kao avion. Realizacija ovakvih kapsula u Sjedinjenim Državama je u fazi intenzivnih eksperimentalnih i teorijskih studija.

Jedan od nesumnjivo najdelikatnijih problema satelita sa posadom je spasavanje astronauta. Danas je ovo spasavanje osigurano čim rakete krenu u atmosferu, posebno u najdelikatnijem momentu, pri ispaljivanju rakete nosača. Dodatni motori mogu u tom slučaju da oslobode kapsulu sa astronautima od ostalog dela rakete i da obezbede njihov povratak na Zemlju pomoću padobrana. Na žalost, od momenta kada se kapsula nađe u orbiti, spasavanje astronauta, u slučaju kvara na uređajima za povratak na Zemlju, veoma je otežano i za sada se, eventualno, može izvesti jedino pravovremenim lansiranjem drugog satelita, sposobnog da ostvari randevu u kosmosu. U bliskoj budućnosti treba da dođe do realizacije sistema za individualno spasavanje, koji bi astronautima u opasnosti omogućio da se vrate na Zemlju ne služeći se klasičnim uređajima za spasavanje. Ovakvi sistemi se intenzivno proučavaju.



Sl. 55. — Francuski satelit »D-I-A« u kapsuli rakete nosača »Dijamant«.

Misije satelita i kosmičkih brodova

OPŠTE. Lansiranje prvih veštačkih Zemljinih satelita prvenstveno je trebalo da potvrdi teorijsku mogućnost da se sa Zemlje u Zemljinu orbitu ubaci neki pokretan objekt, a zatim da se istovremeno isprobaju i uređaji za lansiranje. Tako su veštački sateliti i kosmički brodovi u početku, sledeći primer svih velikih otkrića, poslužili, pre svega, za verifikaciju teorija. Nakon toga, eksperimenti koje su oni omogućili, dozvolili su čoveku da produbi svoja naučna saznanja. Tek na kraju dolaze na red današnje i buduće utilitarističke misije. Od lansiranja prvog satelita, 4. oktobra 1957, do sada lansirano je već nekoliko stotina kosmičkih brodova, a računa se da će ih biti znatno više, pa čak i satelita sa čisto praktičnom misijom. Već se osnivaju kompanije za obavljanje ovakvih misija, u prvom redu za lansiranje telekomunikacionih satelita.

NAUČNI SATELITI

Čoveku još uvek nije dovoljno poznata sredina u kojoj se kreću kosmički brodovi, tako da su eksperimenti koji se izvode uz pomoć satelita namenjeni, pre svega, produbljavanju saznanja o kosmičkim prostranstvima, odnosno izučavanju temperature, radijacije, meteorita i drugih karakteristika ove sredine. U isto vreme odvija se veoma obiman program vasionskih istraživanja namenjenih usavršavanju kosmičkih brodova i njihovih raketa nosača, kao i sredstava za komunikaciju između njih i Zemlje. Ova istraživanja neizbežno uslovljavaju razvoj novih tehnika, koje u prvom momentu kao da imaju isključivo naučnu primenu, ali, u stvari, veoma brzo nađu i svoju praktičnu primenu, često u veoma udaljenim oblastima tehnologije, što predstavlja — iako indirektno — jedan od korisnih aspekata osvajanja svemira.

Biološki sateliti, koji sa sobom nose životinje, i *sateliti sa posadom*, u kojima se nalaze ljudi, omogućavaju pristupanje rešavanju osnovnih problema života zemaljskih bića iznad njihove atmosfere, pod delovanjem različitih teža i drugih fenomena (naročito radijacije), koji se na Zemlji javljaju samo u veoma ublaženoj formi. Formiraju se nove naučne oblasti, kao što su kosmička fiziologija i medicina, a neka otkrića do kojih se u njima dolazi svakako će doprineti razjašnjenju nekih zemaljskih fenomena koji do danas još nisu objašnjeni.

Sateliti takođe omogućuju čoveku da bolje upozna nebeska tela. Izučavanjem putanja kosmičkih sondi dolazi se do mnogo preciznijeg određivanja masa planeta, čak i njihovog oblika. Preko svojih mernih instrumenata, ove sonde šalju na Zemlju veliki broj podataka za veličine koje su se do sada mogle jedino približno sračunavati na bazi često nedovoljno egzaktnih teorija. Ipak se uloga kosmičkih brodova u razvoju astronomije ovde ne zaustavlja. Buduće astronomske opservatorije u orbitama oko Zemlje, snabdevene moćnim teleskopima, biće u stanju da omoguće preciznije osmatranje neba nego što je to moguće iz zemaljskih opservatorija, odakle se osmatraju nebeska tela kroz atmosferu koja ih, kao neki ekran, deformiše.

Zemlja nam je velikim svojim delom još nepoznata, pošto često nismo u stanju da se dovoljno udaljimo od nje da bi je bolje osmotrili. Potrebno udaljavanje danas se postiže *geodezijskim sondama*, pomoću kojih se sa mnogo većom tačnošću određuje oblik našeg globusa. Tokom narednih godina sateliti će omogućiti izvođenje triangulacija koje se ne može izvesti sa površine Zemlje. Rastojanje između pojedinih tačaka na Zemlji često se ne može izračunati potpuno precizno, pre svega zato što nije moguća zemaljska triangulacija usled postojanja okeana između pojedinih tačaka.

SATELITI ZA PRAKTIČNE MISIJE

Različiti naučni sateliti i eksperimenti koje oni vrše omogućuju sakupljanje informacija koje se mogu iskoristiti u praktične svrhe. U ovom slučaju reč je samo o uzgrednom proizvodu naučnih istraživanja. Međutim, već danas kruži oko Zemlje izvestan broj satelita čije su misije isključivo praktične.

METEOROLOŠKI SATELITI vrše službu neprekidnog osmatranja kretanja oblaka nad celokupnom površinom Zemljine kugle, i periodično odašilju fotografije u centre za meteorološke prognoze. Ovi centri obrađuju primljene fotografije, što im omogućuje izradu dugoročnih prognoza, kao i bolje upoznavanje meteoroloških fenomena u svetskim razmerama.

VOJNI SATELITI. Ima već nekoliko ovakvih satelita čija je osnovna misija osmatranje. Iako karakteristike uređaja koje nose sa sobom predstavljaju vojnu tajnu, može se pretpostaviti da je preciznost njihovih sredstava za osmatranje dovoljno velika, tako da ovakvi sateliti mogu u potpunosti zameniti špijunske letove aviona na velikim visinama. Izvesni stratezi pomišljali su na lansiranje satelita bombardera koji bi nosili nuklearne bombe. U stvari, izgleda da bi, na današnjem stepenu razvoja tehnike, preciznost nuklearnog bombardovanja Zemlje iz satelita bila suviše mala da bi bila i korisna. Sa druge strane, pronalaženje satelita bombardera bilo bi lakše, kao i uništavanje bombi pre nego stignu na cilj.

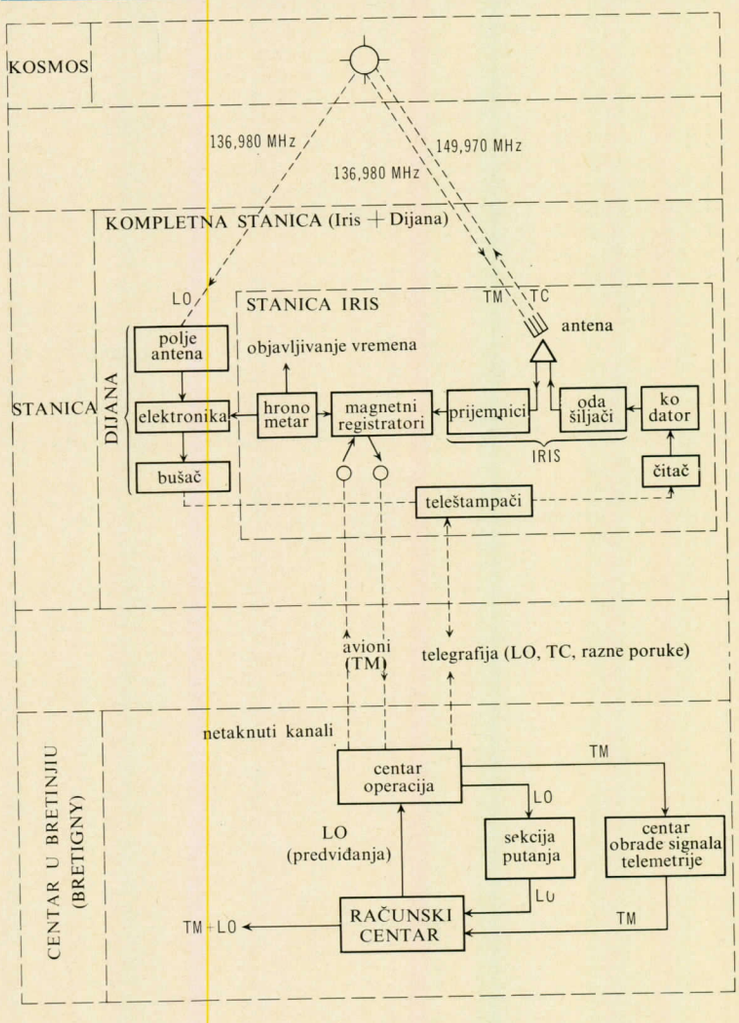
TELEKOMUNIKACIONI SATELITI su i najpoznatiji, zahvaljujući američkom satelitu »Erli Berd« (»Early Bird«), i sovjetskom satelitu »Moljnja I«, koji su već ostvarili prenos televizijskih programa na velike udaljenosti. Ova kategorija satelita doživeće veoma brz razvoj sledećih godina, zahvaljujući sinhronim satelitima koji će služiti kao relejne stanice za radio, televiziju i telefon istovremeno.

Infrastruktura lansiranja

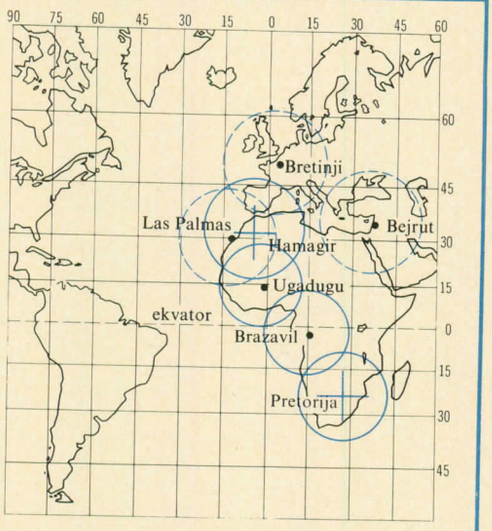
ISTORIJAT. Prva baza za lansiranje raketa na svetu bila je Centar za ispitivanje raketa (Raketenflugplatz) u Rajnikendorfu, kraj Berlina, osnovan 27. septembra 1930. Iako samo kratko vreme, ovaj centar je pripadao Astronautičkom udruženju (Verein für Raumschiffarht) u kome su u to vreme bili Obert (Oberth) i Verner fon Braun (Werhner von Braun). Nešto kasnije, vojni centar u Kumersdorfu, berlinskom predgrađu, delo generala Dornbergera, priprema osnivanje čuvenog nemačkog centra u Penemindeu (Peenemünde), na obali Baltičkog mora, kolevke V1 i V2.

Posle II svetskog rata imena kosmodroma Vajt Sends (White Sands), Volops Ajlend (Wallops Island), Vandenberg, a naročito Kejp Keneveral (Cape Canaveral), kasnije nazvan Kejp Kenedi (Cape Kenedy), u Sjedinjenim Državama, postaju opšte poznata, kao i Vumera (Woomera) u Australiji, francuski centri Kolom-Behar (Colomb-Béchar) i Hamagir (Hammaguir) — od 1967. zamenjeni eksperimentalnim centrima u Landu (Landes) i Gijani — i sovjetski Bajkonur.

Ovi veliki kosmički centri predstavljaju, u stvari, samo jedan deo neophodne infrastrukture na koju se oslanja osvajanje svemira. Lansirne baze, sa svim svojim tehničkim instalacijama, montažnim radionicama, kontrolnim salama itd., moraju biti dopunjene čitavim sistemom centara za lociranje, telekomandovanje i telemetriju (*sl.* 56), koji služe kao relejne stanice između bilo kog kosmičkog broda i kontrolnog centra kome mora biti obezbeđena neprekidna veza sa letilicom.



Sl. 56. — Zajednička shema sistema lociranja (LO), telemetrije (TM) i telekomandovanja (TC), korišćena pri lansiranju francuskih satelita A-1 i D-1.



Sl. 57. — Francuska mreža za lociranje, telemetriju i telekomandovanje satelita, onakva kakva je bila u momentu lansiranja satelita »Diapazon« (»Diapason«) i »Dijadema« (»Diademe«) iz baze Hamagir (Hammaguir) u Sahari.

LANSIRNE BAZE

Zajedničke karakteristike svih raketnih eksperimentalnih centara su, s jedne strane, njihova udaljenost od naseljenih mesta, a sa druge, geografska zona u kojoj se vrši ispaljivanje na velike udaljenosti, u kojoj takođe ne sme biti naseljenih mesta. Hamagir u Sahari je u ovom smislu bio veoma dobro lociran, dok ostali centri vrše ispaljivanja isključivo prema okeanu, sa izuzetkom sovjetskih baza, u kojima se ispaljivanja vrše preko sibirskih stepa kod kojih je gustina naseljenosti minimalna. Ovi uslovi diktirani su merama sigurnosti koje se moraju preduzimati u slučaju udesa u početnim fazama lansiranja.

Pri ubacivanju satelita i kosmičkih brodova u orbitu korisno je sa stanovišta ekonomičnosti, mada ne i neophodno, vršiti lansiranja u pravcu zapada, kako bi se iskoristila komponenta Zemljine rotacije. Ovo je slučaj kod Kejp Kenedija, Bajkonura i francuskog kosmodroma u Gijani. Ovaj poslednji centar je i najinteresantniji, zahvaljujući svom ekvatorijalnom položaju. On omogućuje lansiranje satelita pod bilo kojim nagibom prema ekvatoru, pri čemu je u stanju da u najvećoj mogućoj meri koristi Zemljinu rotaciju. (Brzina Zemljine rotacije iznosi na ekvatoru 453 m/sec. Ona se smanjuje idući prema polovima gde je jednaka nuli. U nekoj određenoj tački na Zemlji njena veličina jednaka je veličini na ekvatoru umnoženoj kosinusom geografske širine datog mesta.)

SREDSTVA PRAĆENJA NA KOSMODROMU

Cilj lansirne baze nije samo u obezbeđivanju logističke podrške ekipama zaduženim za ispaljivanje nekog projektila ili za ubacivanje satelita u orbitu. U minutima nakon ispaljivanja čitav sistem različitih uređaja koji rade na elektromagnetskom ili optičkom principu obezbeđuje neprekidan kontakt sa raketom i satelitom. To su sredstva praćenja konstantno sinhronizovana pomoću elektronskih časovnika izvanredne preciznosti (varijacije manje od sekunde na 500 godina, u odnosu na realno vreme).

Sve informacije koje se dobijaju preko ovih uređaja slivaju se u elektronski računar koji je u stanju ne samo da na specijalnoj tabli rekonstruiše u svakom momentu (realnog vremena) putanju projektila već i da automatski odašilje instrukcije pojedinim aparatima sistema za praćenje, koji izgube svoj cilj ili se nađu u trenutnom zastoju.

• *Optička sredstva praćenja* (trajektografija) sastoje se od kamera za praćenje, kinoteodolita i kinoteleskopa. Ovi uređaji reprodukuju na film ponašanje rakete u prostoru i vremenu i omogućuju određivanje njene orijentacije u odnosu na težište.

• *Elektromagnetska sredstva praćenja* zasnovana su na principu radara i radio-električne interferometrije. Francuski radar »Akviten« (»Aquitaine«), korišćen pri lansiranju raketa »Dijamant« (»Diamant«), sa satelitima A-1 i D-1, ima domet od 3 000 km. Treba napomenuti da se lociranje satelita može zasnivati i na Doplerovom efektu.

• Najzad, *laser* predstavlja sredstvo budućnosti koje će trajektografiji satelita obezbediti veliku preciznost. Napomenimo da je francuska tehnika na ovom polju zauzela vidno mesto. Ovom tehnikom merena su, u Nacionalnoj astrofizičkoj opservatoriji (Observatoire national d'astrophysique), rastojanja od američkog satelita »Eksplorer XXII« (»Explorer XXII«), koji se kretao na udaljenosti od 1 572 km, sa maksimalnom greškom od 8 m, odnosno sa preciznošću od $5 \cdot 10^{-6}$. (U originalnom tekstu $5 \cdot 10^{-10}$, što je očigledno pogrešno — prim. prev.).

MREŽA ZA TELEKOMANDOVANJE I TELEMETRIJU

Za neprekidno praćenje satelita na njegovom kruženju, sredstva trajektografije su očigledno nedovoljna. U stvari, neophodno je održavati dvojnu vezu što je moguće češće, naročito kada je reč o telemetriji, za koju bi najidealnija bila neprekidna veza, pošto je posredi odašiljanje na Zemlju informacija registrovanih aparatima koji se nalaze u kaseti uređaja satelita. Telekomandovanje se obavlja u obrnutom smeru pri odašiljanju komandi satelitu.

Telemetrija se sastoji od tehnološke telemetrije (kao što je kontrola sunčevih baterija, temperatura, mikrometeorita, kosmičkog zračenja itd.) i od naučne telemetrije, koja se odnosi na odašiljanje rezultata raznih eksperimenata registrovanih instrumentima montiranim na satelitu. Vrlo često, u toku celog jednog obrtaja, veza se obezbeđuje u trajanju od svega tri do četiri minuta. Za vreme trajanja veze, magnetska traka na satelitu odašilje na Zemlju, preko uređaja za telemetriju, celokupnu količinu informacija koje su bile registrovane pri jednom kompletnom obrtaju satelita. Usled rotacije Zemlje satelit preleće pri svojim sukcesivnim obrtajima uvek druge regione na Zemlji. Stoga je neophodno raspolagati svetskom mrežom *(sl.* 57) za trajektografiju, telemetriju i telekomandovanje, kako bi se ostvarila gotovo permanentna veza sa satelitom. Treba napomenuti da sve ove stanice, ma koliko bile udaljene jedna od druge, moraju biti apsolutno sinhronizovane, što znači da svaka od njih mora sadržati osnovni uređaj za vreme u potpunosti usaglašen sa elektronskim hronometrom na kosmodromu.

Preveo **Zoran Zarić**

Jean PELLANDINI

Elektronika

UVOD

U brzom razvoju savremenog sveta elektronika ima ogromnu ulogu. Ovladavanje atomskom energijom, upoznavanje svemira, ostvarenje kosmičkih putovanja predstavljaju dostignuća koja označavaju značajne datume u istoriji čovečanstva. Međutim, sva ova ostvarenja ne bi bila moguća bez mnogobrojnih istraživačkih, računskih i upravljačkih elektronskih uređaja. Elektronika predstavlja zajednički imenilac najsavremenijih tehničkih disciplina.

Pošto je čovečanstvu već dala radio, radar, televiziju, elektronika je prodrla u sve oblasti ljudske delatnosti, fizičke i intelektualne — počev od upravljanja mašinama-alatkama, preko rešavanja najsloženijih matematičkih, logičkih i jezičkih problema, do registrovanja moždanih talasa i brojanja krvnih zrnaca. Elektronika je, pre svega, grana fizike koja proučava elektrone, njihovo emitovanje, kretanje u vakuumu, u gasovima i čvrstim telima. Zatim, ona obuhvata proces proizvodnje elemenata u kojima se koristi kretanje elektrona (elektronske cevi i poluprovodnici). I, najzad, elektronika se bavi proučavanjem, izgradnjom i primenom uređaja za merenje i upravljanje, koji sadrže elektronske cevi i poluprovodnike.

Izvanredan porast primene elektronike za poslednjih petnaestak godina u raznim oblastima tehnike može se objasniti njenim velikim mogućnostima u rešavanju problema koji se klasičnim metodama ili uopšte nisu mogli rešiti ili su pružali samo delimična rešenja. Prednost elektronike uglavnom proističe iz činjenice da je masa elektrona praktično zanemarljiva, što znači da nema inercije te se elektron trenutno pokorava i najslabijim uticajima kojima je izložen. Ovo omogućuje da se ostvare osetljiva elektronska kola sa trenutnim reagovanjem, koja čine osnovu svih elektronskih uređaja.

Cevi, poluprovodnici i elektronska kola

Nastanak elektronike

PRETEČE. Britanski fizičar Kruks (Crookes) prvi je 1893. obelodanio postojanje elektrona. Pošto je ostvario električno pražnjenje u cevi iz koje je prethodno bio izvučen vazduh, primetio je da katoda emituje svetlu traku. Kada je u cev postavio jednu laku vrtešku, ustanovio je da »katodni zraci« udarom u krilca vrteške izazivaju njeno okretanje. Na osnovu ovog Kruks je zaključio da se katodno zračenje sastoji od materijalnih projektila, verujući da je reč o molekulima u četvrtom — takozvanom *zračnom* stanju materija. Žan Peren (Jean Perrin) je 1895. pokazao da su takozvani katodni zraci sastavljeni od negativnih električnih tovara. Ser Dž. Dž. Tomson (J. J. Thomson) saopštio je 1897. članovima Kraljevske akademije svoje otkriće o postojanju elektrona, izvanredno malog negativnog električnog opterećenja, za čiju je masu utvrdio da iznosi približno dvehiljaditi deo mase atoma vodonika. Može se, dakle, smatrati da je Dž. Dž. Tomson »pronalazač« elektrona, a 1897. godina može se prihvatiti kao godina rođenja elektrotehnike. Sledećih godina radovi Tomsona, Herca (Hertz) i Lorenca (Lorentz) omogućili su da se za nekoliko procenata tačnije utvrdi odnos električnog opterećenja elektrona e i njegove mase m. Ostalo je još da se tačno utvrdi električno opterećenje elektrona, čime se bavio Miliken (Millikan).

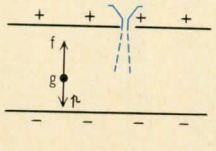
MILIKENOV EKSPERIMENT. Miliken je 1911. zamislio jednostavan, ali duhovit eksperiment, koji mu je omogućio da sa velikom tačnošću odredi električno opterećenje elektrona. Iznad gornje ploče horizontalno postavljenog kondenzatora *(sl.* 1) obrazovan je oblak od finih kapljica raspršenog ulja. U gornjoj ploči načinjen je otvor vrlo malog prečnika. Kroz taj otvor dospeva u kondenzator nekoliko kapljica ulja. One su se naelektrisale usled trenja još pri prolasku kroz raspršivač. Uostalom, naelektrisanje kapljica moglo bi se izazvati kratkotrajnim X-zračenjem, koje jonizuje vazduh, pri čemu bi ovakva kapljica vezala izvestan broj jona. Pomoću mikroskopa sa mrežicom može se posmatrati padanje kapljica, koje su osvetljene jakim svetlosnim izvorom. Usled otpora vazuha svaka kapljica pada konstantnom i određenom brzinom. Poznajući ovu brzinu, može se tačno izračunati težina posmatrane kapljice. Ako se ostvari potencijalna razlika između ploča kondenzatora, menja se brzina padanja kapljice. Ako se gornja ploča nalazi na višem potencijalu, onda se pri malom naponu brzina padanja kapljice usporava, dok daljim povećanjem napona kretanje kapljice promeni smer. Za tačno određenu vrednost napona, kapljica g ostaje u mirovanju. Sila f električnog polja E koja deluje na kapljicu iznosi qE, i u stanju mirovanja može da se izjednači težini kapljice p. U tom slučaju $q=\frac{p}{E}$. Ponavljajući ovaj postupak na velikom broju kapljica, Miliken je za električno opterećenje q dobio različite vrednosti. Međutim, sve ove vrednosti su bile ceo umnožak neke, među njima najmanje vrednosti, koja stoga može da se usvoji kao elementarno opterećenje jednog elektrona. Ova veličina se označava sa e i iznosi $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ kulona; ona predstavlja negativno električno opterećenje elektrona. Anderson (Anderson) je 1932. otkrio postojanje pozitivnog elektrona ili *pozitona*. Bilo je predloženo da se negativni elektron nazove *negaton*, ali se ovaj naziv sada retko koristi. Prema tome, kada se govori o elektronu, a ne navodi se znak njegovog električnog opterećenja, podrazumeva se da je reč o negativnom elektronu.

Posle Milikena, mnogi eksperimentatori su drugim metodima, zasnovanim ili na teoriji elektrolize ili na korišćenju jonizujućih čestica koje emituju radioaktivne materije, dobili vrednosti električnog opterećenja elektrona. Sve ove vrednosti su se slagale sa Milikenovim rezultatima u granicama do 2 promila. Električno opterećenje elektrona je tako malo da gotovo ne može ni da se zamisli. Da bi se o tome stekla jasnija predstava, može poslužiti sledeći primer: ako bi u trajanju od jedne sekunde bila uključena džepna lampa koja troši 1/10 ampera, kroz vlakno te lampe prošlo bi $625 \cdot 10^{15}$ elektrona. Ako bi se ti elektroni brojali brzinom od 1 milion u sekundi, i to po 24 časa dnevno, da bi ih izbrojali, bilo bi potrebno 200 vekova.

SPECIFIČNO OPTEREĆENJE ELEKTRONA. Elektron, elementarno električno opterećenje, ima tako malu masu da odnos njegovog električnog opterećenja i mase dostiže neshvatljivu vrednost. Ovaj odnos, ili specifično opterećenje elektrona, iznosi:

$$\frac{e}{m} = 1{,}76 \cdot 10^{11} \text{ kulona po kilogramu.}$$

Ovaj brojni odnos sam po sebi ne govori mnogo. Možda bi se on mogao bolje proceniti ako se na svakom Zemljinom polu zamisli masa od po jednog kilograma elektrona, koje bi se, uprkos velikom rastojanju od 12 000 km, odbijale uzajamnom silom od 200 000 milijardi tona.



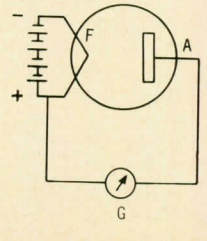
Sl. 1. — Milikenov eksperiment:
g — kapljica tečnosti;
p — težina kapljice;
f — uzgonska sila koju stvara električno polje.

Ponašanje elektrona u vakuumu

EDISONOV EFEKT. Trinaest godina pre no što je ser Dž. Dž. Tomson otkrio postojanje elektrona, Edison je uočio jednu pojavu koju, u stvari, prouzrokuju elektroni. On je 1884. postavio u električnu sijalicu jednu metalnu pločicu na izvesnom odstojanju od vlakna. Zagrevajući vlakno pomoću izvora jednosmernog napona od stotinak volta, on je posredstvom galvanometra ustanovio protok neke slabe struje između vlakna i pločice kada je pločicu A vezivao sa pozitivnim krajem vlakna *(sl.* 2a). Ako bi se, pak, pločica vezala za negativni kraj vlakna *(sl.* 2b), kroz galvanometar ne bi proticala nikakva struja.

Edison nije objasnio ovu pojavu. To nije mogao učiniti ni Fleming (Fleming), koji je za vreme svog

Edisonov eksperiment



Sl. 2a. — Kada se pločica A veže za pozitivni kraj zagrevnog vlakna F, kroz galvanometar G protiče struja od nekoliko miliampera.

putovanja po Sjedinjenim Američkim Državama, 1884, prisustvovao jednom prikazivanju Edisonovog efekta. Kao i Edison i Fleming je smatrao da je ova pojava posledica izletanja atoma ugljenika iz užarenog vlakna.

Po povratku u Englesku, Fleming se posvetio proučavanju Edisonovog efekta. Rezultat ovih istraživanja bio je patent koji je Fleming dobio 1904. za svoju »cev« — ispravljačku diodu *(sl. 3 i sl. 4)*, za koju je predviđao da će se primeniti kao detektor visokofrekventnih struja.

DIODA. Dioda je najjednostavnija elektronska cev *(sl. 4)*. Ona sadrži vlakno F, zagrevano baterijom A od nekoliko volta, i jednu ravnu elektrodu P. Druga baterija B stvara razliku potencijala između vlakna i pločice. Kad je pločica P pozitivna u odnosu na vlakno, kroz ovo kolo teče struja od nekoliko desetina miliampera. Za datu temperaturu vlakna, struja kroz diodu brzo raste pri porastu napona, sve dok ne dostigne konstantnu vrednost, koja se naziva *strujom zasićenja (sl. 5)*. Pri višim temperaturama vlakna raste i veličina struje zasićenja *(sl. 6)*. Dakle, u diodi dolazi do nove i neočekivane pojave, koja kao da je u suprotnosti sa osnovnim zakonima elektriciteta, a naročito sa Omovim zakonom. Izgleda kao da se električna struja prostire kroz vakuum u cevi, prelazeći od pozitivne pločice do vlakna bez ikakvog materijalnog nosača.

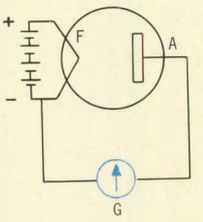
Emisije elektrona. Ričardson (Richardson) je prvi objasnio ove pojave. Pri zagrevanju vlakna od volframa, kretanje elektrona u njegovim atomima postaje sve življe. Kada dođe do usijanja, kretanje elektrona je tako snažno da izvesni dostignu energiju da mogu da napuste vlakno, što se naziva *termoelektronskom emisijom*. Kako je potencijal pločice u cevi viši od potencijala vlakna, ona privlači negativno naelektrisane elektrone, koji konačno i dospevaju na nju. To je protok negativnog elektriciteta kroz vakuum od vlakna do pločice što odgovara kretanju pozitivnog elektriciteta u suprotnom smeru. Kada bi pločica bila negativnija od vlakna, ona ne bi privlačila elektrone, pa ne bi bilo nikakvog protoka elektriciteta između elektroda. Pločica koja mora da bude pozitivna da bi kroz diodu tekla struja naziva se *anoda*; zagrejano vlakno koje emituje elektrone naziva se *katoda*.

Vrste katoda. Vlakno od volframa mora biti usijano da bi emitovalo elektrone. Međutim, ako se volframu doda mala količina torijuma, dolazi do snažne emisije elektrona na temperaturama nižim od temperature usijanja, što dozvoljava uštedu energije za zagrevanje vlakna. Ako se volframsko vlakno prevuče mešavinom oksida barijuma i stroncijuma, temperatura katode može da se snizi do tamnocrvenog usijanja, čime se obezbeđuje njen duži vek. Katode sa oksidom mogu da se greju direktno ili indirektno, zavisno od toga da li samo vlakno predstavlja izvor elektrona ili se kao izvor elektrona koristi metalna cevčica pokrivena slojem emisionih oksida, koja je izolovana od zagrevanog vlakna *(sl. 7)*. U ovom slučaju vlakno može da se greje i naizmeničnom strujom, pošto toplotna inercija katode sprečava brze promene njene temperature i obezbeđuje ravnomernu emisiju elektrona. Pronalazak cevi sa indirektnim grejanjem predstavljao je veliki napredak, jer je omogućio napajanje radio-prijemnika iz električne mreže, što je znatno doprinelo njegovoj širokoj upotrebi.

U shemama elektronskog kola sa indirektno grejanim cevima, katoda se obično prikazuje bez kola za grejanje *(sl. 8)*.

UTICAJ ELEKTRIČNOG I MAGNETNOG POLJA. S obzirom da elektroni imaju veliko specifično električno opterećenje, to oni lako menjaju putanju i ubrzanje pod dejstvom električnog i magnetnog polja. Uticaj električnog i magnetnog polja na elektrone izučava *elektronska optika*. Rezultati ovih istraživanja omogućili su realizovanje mnogih uređaja, među koje spadaju katodni osciloskop, maseni spektrometar, akcelerator čestica, elektronski mikroskop, pojačavač osvetljaja. Ovi uređaji imaju bezbrojne primene i u naučnoistraživačkom radu i u industriji i medicini.

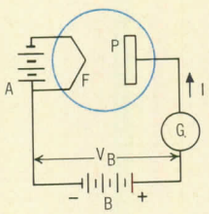
Uticaj električnog polja. Usled relativno velike vrednosti svog specifičnog naelektrisanja, elektron čak i u vrlo slabom elektrostatičkom polju može da dobije ogromno ubrzanje. Ovo ubrzanje jednako je



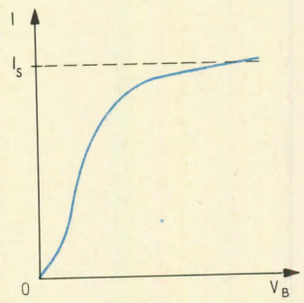
Sl. 2b. — Ako se pločica A veže na negativni kraj zagrevnog vlakna F, galvanometar G ne pokazuje nikakav protok struje.



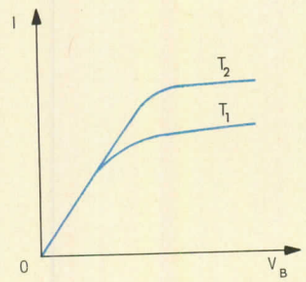
Sl. 3. Prva Flemingova cev.



Sl. 4. — Flemingova dioda. Ako se između pločice P i zagrevnog vlakna F ostvari pomoću baterije B potencijalna razlika V_B, pri čemu je ploča P pozitivnija, kroz diodu protiče struja I, koja se registruje galvanometrom G. Vlakno se zagreva posebnom baterijom A.



Sl. 5. — Struja I u diodi raste sa povećanjem napona V_B dok ne dostigne vrednost struje zasićenja I_s.



Sl. 6. — Vrednost struje zasićenja povećava se sa povišenjem temperature T zagrevnog vlakna.

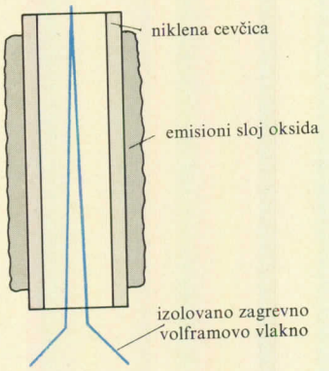
proizvodu specifičnog naelektrisanja elektrona i električnog polja. U malim elektronskim cevima, kakve se koriste u radio-prijemnicima, rastojanje između katode i anode je reda centimetra, a napon između ovih elektroda iznosi stotinjak volta. Elektroni su usled toga podvrgnuti ubrzanju od oko $1{,}76 \cdot 10^{15}$ m/s^2, tako da pri dolasku na anodu njihova brzina dostiže oko 6 000 km u sekundi. Ove brzine su mnogo veće od brzina koje su se mogle ostvariti pomoću mehaničkih i električnih uređaja pre elektronske ere. Ova činjenica objašnjava i prednost elektronskih uređaja u »praćenju« kratkotrajnih fizičkih procesa ili vrlo visoke učestanosti (više milijardi herca). Teorijski, brzina v elektrona ubrzanih naponom V, izražena u hiljadama kilometara u sekundi, iznosi $v = 600\sqrt{V}$. Ova relacija, u skladu sa zakonima klasične mehanike, dozvoljava pretpostavku da bi se, dajući vrlo visoke vrednosti naponu V, mogle postići proizvoljno velike brzine elektrona, čak veće i od brzine svetlosti. Međutim, to je nemoguće, pošto se, počev od neke brzine, više ne može zanemariti uticaj povećanja mase. I zaista, u skladu sa teorijom relativiteta, masa tela

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

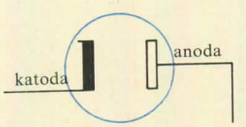
gde je m masa tela pri brzini v, m_0 masa tog tela u stanju mirovanja, c brzina svetlosti. Kada se za ubrzanje elektrona koristi napon viši od 20 000 volta, ovo ograničenje već počinje da se oseća. Pri naponu od 100 000 V odstupanje u brzini iznosi već 20%, a pri naponu od milion volta, brzina elektrona, koja bi po Njutnovoj mehanici trebalo da iznosi 600 000 km u sekundi, ograničena je na svega 282 000 km u sekundi. Stoga je neophodno, pri proučavanju uređaja koji rade sa vrlo visokim naponima, kao što je npr., slučaj sa akceleratorima čestica, uzeti u obzir teoriju relativiteta.

Ako elektron uđe u električno polje sa nekom konstantnom brzinom v_0, ova brzina se geometrijski sabira sa brzinom v koja je prouzrokovana poljem, usled čega će putanja elektrona postati parabolična.

Uticaj magnetnog polja. Ako elektron, koji se kreće brzinom v, dospe u magnetno polje, na njega će delovati konstantna sila upravna na pravac polja. Putanja elektrona se savija oko linije sila magnetnog



Sl. 7. — Katoda sa indirektnim grejanjem.



Sl. 8. — Simbol za predstavljanje diode sa indirektno grejanom katodom.

polja i postaje krug, ukoliko je brzina v upravna na polje, ili zavojnica, ako brzina sklapa oštar ugao u odnosu na polje. Prečnik kruga ili zavojnice je proporcionalan brzini v, a obrnuto proporcionalan veličini magnetne indukcije.

Elektrostatička i elektromagnetna sočiva. Elektrode koje stvaraju električno polje i kalemovi koji stvaraju magnetno polje, mogu da se koriste za savijanje, skupljanje ili širenje električnog mlaza. Po analogiji sa sočivima koja se koriste u optici, oni se često nazivaju »elektrostatička sočiva« odnosno »elektromagnetna sočiva«. Promenom napona između elektroda ili jačine struje kroz kalemove moguće je menjati žižnu daljinu elektronskih sočiva, čime se ostvaruje fokusiranje elektronskog mlaza koji kroz njih prolazi.

TRIODA. Pokušavajući da poveća osetljivost Flemingove cevi korišćene za detekciju radio-talasa, američki inženjer Li De Forest (Lee De Forest) došao je 1907. na ideju da između katode i anode uvede i treću elektrodu. Ovu elektrodu je, u skladu sa njenom tadašnjom konstrukcijom, nazvao *rešetkom*. To je bilo izvanredno značajno otkriće, koje je omogućilo da dotadašnja »radio-lampa« postane prava elektronska cev. Zahvaljujući postavljanju ove elektrode, cev je stekla sposobnost da radi kao pojačavač i oscilator, odnosno da se iskoristi za emitovanje i za prijem radio, televizijskih i radarskih signala, kao i za druge brojne primene u elektronici. Nikada pronalazak tako sićušnog materijalnog elementa nije imao tako revolucionarne posledice. Bitna osobina rešetke leži u činjenici što promenljivi napon koji se na nju dovodi znatno menja protok elektrona između katode i anode *(sl.* 9). Svoju cev Li De Forest je nazvao *audion* (*sl.* 10). Istini za volju, u početku se audion Lija De Foresta prilično čudljivo ponašao. Naime, tada se u cevima još nije mogao ostvariti dovoljan vakuum, pa je dolazilo do jonizacije, koja je bila još prilično neispitana. Mnogi fizičari, među kojima i Langmur (Langmuir), težili su da postignu što bolji vakuum. Grupa naučnika i inženjera koju je okupio general Ferije (Ferrié) izgradila je 1915. god., za potrebe narodne odbrane, prototip vakuumske cevi za bežičnu telegrafiju. Ovo je bila čuvena »lampa TM« *(sl.* 11), koja je prvi put u svetu proizvođena u velikoj seriji.

Posle prvog svetskog rata napravljen je niz modela cevi sa tri elektrode, ili trioda. Sve njihove bitne osobine proisticale su iz primene rešetke.

Karakteristike rešetke. Promenom napona na anodi cevi menja se i anodna struja. Ova promena anodne struje je praktično linearna ako je rešetka na negativnom potencijalu. Zavisnost anodne struje od napona rešetke cevi objašnjava se činjenicom da negativan napon na rešetki cevi u većoj ili manjoj meri odbija elektrone koji se kreću između katode i anode. Ako je napon rešetke dovoljno negativan, može potpuno da se spreči protok anodne struje. Tačka na karakteristici pri kojoj se anodna struja izjednačuje sa nulom naziva se *prekidna tačka* ili *cut off* (izraz koji se koristi u anglosaksonskoj literaturi-prim. prev.). Kriva koja prikazuje zavisnost vrednosti anodne struje I_A od napona rešetke V_G (*sl.* 12) naziva se *karakteristika rešetke*.

Strmina cevi. Nagib karakteristike cevi naziva se »strmina cevi«. Nagib je brojno jednak količniku promene anodne struje i odgovarajuće primene napona rešetke $S=\frac{\Delta I_A}{\Delta V_G}$, pri čemu se anodni napon održava konstantnim. Strmina se obično izražava u miliamperima po voltu.

Karakteristika rešetke praktično je linearna sve dok je napon na rešetki negativan; ako ovaj postane pozitivan, karakteristika se savija, strmina se smanjuje, a promene anodne struje više nisu srazmerne promenama rešetkinog napona.

Triode mahom imaju maksimalnu strminu reda desetak miliampera po voltu. Karakteristike snimljene za razne anodne napone, obrazuju *familiju karakteristika rešetke (sl.* 13).

Anodne karakteristike. Kad rešetka ima isti potencijal kao katoda, kriva koja predstavlja anodnu struju zavisno od napona na anodi, ima isti tok kao karakteristika diode. To je praktično prava linija koja prolazi kroz koordinatni početak. Ako se rešetka drži na potencijalu nižem od potencijala katode, kriva koja predstavlja anodnu struju praktično je paralelna sa prethodnom i pomerena je udesno. Ako se sukcesivno uzima više različitih negativnih napona rešetke u ravnomernim skokovima, dobiće se familija anodnih karakteristika, predstavljena približno paralelnim i ravnomerno raspoređenim krivim linijama *(sl.* 14).

Faktor pojačanja. Ispitivanjem karakteristika ustanovljava se da je promena anodne struje zavisna od promene kako rešetkinog tako i anodnog napona, pri čemu promena rešetkinog napona ima mnogo veći uticaj. Po definiciji, *faktor pojačanja* μ predstavlja odnos promene anodnog napona i odgovarajuće promene rešetkinog napona, koje imaju isti uticaj na promenu anodne struje: $\mu=\frac{\Delta V_A}{\Delta V_G}$.

Veličina faktora pojačanja bitno zavisi od gustine rešetke i od odnosa njenog rastojanja od katode i anode. Vrednost faktora pojačanja kreće se između 3 i 100.

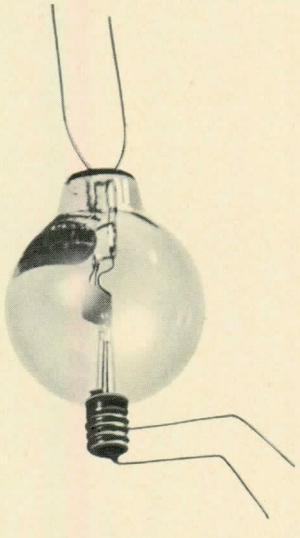
Unutrašnja otpornost. Pri konstantnom naponu rešetke, anodna struja je linearno zavisna od anodnog napona. Stoga se može definisati unutrašnja otpornost cevi: $R_i=\frac{\Delta V_A}{\Delta I_A}$.

Unutrašnja otpornost trioda umnogome zavisi od dimenzija elektroda, a naročito od površine katode. Kod cevi za radio-prijemnike, zavisno od tipa cevi, unutrašnja otpornost se kreće od 500 do 100 000 oma. Između tri koeficijenta koji karakterišu triodu — strmine S, faktora pojačanja μ i unutrašnje otpornosti R_i — postoji osnovna relacija: $\mu=SR_i$.

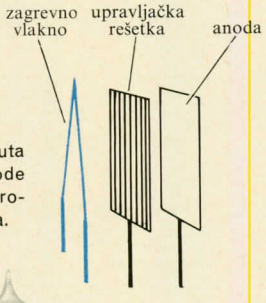
Elektronska cev sa radnim opterećenjem. Pri korišćenju elektronskih cevi, npr., za pojačanje malih naponskih signala, redovno se na red sa anodom vezuje neka otpornost ili impedansa. Tada se kaže da cev radi sa opterećenjem. U najprostijem slučaju, čisto otporno opterećenje, usled prolaska anodne struje, stvara pad napona koji dovodi do smanjivanja potencijalne razlike između anode i katode. Ovo izaziva znatno opadanje anodne struje, usled čega dolazi i do promene karakteristika cevi.

Ako su poznate karakteristike cevi, vrednost napona napajanja V_B i veličina radnog otpornika R_A, jednostavnim grafičkim postupkom dobija se takozvana *radna prava*, pomoću koje se određuje veličina anodne struje. Za ovo je dovoljno, na dijagramu familije anodnih karakteristika, povući pravu koja prolazi kroz tačku V_B na osi anodnih napona V_A i kroz tačku $I=\frac{V_B}{R_A}$ na osi struja I_A.

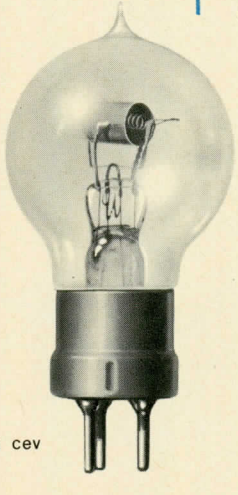
Radna tačka P na radnoj pravoj određena je presekom radne prave I i dovedenog napona V_G na rešetki cevi. Ako se ovaj napon promeni za ΔV_G, menja se anodna struja za ΔI_A, a radna tačka se pomera po radnoj pravoj od P do P′ *(sl.* 15). Apscisa



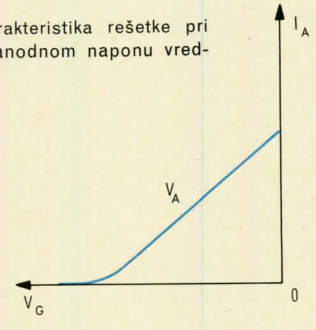
Sl. 10. — Audion Lija De Foresta (1908).



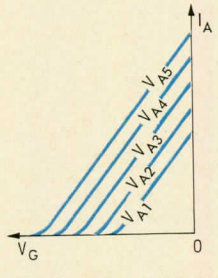
Sl. 9. — Rešetka umetnuta između katode i anode upravlja protokom elektrona između ovih elektroda.



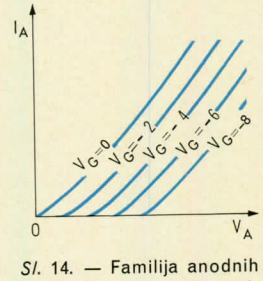
Sl. 11. — Elektronska cev »TM« (1915).



Sl. 12. — Karakteristika rešetke pri konstantnom anodnom naponu vrednosti V_A.



Sl. 13. — Familija rešetkinih karakteristika za različite vrednosti anodnog napona CV_A.



Sl. 14. — Familija anodnih karakteristika za razne vrednosti rešetkinog napona V_G.

radne tačke daje odgovarajuću vrednost anodnog napona, a ordinata predstavlja vrednost anodne struje. Promena anodne struje ΔI_A koja teče kroz radni otpornik prouzrokovaće na krajevima opterećenje promenu napona $R_A \Delta I_A$, koja predstavlja »izlazni signal«. Prema tome, crtanje radne prave omogućuje da se odredi veličina izlaznog signala pojačavača za datu vrednost ulaznog signala ΔV_G.

Međuelektrodne kapacitivnosti. Između elektroda u triodi (katoda, rešetka, anoda) postoje elektrostatičke kapacitivnosti koje su shematski predstavljene na *sl.* 16. Usled ovih kapacitivnosti, mali naizmenični signal može da se prenese sa jedne na drugu elektrodu. Parazitna kapacitivnost između anode i rešetke može da izazove ozbiljne nezgode. Zaista, ako cev radi na visokoj učestanosti, ova kapcitivnost prenosi sa anode na rešetku neželjeni signal koji unosi smetnju u korisni signal doveden na rešetku. Ova reakcija izlaznog na ulazno kolo može da prouzrokuje neispravan rad cevi, koja tada počinje da se ponaša kao generator oscilacija.

TETRODE I PENTODE. Uvođenjem još jedne rešetke u triodu dobija se cev nazvana *tetroda*, koja pokazuje izvesne prednosti u odnosu na triodu. Dodatna rešetka G_2 koja se drži na konstantnom pozitivnom potencijalu i postavljena je između upravljačke rešetke G_1 i anode A *(sl.* 17). Ona štiti upravljačku rešetku G_1 od elektrostatičkog uticaja anode A, do koga dolazi usled postojanja međuelektrodne kapacitivnosti anoda — upravljačka rešetka C_{AG}.

Pozitivni potencijal druge rešetke otprilike je upola manji od potencijala anode. Održavanjem druge rešetke na konstantnom potencijalu sprečava se da se promene potencijala anode kapacitivno prenesu na prvu rešetku, što znači da je parazitna kapacitivnost anoda — rešetka praktično poništena. U stvari, Faradejev kavez, koji obrazuje druga rešetka, nije savršen, tako da i kod tetrode postoji izvesna kapacitivnost, koja je reda 0,002 pF, dok je kod triode ona reda 2 pF. Druga rešetka se najčešće naziva *zaštitna rešetka*, što je u skladu sa njenom namenom.

Karakteristike tetrode. Anodne karakteristike tetrode znatno se razlikuju od odgovarajućih karakteristika triode. Na *sl.* 18 prikazane su anodne karakteristike tetrode pri konstantnom potencijalu zaštitne rešetke. Nepravilan oblik AB karakteristika tetrode potiče od elektrona koji raspolažu dovoljnom energijom da, udarajući u anodu, izbijaju iz nje elektrone. Ova pojava je poznata pod imenom *sekundarna emisija*. Kad se zaštitna rešetka nalazi na višem potencijalu od potencijala anode, ona »hvata« sekundarne elektrone. U ovom slučaju sekundarni elektroni koji napuštaju anodu izazivaju smanjenje anodne struje. Kad je anodni napon veći od napona zaštitne rešetke, ona više ne privlači sekundarne elektrone, već se oni vraćaju na anodu, pri čemu dolazi do ispravljanja anodne karakteristike. U ovom slučaju, anodna struja je gotovo nazavisna od anodnog napona, pošto je intenzitet protoka elektrona uglavnom određen pomoću električnog polja između zaštitne rešetke i katode.

U oblasti gde su anodne karakteristike praktično horizontalne, unutrašnja otpornost tetrode je vrlo visoka (nekoliko stotina hiljada oma). Strmina je istog reda veličine kao kod triode, dok faktor pojačanja $\mu = SR_i$ ima znatno veću vrednost nego kod triode (nekoliko stotina, u odnosu na nekoliko desetina). Smanjenje kapacitivnosti anoda — rešetka i povećani faktor pojačanja predstavljaju nesumnjive prednosti tetrode. Međutim, dinatronski deo anodnih karakteristika tetrode otežava primenu ove cevi. Zaista, pri većim vrednostima ulaznih signala postoji opasnost da radna tačka cevi dospe u oblast zakrivljenja karakteristika, što bi dovelo do nedozvoljenog izobličenja izlaznog signala. Da bi se otklonio ovaj nedostatak tetrode, umeće se treća rešetka G_3 između zaštitne rešetke i anode *(sl.* 19). Ta nova elektroda je vezana neposredno za katodu, što znači da se nalazi na jako negativnom potencijalu u odnosu na anodu, usled čega odbija sekundarne elektrone sa anode. Ova rešetka gotovo da nema uticaja na primarne elektrone, koje ubrzava polje između katode i zaštitne rešetke, odnosno anode. Tako ostvarena cev sa tri rešetke naziva se *pentoda*.

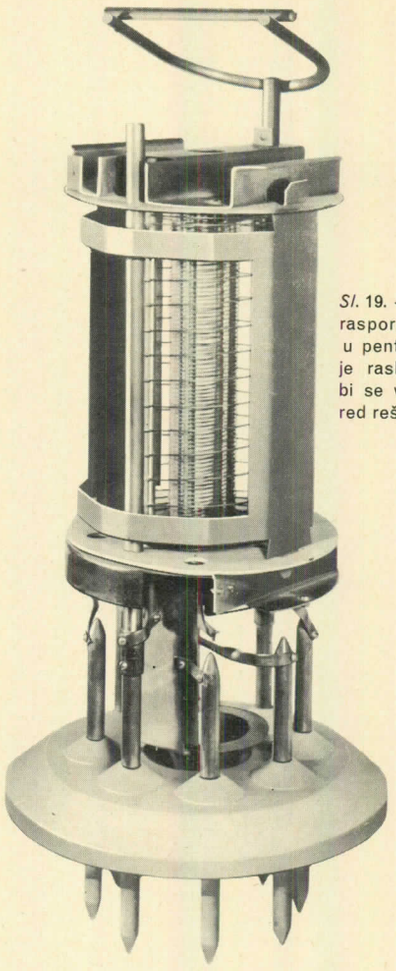
Karakteristike pentode. Usled veće razdvojenosti anode i katode, unutrašnji otpor pentode je veći od unutrašnjeg otpora tetrode, iz čega proističe i veći faktor pojačanja (od nekoliko stotina do nekoliko hiljada). Familija anodnih karakteristika pentode prikazana je na *sl.* 20. Zakrivljenja je nestalo, pa se sa ovakvom cevi mogu relativno lako dobiti velika pojačanja bez izobličenja. Znatno smanjenje kapacitivnosti anoda — prva rešetka obezbeđuje, čak na vrlo visokim učestanostima, ispravan rad cevi bez opasnosti od nastajanja oscilacija. Pentoda ima takve prednosti nad tetrodom da je ovu potpuno potisla iz upotrebe i da je postala nezamenljiva u pojačanju signala visokih učestanosti.

HEKSODE I HEPTODE. Pored tetroda i pentoda ostvarene su i elektronske cevi heksode, koje, osim anode i katode, sadrže četiri rešetke, kao i heptode koje imaju pet rešetki. Ove cevi primenjuju se uglavnom u promeni ili konverziji učestanosti, koja se koristi kod većine savremenih radio-prijemnika. Princip konverzije biće razmotren kasnije.

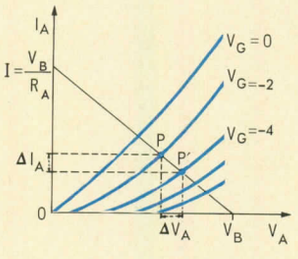
KOMBINOVANE CEVI. Da bi se smanjile zapremina, težina i cena elektronskih uređaja, napravljeni su raznovrsni tipovi cevi kod kojih je u zajednički stakleni balon smešteno više elektrodnih sistema, koji ponekad imaju zajedničku katodu. Tako postoje dvostruke diode, dvostruke triode, dvostruke pentode, a i kombinacije dioda-pentoda, trioda-pentoda, trioda-heksoda, trioda-heptoda. Razmeštaj elektroda u ovim cevima vrši se tako da se njihov međusobni uticaj svede na minimum. U istom cilju često se postavljaju i elektrostatički zakloni, koji se vezuju za jednu od katoda (*sl.* 21).

EMISIONE CEVI. Različiti tipovi elektronskih cevi koje su do sada opisane pripadaju velikoj porodici prijemnih cevi. U slučajevima kada se radi sa velikim električnim snagama (radio-difuzni predajnici, visokofrekventni generatori za industrijske svrhe), koriste se tzv. *emisione cevi*, koje čine posebnu grupu.

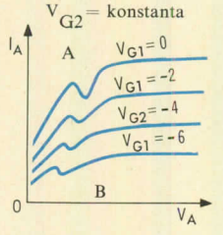
Ključni problem ovih cevi je hlađenje. Zaista, i u radio-predajniku sa visokim stepenom korisnog dejstva oko polovina energije uzete iz električne mreže oslobađa se u vidu toplote na anodama



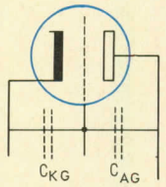
Sl. 19. — Unutrašnji raspored elektroda u pentodi. (Anoda je raskopljena da bi se video raspored rešetki).



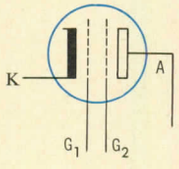
Sl. 15. — Crtanje radne prave omogućuje da se ustanovi promena anodnog napona V_A izazvana promenom napona rešetke V_G.



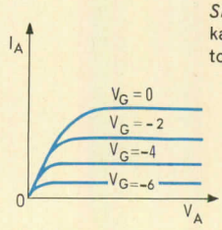
Sl. 18. — Familija anodnih karakteristika tetrode.



Sl. 16. — Međuelektrodne kapacitivnosti:
C_{KG}, kapacitivnost katoda — rešetka;
C_{AG}, kapacitivnost anoda — rešetka.



Sl. 17. — Rešetka G_2 u tetrodi štiti rešetku G_1 od elektrostatičkog uticaja anode A.



Sl. 20. — Anodne karakteristike pentode.

Fot. Serge Boiron.

snažnih elektronskih cevi. Stoga je potrebno pribeći njihovom hlađenju, bilo strujom vazduha, bilo protokom vode *(sl.* 22), a u slučaju najvećih snaga (»vapotron«) *sl.* 23. i isparavanjem vode, pri čemu se cevi potapaju u neku vrstu parnog kotla kroz koji protiče voda za hlađenje. Proizvedena topla voda ili para mogu da se koriste za zagrevanje prostorija ili za upotrebu u domaćinstvu (u samoj zgradi predajnika ili u okolnim stambenim zgradama), kao i za proizvodnju destilisane vode. Neki tipovi vapotrona mogu da razviju na anodi snagu i do 5000 kW.

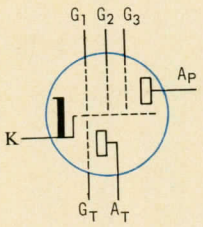
Cevi za vrlo visoke učestanosti. Pri korišćenju klasičnih elektronskih cevi na vrlo visokim učestanostima nailazi se na znatne teškoće. One potiču uglavnom od parazitnih kapacitivnosti u samoj strukturi cevi, kao i od vremena preleta elektrona od katode do anode. Na primer, elektroni, ubrzavani anodnim naponom od 200 V, prevale put od 15 mm u vremenu trajanja jedne poluperiode signala talasne dužine od 1 m. S obzirom da je rastojanje između katode i anode u klasičnoj elektronskoj cevi reda 15 mm, dolazi do faznog pomeraja od oko 180° između napona rešetke i anodne struje, što praktično onemogućuje korišćenje cevi pri navedenim uslovima.

Smanjivanjem dimenzija cevi omogućuje se približavanje elektroda i skraćivanje vremena preleta elektrona. Međutim, smanjivanjem veličine elektroda opada i korisna snaga, tako da ni ovaj postupak ne predstavlja zadovoljavajuće rešenje postojećeg problema. Stoga se došlo na ideju da se iskoristi upravo vreme preleta elektrona, koje ograničava primenljivost klasičnih cevi pri visokim učestanostima. Tako su nastale cevi sa modulacijom brzine, kod kojih se anodnom strujom upravlja na osnovu promene brzine pojedinačnih elektrona, a ne intenzitetom elektronskog snopa, kao što je slučaj kod klasičnih elektronskih cevi. Razlikuju se tri tipa cevi sa modulacijom brzine: *magnetron, klistron* i *cev sa progresivnim talasom.*

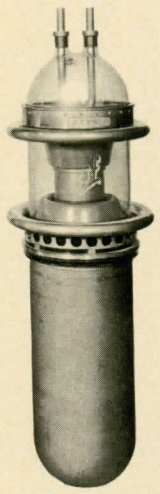
Magnetron. Magnetron je izveden kao dioda, sa masivnom cilindričnom anodom, koja u sredini ima šupljinu, »tunel«, u čijem se središtu nalazi katoda koja se zagreva. Na anodi postoje cilindrični useci ili šupljine spojene sa centralnim tunelom preko uskih proreza *(sl.* 24). Anoda se nalazi na visokom pozitivnom potencijalu u odnosu na katodu (nekoliko desetina kilovolta). Usled postojanja električnog polja elektroni bi se kretali radijalno od katode ka anodi. Međutim, u magnetronu je pomoću permanentnog magneta ostvareno jako magnetno polje upravno na pravac električnog polja koje stvara anoda. Usled toga dolazi do kruženja elektrona oko katode. Ako su veličine električnog i magnetnog polja dobro usklađene, većina elektrona kreće se putanjom koja ih vodi kroz šupljine. Dimenzije šupljina određene su tako da predstavljaju rezonantna kola za odabranu radnu učestanost, usled čega dolazi do oscilovanja na toj učestanosti.

Prema tome, u svakoj šupljini postoji elektromagnetno polje, i ovo oscilujuće polje potpomaže kretanje onih elektrona koji su s njim u fazi, dok ostale elektrone koči. Na taj način se mogu postići oscilacije velike snage. Ovim postupkom se ostvaruju generatori oscilacija čija srednja snaga može da iznosi više kilovata, a koji rade na učestanostima reda 2 500 MHz. Izvesni tipovi magnetrona rade na učestanostima 8—9 hiljada megaherca, i njihova snaga u impulsu može da dostigne vrednost od više stotina kilovata.

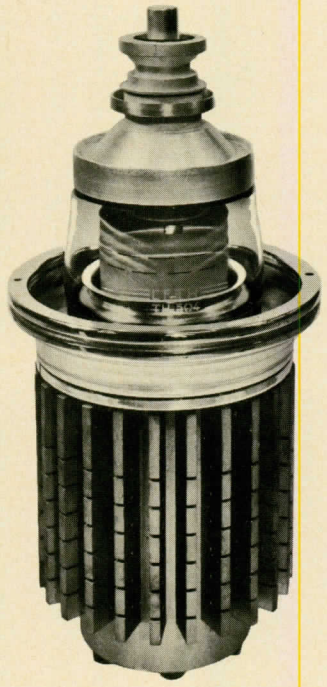
Klistron. Klistron se u suštini sastoji od rezonantne šupljine A_2, u koju se uvode oscilacije koje treba pojačati, pri čemu se stvaraju stojeći talasi *(sl.* 25). Snop elektrona koji izlazi iz užarene katode C, ubrzava se prstenastom anodom A_1 i dospeva u rezonatnu šupljinu. Stojeći talas u šupljini deluje na elektrone tako što ih čas ubrzava, čas koči. U trenutku kad polje prolazi kroz nulu, elektroni prolaze kroz rezonantnu šupljinu bez promene brzine. Na taj način je, u stvari, izvršena modulacija brzine elektronskog mlaza. Elektroni, i oni ubrzani i oni usporeni, dospevaju zatim u tzv. »kliznu cev« G, kroz koju se kreću nepromenjenom brzinom. U ovoj oblasti cevi, ubrzani elektroni sustižu usporene elektrone. Tako se obrazuju »paketi« elektrona, koji slede jedan za drugim u vremenskim intervalima koji odgovaraju ritmu oscilacije talasa iz rezonantne šupljine. Na taj način je promena brzine pretvorena u promenu gustine elektrona. Na izlazu iz klizne cevi nalazi se druga rezonantna šupljina A_3, u kojoj paketi elektrona indukuju snažno elektromagnetno polje. Rezultat ovoga je obrazovanje stojećeg talasa velike amplitude, čija je snaga višestruko veća od snage signala dovedenog na ulaznu rezonantnu šupljinu. Prema tome, klistron se ponaša kao pojačavač. Pošto prođe i kroz drugu rezonantnu šupljinu, elektronski mlaz se prikuplja na kolektoru A_4. Postoje klistroni koji daju srednju visokofrekventnu snagu reda 100 kW, dok snaga u impulsu može da dostigne vrednost od 40 MW.



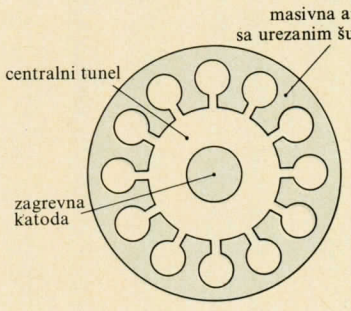
Sl. 21. — Cev trioda-pentoda. (Triodni deo sastoji se od katode K, rešetke G_T i anode A_T, dok se pentodni deo koristi istom katodom K, a sadrži rešetke G_1, G_2, G_3 i anodu A_P. Cevi su međusobno razdvojene elektrostatičkim zaklonom vezanim za zajedničku katodu K.)



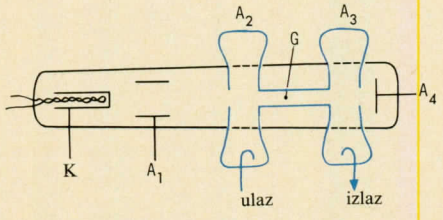
Sl. 22. — Emisiona cev od 200 kW hlađena cirkulacijom vode.



Sl. 23. — Emisiona cev »vapotron« za radio-difuziju; anodna disipacija 150 kW, anodni napon 15 kV.



Sl. 24. Magnetron.

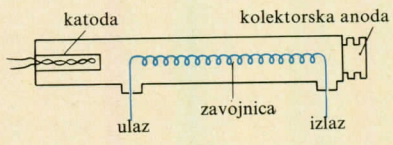


Sl. 25. — Princip klistrona.

Cev sa progresivnim talasom. U cevi sa progresivnim talasom nalazi se grejana katoda, koja, postavljena u osi cevi, emituje snop elektrona, ubrzavanih prstenastom anodom. Elektroni zatim ulaze u unutrašnjost zavojnice, načinjene od metalne žice u vidu spirale *(sl.* 26). Ulazni signal dovodi se na kraj zavojnice bliži katodi. Ovaj signal proizvodi električno polje koje se prostire duž zavojnice. Prostiranje ovog talasa prouzrokuje modulaciju brzine elektrona. Rezultat je sličan kao u slučaju klistrona. Međutim, dok je kod klistrona ubrzavanje, odnosno usporavanje elektrona pod dejstvom polja ograničeno na kratak period njihovog prolaska kroz rezonantnu šupljinu, dotle kod cevi sa progresivnim talasom ovaj uticaj traje duž čitavog puta elektrona kroz zavojnicu. Modulisani protok elektrona indukuje signal u zavojnici. Ako su uslovi rada cevi ispravno podešeni, to jest ako naponi na anodi za ubrzanje i na kolektorskoj elektrodi saopštavaju elektronima brzinu koja je jednaka brzini prostiranja oscilatornog polja duž zavojnice, snaga izlaznog signala cevi biće znatno veća od snage ulaznog signala. I zaista, dok je kod magnetrona i klistrona radna učestanost određena dimenzijama rezonantnih šupljina, kod cevi sa progresivnim talasom radnu učestanost je moguće menjati u dosta širokom opsegu podešavanjem napona na anodama. Savremeni klistroni mogu da rade sa snagom od 30 kW u opsegu učestanosti 600—800 MHz. Nedavno je, u SAD proizveden klistron koji u kontinualnom režimu rada daje snagu od 200 kW pri učestanosti od 10 GHz.

U impulsnom režimu rada, kakav se koristi kod radara, izvesni klistroni mogu u impulsu dati snagu reda 30 MW pri učestanosti oko 3 000 MHz.

FOTOELEKTRIČNA ĆELIJA. Ako svetlosno zračenje ima dovoljno veliku energiju, može bombardovanjem atoma izvesnih materija, iz njih izbiti elektrone. Ovaj efekat se koristi za pravljenje fotoelektričnih ćelija. Fotoelektrične ćelije sadrže, u balonu iz koga je izvučen vazduh, katodu pokrivenu fotoemisionim slojem i anodu, koja je najčešće izvedena u vidu jednostavnog metalnog stubića *(sl.* 27). Pozitivna anoda privlači elektrone koje emituje katoda kada na nju pada svetlosni snop *(sl.* 28). Različiti metali mogu da se koriste za pravljenje fotoemisionog sloja. To su najčešće alkalni metali (litijum, natrijum, kalijum, rubidijum, cezijum). Osetljivost fotoelektričnih ćelija zavisi od talasne dužine upadne svetlosti. Ove ćelije nemaju inerciju, stoga mogu da prate vrlo brze svetlosne pojave, čak do učestanosti od nekoliko desetina megaherca. Osetljivost ćelija je vrlo mala,



Sl. 26. — Shematski prikaz rasporeda elektroda u cevi sa progresivnim talasom.

Fot. C.S.F., Mouretie et C/e.

reda 20 mikroampera po lumenu, tako da se uz njih moraju koristiti odgovarajući pojačavači.

Ako se u balon ćelije uvede neki inertni gas pod malim pritiskom, zapaža se znatno povećanje osetljivosti. Emitovani elektroni sa katode putuju ka anodi sudarajući se sa atomima gasa. Ako elektroni imaju dovoljno veliku brzinu, oni mogu da izbiju elektrone iz atoma gasa. Izbijeni elektroni se takođe upućuju ka anodi, usled čega se povećava anodna struja fotoćelije. Osetljivost ćelije sa gasom je pet do deset puta veća od osetljivosti ćelije sa vakuumom. Ipak je i to nedovoljno da bi se moglo izbeći naknadno pojačavanje anodne struje, u slučaju da je potrebno da fotoćelija upravlja nekim uređajem.

Fotomultiplikator. Osetljivost fotoemisionih ćelija može znatno da se poveća multiplikacijom fotoelektrona pomoću sekundarne emisije.

U balonu iz koga je izvučen vazduh, fotomultiplikator sadrži: fotokatodu, koja je slična fotoelektričnoj ćeliji, i niz elektroda ili dinoda D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, čiji pozitivni potencijali ravnomerno rastu za isti iznos, npr., u skokovima od po 250 V. Poslednja elektroda A predstavlja izlaznu anodu fotomultiplikatora *(sl.* 29). Elektroni emitovani iz fotokatode udaraju u prvu dinodu D_1, pri čemu svaki upadni elektron izbija iz dinode nekoliko sekundarnih elektrona.

Postoji, dakle, umnožavanje broja elektrona na svakoj dinodi, te može da se odredi faktor sekundarne emisije. Na primer, ovaj faktor iznosi 5, to znači da se broj elektrona množi sa 5 pri prelazu sa jedne na drugu dinodu. Ako postoji deset dinoda, struja poslednje dinode (anode) dobija se ako početnu struju pomnožimo sa 5^{10}. U praksi odnos ovih struja ne prelazi 10^6. Izvesni fotomultiplikatori koji rade sa vrlo visokim anodnim naponima (do 5 000 V) imaju pojačanje reda 10^8, pri čemu može da se postigne osetljivost reda 1 000 A/1m.

Struja poslednje anode ne sme preći granicu koju daje proizvođač (obično reda 0,1 do 1mA), pošto svako prekoračenje struje može ozbiljno da ošteti osetljivi sloj na dinodama. Fotomultiplikatori omogućuju merenje svetlosnog fluksa reda desetak mikrolumena *(sl.* 30).

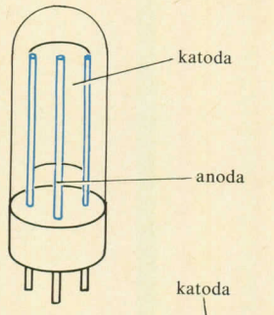
Merenje još manjih vrednosti svetlosnog fluksa ograničeno je »tamnom strujom«, koja potiče od termičke emisije elektrona sa katode. Tamna struja se može smanjiti hlađenjem fotomultiplikatora tečnim vazduhom. Tako mogu da se ostvare uređaji koji detektuju fluks od jednog fotona u sekundi ($2.\ 10^{-16}$ lm).

Fotomultiplikatori imaju niz primena u fotometriji, spektrometriji zračenja male energije, kao i u merenjima zračenja u nuklearnoj fizici.

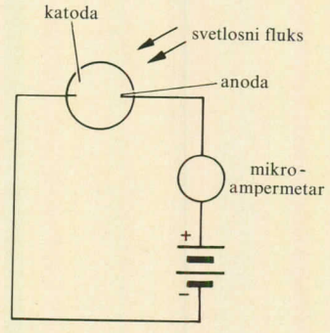
Fotoelektrični element. Fotoelektrični element (ili fotoćelija, ili ćelija sa kočećim ili zaustavnim slojem) sastoji se od tankog sloja poluprovodnika B koji se nanosi na metalnu pločicu A *(sl.* 31). Selen se najčešće koristi kao poluprovodnik, ali se takođe upotrebljava i bakarni oksid Cu_2O (oksidul), kao i sulfid talijuma i sulfid olova. Poluprovodnički sloj se prekriva tankim providnim metalnim filmom C, koji se dobija kondenzacijom pare zlata, srebra ili kadmijuma.

Kada se fotoelektrični element izloži svetlosti, između pločice-nosača i providnog metalnog sloja stvara se napon koji može da dostigne vrednost od 0,5 V. Osetljivost elementa je reda 0,5 mA po lumenu, tako da on može neposredno da pobuđuje osetljive elektronske uređaje. Izvesni fotoelementi omogućuju pretvaranje energije sunčeve svetlosti u električnu energiju, sa stepenom korisnog dejstva od 6—10%. Oni daju snagu reda 6—10 mW po kvadratnom centimetru površine. Ovakvi elementi se koriste za snabdevanje električnom energijom nekih uređaja pri istraživanju kosmosa.

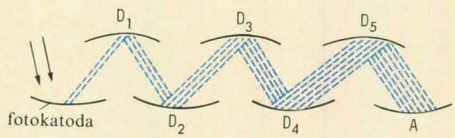
Fotoprovodna ćelija. Fotoprovodna ćelija ili fotoprovodnost sastoji se od poluprovodnika čija se električna otpornost znatno menja zavisno od osvetljenja. Fotoprovodnost poluprovodnika objašnjava se oslobađanjem elektrona u poluprovodniku usled bombardovanja fotonima. Oslobođeni elektroni mogu da se kreću pod dejstvom električnog polja, što znači da materijal koji je imao osobine izolatora dobija karakteristike provodnika. Promena otpornosti je znatna, npr. od 10 megaoma u mraku do nekoliko stotina oma pri osvetljenju od 1 000 luksa. Osetljivost fotoprovodnika dostiže više ampera po lumenu, pa se oni mogu upotrebiti za direktno upravljanje industrijskim električnim uređajima.



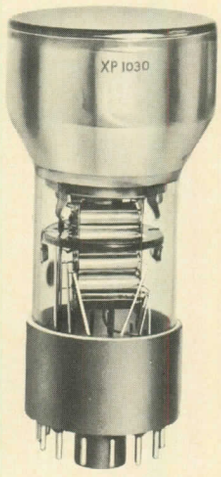
Sl. 27. — Vakuumska fotoelektrična ćelija.



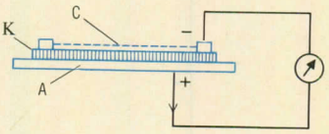
Sl. 28. — Vakuumska fotoelektrična ćelija. Pod uticajem svetlosnog snopa kroz cev teče struja od nekoliko mikroampera.



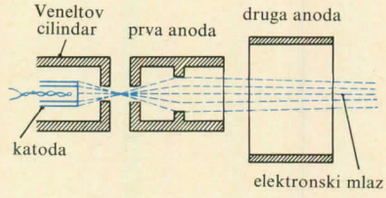
Sl. 29. — Princip fotomultiplikatora.



Sl. 30. Fotomultiplikator.



Sl. 31. — Foto-električni element.



Sl. 32. — Elementi za emisiju i ubrzavanje elektrona u katodnoj cevi.

KATODNA CEV. Zahvaljujući maloj inerciji elektrona i mogućnosti njihovog skretanja pomoću električnog ili magnetnog polja, ostvaren je katodni osciloskop, kojim mogu da se ispituju najbrže električne pojave, kako periodične tako i neperiodične.

Osnovni deo osciloskopa predstavlja *katodna cev*, čiji ekran služi za posmatranje pojava koje se ispituju. Katodna cev je zasnovana na sledećem principu: u balonu iz koga je izvučen vazduh vrlo uzan snop elektrona bombarduje fluorescentni ekran, usled čega se na mestu udara elektrona u ekran javlja svetleća tačka. Elektronski mlaz može da se skreće pomoću dva uzajamno upravna električna ili magnetna polja koji su ujedno normalni na osu mlaza. U većini slučajeva polje za vertikalno skretanje elektronskog mlaza je srazmerno sa posmatranom električnom veličinom G, dok se polje za horizontalno skretanje mlaza menja linearno sa vremenom. Na taj način kriva linija koju opisuje svetla tačka na ekranu predstavlja promenu veličine G u funkciji vremena.

Katodne cevi mogu da se podele prema nameni. Tako postoje cevi za osciloskopiju i oscilografiju brzih pojava, »cevi za sliku« ili kineskopi, tj. cevi za prijem televizijske slike, kao i radarske cevi za optičko prikazivanje elektromagnetnih »odjeka« primljenih pomoću uređaja za otkrivanje.

Katodne cevi sadrže neophodne elemente za obavljanje sledećih funkcija:

1. stvaranje elektronskog mlaza;
2. podešavanje intenziteta mlaza;
3. ubrzavanje elektrona;
4. fokusacija mlaza;
5. skretanje mlaza u dva uzajamno upravna pravca;
6. stvaranje svetle tačke ekscitacijom fluorescentnog ekrana.

Stvaranje elektrona. Elektroni se emituju iz indirektno grejane katode. Emisija je ograničena na vrlo malu površinu na dnu katodne cevi *(sl.* 32).

Podešavanje intenziteta mlaza. Mlaz po izlasku iz katode prolazi kroz cilindričnu elektrodu ili *Veneltov cilindar* (Wehnelt), koji gotovo u potpunosti okružuje katodu. Ova elektroda se nalazi na negativnom potencijalu u odnosu na katodu, i ima istu ulogu kao upravljačka rešetka triode.

Kada se na Veneltov cilindar dovede jako negativan napon, on može da zaustavi sve elektrone i time da ugasi svetlu tačku na ekranu. Upravo Veneltov cilindar omogućuje podešavanje intenziteta svetle tačke na ekranu katodne cevi televizijskog prijemnika.

Ubrzavanje elektrona. Elektroni se ubrzavaju pomoću nekoliko anoda sa sukcesivno rastućim pozitivnim potencijalom. Neke od anoda imaju pregradu koja omogućuje prolaz samo uskog mlaza elektrona duž ose cevi.

Fokusiranje mlaza. Elektroni u mlazu teže rasipanju usled njihovog međusobnog odbijanja. Rasut mlaz elektrona obrazovao bi na ekranu relativno veliku mrlju slabog sjaja. Stoga je potrebno da se izvrši fokusiranje mlaza, što se postiže pomoću dve poslednje ubrzavajuće anode, koje se koriste kao

Fot. C.S.F., Gilbert Warin.

elektronska sočiva (*sl.* 32). Prečnik druge anode je nešto veći od prečnika prve, te dolazi do savijanja linija sila električnog polja između ovih elektroda, a time i usmerenost mlaza; na taj način se podešava fokusiranje mlaza. Sve elektrode koje služe za emisiju, ubrzavanje i fokusiranje mlaza sačinjavaju tzv. *elektronski top*, koji je smešten u vratu cevi.

Skretanje mlaza. Skretanje elektronskog mlaza može da se izvrši pomoću električnog i magnetnog polja. U katodnim cevima za osciloskopiju uvek se koristi elektrostatičko skretanje, dok se kod televizijskih i radarskih prijemnika koristi elektromagnetno skretanje. Električno polje kojim se vrši skretanje mlaza, stvara se dovođenjem napona na dve paralelne metalne ploče, smeštene između elektronskog topa i fluorescentnog ekrana (*sl.* 33). Ploča na višem potencijalu privlači elektronski mlaz, usled čega dolazi do skretanja svetle tačke na ekranu. Skretanje je srazmerno dovedenom naponu između dve ploče. Ako se koriste dva para uzajamno upravnih ploča, moguće je, odgovarajućim podešavanjem skretnih napona, usmeriti svetlu tačku na bilo koje mesto na ekranu.

U slučaju elektromagnetnog skretanja koriste se dva para uzajamno upravnih namotaja, koji su smešteni van katodne cevi. Kao i u slučaju elektrostatičkog skretanja, svetla tačka se može po želji pomeriti po čitavoj površini ekrana odgovarajućim podešavanjem struje koja teče kroz skretne namotaje.

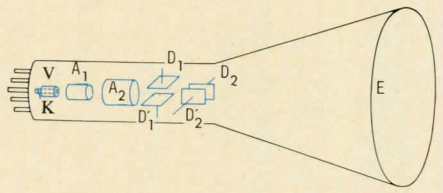
Fluorescentni ekran. Različiti fluorescentni materijali se nanose na unutrašnju stranu dna balona, čime se obrazuje fluorescentni ekran. Ekrani se razlikuju po boji emitovane svetlosti, kao i po trajanju njihove fluorescencije. Postoje fluorescentni materijali za sve boje spektra. Pogodnom mešavinom ovih materijala može se dobiti gotovo bela svetlost koja je potrebna kod cevi za televizijsku sliku. Cevi za televiziju u boji imaju tri različita elektronska topa, pri čemu je svaki namenjen jednoj od osnovnih boja. Ekran sadrži tri skupa ravnomerno raspoređenih tačaka, pri čemu svaki od skupova daje fluorescenciju odgovarajuće boje. Jedna rupičasta maska, smeštena blizu ekrana u unutrašnjosti balona, propušta do svake tačke na ekranu samo mlaz iz elektronskog topa za odgovarajuću boju.

Remanencija ekrana (održavanje svetle tačke i po prestanku elektronskog mlaza) može da se menja od nekoliko mikrosekundi do nekoliko minuta. Izvesne specijalne radarske cevi sadrže rešetku sa vrlo sitnim okcima, koja je pokrivena nekim izolacionim slojem, čime se ostvaruje elektrostatička memorija. Ove cevi mogu da sačuvaju sliku praktično neograničeno dugo.

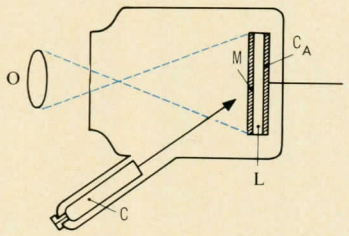
CEVI ZA ANALIZU SLIKE. Cev za analizu slike služi za stvaranje elektronskih signala koji odgovaraju osvetljaju tačaka slike koju treba preneti pomoću televizije. Analiza se vrši po sukcesivnim linijama, pri čemu se svaka linija razlaže na tačke, odnosno male elementarne površine slike. U prvim eksperimentima, koristio se mehanički postupak razlaganja slike, što je ograničavalo kvalitet slike i širu primenu televizije.

Prvi elektronski postupak analize slike ostvario je 1934. inženjer Zvorikin (Zworykin). Time je ne samo znatno poboljšao kvalitet slike već je uprostio i upotrebu prijemnika i omogućio široku rasprostranjenost televizije. Pronalazač je svoju cev nazvao *ikonoskop*. Cev je doživela mnogobrojna usavršavanja, ali se njen osnovni princip nije menjao, te se koristi i danas.

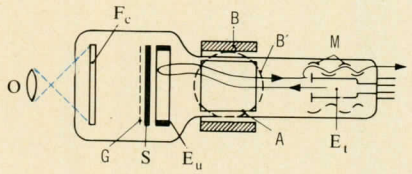
Ikonoskop. Cev se sastoji od staklenog balona (*sl.* 34) prilično velikih dimenzija, iz koga je izvučen vazduh. U balonu se nalazi vrlo tanka pločica od liskuna, koja je sa jedne strane C_A posrebrena, dok je sa druge strane M ostvaren tačkasti sloj srebra, čija je svaka tačka u električnom pogledu izolovana od ostalih. Tačkice srebra su delimično oksidisane, tako da obrazuju mozaik sićušnih fotokatoda. Ako se pomoću objektiva O, na mozaik projektuje analizirana slika, svaki od fotoelemenata oslobađa određeni broj elektrona, koji je proporcionalan



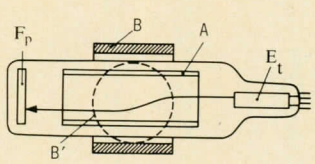
Sl. 33. — Katodna cev:
K — katoda; V — Veneltov cilindar; A_1 — anoda za usnopljavanje; A_2 — anoda za ubrzavanje; D_1, D'_1 — prvi par skretnih ploča; D_2, D'_2 — drugi par skretnih ploča; E — fluorescentni ekran.



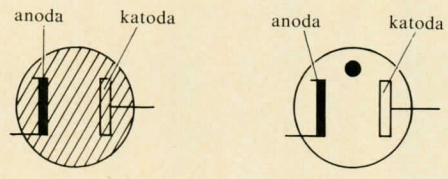
Sl. 34. Princip ikonoskopa.



Sl. 35. — Princip ortikona.



Sl. 36. — Princip vidikona (primer sa elektromagnetnim skretanjem mlaza, koje se vrši pomoću namotaja B i B').



Sl. 37. — Simboli za gasnu diodu.

osvetljaju odgovarajućeg elementa slike. Tako se uz optičku sliku stvara verna »elektrostatička slika«. Pomoću elektronskog topa C, analognog onome kod katodne cevi, i sistema za skretanje mlaza može se sukcesivno prebrisavati čitava površina mozaika. Usled udara elektronskog mlaza u tačke mozaika dolazi do sekundarne emisije elektrona, čiji intenzitet zavisi od potencijala date tačke mozaika. Usled ovoga dolazi i do odgovarajuće promene potencijala kontinualnog sloja srebra na drugoj strani liskunske pločice. Ovaj metalni sloj predstavlja zajedničku oblogu za mnoštvo elementarnih kondenzatora koje on obrazuje sa provodnim tačkama mozaika.

Ortikon. Ovaj tip cevi (*sl.* 35) sadrži jednu kontinualnu poluprovodnu fotokatodu (F_c). Objektiv O projektuje na fotokatodu sliku koju treba analizirati, usled čega dolazi do emisije elektrona, koji se ubrzavaju u pravcu mete sa sekundarnom emisijom (S). Sekundarne elektrone prikuplja pozitivna rešetka G, koja se nalazi ispred mete. Na taj način se na meti stvara lik od pozitivnih naelektrisanja. Elektronski top E_t koji je smešten nasuprot fotokatodi, kome pripada i anoda A, stvara elektronski mlaz koji se skreće pomoću namotaja B i B', usled čega sukcesivno prelazi celu površinu mete. Elektroni iz mlaza koče se usporavajućom elektrodom E_u, dok se meta održava na potencijalu katode elektronskog topa. Elektroni iz mlaza neutrališu lokalne potencijale u raznim tačkama na površini mete. Neosvetljenim tačkama slike odgovara nulti lokalni potencijal. Potom se elektroni odbijaju natrag prema anodi elektronskog topa. Usputno, oni nailaze na jednu prstenastu elektrodu sa sekundarnom emisijom. Izbijeni sekundarni elektroni se odgovarajućim električnim poljem usmeravaju ka jednoj kaskadi elektroda koje sačinjavaju umnožač elektrona (multiplikator) M. Opisanim postupkom postiže se da je izlazna struja multiplikatora elektrona modulisana osvetljajem odgovarajućih tačaka slike.

Vidikon. Najnovije rešenje analizatorske cevi predstavlja vidikon (*sl.* 36), koji koristi fotoprovodnu metu F_p. Ova meta se nalazi na poluprovidnoj metalnoj pločici. Slika koja se analizira, projektuje se na metalnu pločicu kroz fotoprovodni sloj, pri čemu električna otpornost svakog zrnca fotoprovodnog sloja zavisi od osvetljaja kome je podvrgnut.

Fotoprovodni sloj prebrisava se elektronskim mlazom male brzine, koji se dobija iz elektronskog topa E_t uz korišćenje anode A. Intenzitet mlaza zavisi od provodnosti analizirane tačke. Upravo te promene intenziteta mlaza predstavljaju izlazni signal vidikona. Prebrisavanje može da se vrši elektrostatičkim ili elektromagnetnim skretanjem mlaza. Prednost vidikona su velika osetljivost, kvalitetna analiza slike i njegova mala veličina. Postoje vidikoni čiji je prečnik 26 mm, a dužina 110 mm. Neki vidikoni mogu da rade i sa osvetljajem od nekoliko desetih delova luksa.

Ponašanje elektrona u gasu

OPŠTI PODACI. Elektronske cevi sa gasom predstavljaju posebnu klasu elektronskih cevi. Njihova primena je raznovrsna i značajna, a proističe iz činjenice da im se osobine znatno razlikuju od osobina cevi sa vakuumom. U balonu ovih cevi nalazi se obično neki jednoatomni gas ili živina para pod malim pritiskom.

JONIZACIJA. Rad gasnih cevi zasniva se na pojavi *jonizacije*, odnosno na naelektrisanju atoma gasa. Elektroni koje emituje zagrejana katoda upućuju se ka anodi koja ih privlači, pri čemu se na tom putu sudaraju sa atomima gasa. Ako je brzina dovoljno velika, oni mogu izbiti jedan ili više elektrona iz atoma gasa, usled čega ovi atomi postaju pozitivni joni. Izbijeni elektroni iz atoma gasa takođe kreću ka anodi, te i oni, sa svoje strane, na tom putu mogu izazvati stvaranje novih jona. Tako dolazi do umnožavanja jona tzv. sudarnom jonizacijom. Pozitivne jone privlači katoda, dok se elektroni upućuju ka anodi. U izvesnom smislu jonizovani gas predstavlja provodnu sredinu, čime omogućuje protok struje između anode i katode. Anodna struja u gasnim cevima nesumnjivo je veća od struje koja se može dobiti u cevima sa vakuumom iste veličine.

Postoji više vrsta gasnih cevi: cevi sa grejanom katodom, sa tečnom katodom, kao i sa hladnom katodom. U shemama gasne cevi se predstavljaju simbolima kao za vakuumske cevi, s tim što se prisustvo gasa označava kosim linijama ili tačkom u simbolu cevi (*sl.* 37).

GASNE DIODE ILI FANOTRONI. To su najjednostavnije cevi: sadrže grejanu katodu i anodu. Ako se između ovih elektroda priključi naizmenični napon, struja može da protiče samo od

anode ka katodi, što znači da ove cevi rade kao ispravljač struja. Unutrašnja otpornost cevi je vrlo mala, pa se ispravljanje vrši sa velikim stepenom korisnog dejstva. Postoje i fanotroni sa dve anode, koji mogu da ispravljaju struje od više desetina ampera, a izdržavaju inverzne napone od više hiljada volta.

TIRATRONI. Tiratroni, ili gasne triode, sadrže, pored katode, i anode i upravljačku elektrodu — rešetku. Uloga ove rešetke bitno se razlikuje od upravljačke rešetke kod triode sa vakuumom.

Kao što je poznato, potencijal doveden na rešetku triode sa vakuumom određuje trenutnu vrednost anodne struje, dok kod tiratrona napon rešetke ne određuje veličinu anodne struje, već samo dozvoljava ili sprečava protok struje. To je regulacija na principu »sve ili ništa«, što opravdava naziv »relejna cev«, koji se ponekad koristi za tiratrone.

Shema veza sa *sl.* 38. omogućuje da se ispitaju osobine tiratrona. Pozitivni napon dovodi se na anodu preko otpornika R_P koji služi za ograničavanje anodne struje. Ako se na rešetku dovede dovoljno negativan napon, kroz anodno kolo ne teče nikakva struja. U ovom slučaju međuprostor između anode i katode nije provodan, i za tiratron se kaže da je *ukočen*. Napon V_A, meren između anode i katode, jednak je tada naponu napajanja (pad napona na otporniku R_P jednak nuli). Negativno električno polje, koje stvara rešetka, suprotstavlja se kretanju elektrona, i rešetka ih ne propušta ka anodi. Ako se postepeno smanjuje (po apsolutnoj vrednosti) negativni napon V_G na rešetki, nastaće uslovi da privlačno dejstvo polja anode nadvlada odbojno dejstvo rešetke. Elektroni će tada moći da savladaju odbojno dejstvo rešetke, usled čega počinje da teče anodna struja, koja će prouzrokovati jonizaciju gasa. Tada se kaže da je tiratron *upaljen*. Napon anode V_A pada na vrednost 10 – 20 V, koja se naziva *napon gorenja*. Napon rešetke pri kome dolazi do »paljenja« tiratrona naziva se *kritični napon rešetke*.

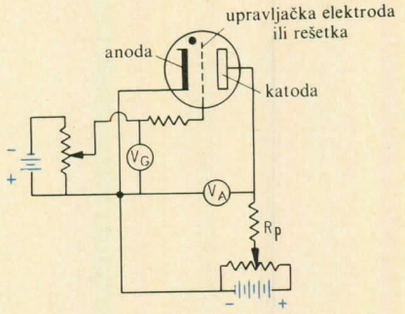
Kada je tiratron upaljen, veličina anodne struje zavisi od napona izvora, vrednosti otpora R_P i karakteristika tiratrona, a potpuno je nezavisan od napona rešetke V_G. Štaviše, može da se poveća vrednost negativnog napona na rešetki a da ne dođe do prekida anodne struje. Rešetka je, znači, izgubila sposobnost upravljanja. Pojava da se dovođenjem negativnog napona na rešetku ne može više zaustaviti protok struje, objašnjava se činjenicom da je rešetka okružena pozitivnim jonima koji putuju ka katodi i neutrališu negativno polje rešetke.

Utvrđeno je da je za vreme protoka struje razlika potencijala između anode i katode nezavisna od veličine anodne struje i od napona napajanja tiratrona. Taj konstantni napon zavisi od prirode gasa i njegovog pritiska, kao i od veličine i rasporeda elektroda, i naziva se *napon gorenja* ili *napon luka*. Da se zaustavi pražnjenje, potrebno je da se isključi pozitivni anodni napon ili da se njegova vrednost smanji ispod napona gorenja. Vrednost negativnog napona rešetke, pri kojoj tiratron prelazi iz stanja zakočenosti u stanje provođenja, zavisi od napona napajanja anodnog kola. Shema sa *sl.* 38. omogućuje da se snimi »karakteristika paljenja« ili »kritična karakteristika« tiratrona, i ona izražava vezu između kritičnog napona rešetke V_G i anodnog napona V_A (*sl.* 39).

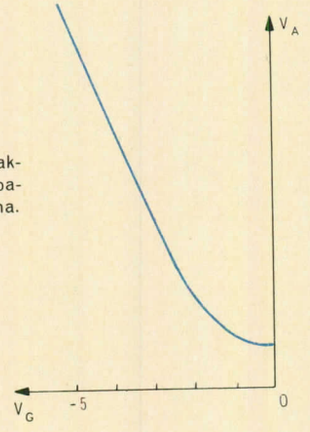
Tiratronska tetroda. Postoje i tiratroni koji između upravljačke rešetke G_1 i anode A imaju i zaštitnu rešetku G_2, koja je, obično, spojena sa katodom K (*sl.* 40). Tiratronska tetroda ima sledeće prednosti nad običnim tiratronom:

1. Veoma je smanjena struja upravljačke rešetke (20 do 100 puta) čime se smanjuje prigušenje i omogućuje korišćenje većih otpornosti u rešetkinom kolu;

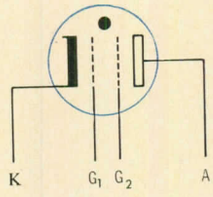
2. zavisno od znaka potencijala druge rešetke, polje ove elektrode pojačava ili slabi polje koje stvara upravljačka rešetka, što ima za posledicu promenu karakteristike paljenja (*sl.* 41);



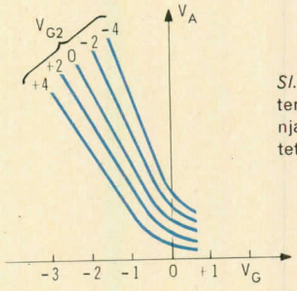
Sl. 38. — Kolo sa tiratronom.



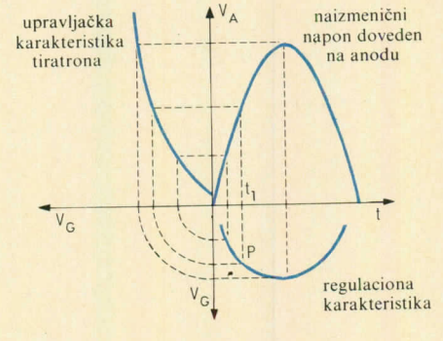
Sl. 39. — Karakteristika paljenja tiratrona.



Sl. 40. — Tiratronska tetroda.



Sl. 41. — Karakteristika paljenja tiratronske tetrode.



Sl. 42. — Određivanje trenutka paljenja tiratronske tetrode.

3. smanjena je kapacitivnost upravljačke rešetke.

Ispravljači sa tiratronima. Tiratron se najčešće koristi sa naizmeničnim napajanjem anode. On pri tome propušta struju samo kada je anoda pozitivna, i to ako napon rešetke omogućuje paljenje. Prema tome, tiratron u ovom slučaju radi kao ispravljač. Pražnjenje se automatski obustavlja na kraju svake pozitivne poluperiode. Rešetka nanovo stiče sposobnost upravljanja tek pri početku sledeće poluperiode. Napajanje anode naizmeničnom strujom ima znatnih prednosti pošto omogućuje da se po volji izabere trenutak paljenja u toku svake pozitivne poluperiode anodnog napona. Na taj način se menja vreme provođenja, a time i srednja vrednost ispravljene struje.

Da bi ispitali kako se menja trenutak paljenja tiratrona zavisno od potencijala rešetke, potrebno je da se nacrta kontrolna kriva koja predstavlja promenu kritičnog napona rešetke zavisno od vremena pri napajanju anode naizmeničnim naponom date amplitude. Ova kriva nastaje crtanjem sukcesivnih tačaka, koje se dobijaju prenošenjem na vertikalnu osu V_G kritičnih napona rešetke koji leže na horizontalnoj osi karakteristika paljenja. Dobijena kriva tačno određuje trenutak paljenja tiratrona. Taj trenutak t_1 predstavlja apscisu tačke P, u kojoj prava koja predstavlja napon rešetke seče regulacionu krivu (*sl.* 42). Za čitavo vreme provođenja struje, napon na krajevima cevi ostaje nepromenjen i jednak je vrednosti napona gorenja, i nastaje tek pri kraju pozitivne poluperiode, kada veličina napona napajanja padne ispod vrednosti napona gorenja.

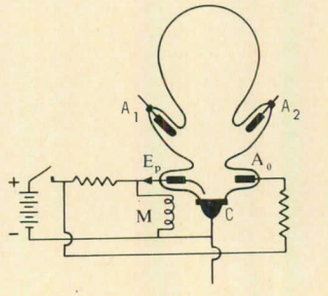
CEVI SA TEČNOM KATODOM. U ovim cevima koristi se živina katoda. Balon cevi, iz koga je prethodno izvučen vazduh, sadrži živinu paru pod malim pritiskom. Tečna katoda ima tu prednost da je praktično neuništiva, pošto se obnavlja kondenzacijom živine pare. Razlikuju se tri tipa cevi za živinom katodom:

1. obični ispravljači sa živinom parom;

2. ispravljači sa živinom parom koji sadrže upravljačku rešetku;

3. ignitroni.

Ispravljači sa živinom parom. Ovi ispravljači sadrže u balonu od pireks-stakla priličnu količinu žive. Gornji deo balona obrazuje »kupolu za kondenzaciju«. U posebnim ispustima na balonu smešteni su: elektroda za paljenje E_p, anode za održavanje A_0, glavne anode A_1 i A_2 i, eventualno, upravljačke rešetke (*sl.* 43). Cev se ne pali sama, pošto se katoda ne greje i ne emituje elektrone. Na pokretnu elektrodu za paljenje E_p deluje kroz zid cevi elektromagnet M, tako da ona u jednom trenutku dodirne tečnu katodu C. U trenutku kad se ova elektroda odvaja od žive, usled prekida strujnog kola stvara se varnica, koja jonizuje živinu paru. Na glavne anode A_1 i A_2 dovodi se napon koji se ispravlja. Pošto se pražnjenje u balonu prekida na kraju svake poluperiode, anoda za održavanje A_0 stalno održava pražnjenje slabog intenziteta, koje obezbeđuje neprekidnu jonizaciju živine pare. Postoji dve, tri ili šest glavnih anoda, što omogućuje ispravljanje dve poluperiode monofaznih, tri poluperiode trofaznih, odnosno šest poluperioda šestofaznih napona.

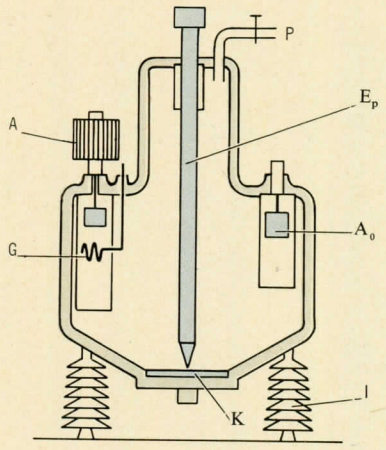


Sl. 43. Ispravljač sa živinom parom.

Ovi ispravljači se prave za struje od 500 A, a ispravljeni naponi se kreću od 100 V do 600 V. Postoje i »visokonaponske« cevi, koje mogu da daju struje od nekoliko desetina ampera pri naponima do 5 000 V. Snažniji tipovi cevi moraju se hladiti strujanjem vazduha.

Ispravljači sa upravljačkom rešetkom. Trenutak paljenja u toku pozitivne poluperiode može se podešavati pomoću rešetkaste elektrode na negativnom potencijalu postavljene ispred anode. Ova elektroda — upravljačka rešetka ima istu funkciju kao i rešetka u tiratronu. Ona omogućuje podešavanje trajanja provođenja, kao i srednje vrednosti ispravljene struje.

Za snage preko 500 kW koriste se ispravljači u metalnom kućištu, koji se nazivaju *mutatori*. S njima se dostižu snage do 10 000 kW i naponi do 3 000 V. Kod ovih cevi vakuum se održava posebnim uređajima, a hlade se protokom vode *(sl.* 44)



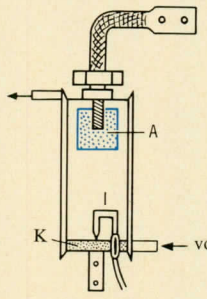
Sl. 44. — Mutator:

A — anoda;
K — katoda;
G — upravljačka rešetka;
E_p — elektroda za paljenje;
A_0 — anoda za održavanje;
I — izolator;
P — cev pumpe za održavanje vakuuma.

Ignitroni su ispravljači koji imaju živinu katodu K, grafitnu anodu A i pomoćnu elektrodu za paljenje I, koja se naziva *ignitor (sl.* 45). Kućište je u vidu metalnog cilindra, koji se hladi protokom vode ili snažnim strujanjem vazduha. U metalnom kućištu ostvaren je vakuum, posle čega je ono pažljivo zatvarano. Ipak kod snažnijih tipova cevi, vakuum mora da se održava dodatnim uređajima, pa je kućište zbog toga neprekidno spojeno sa sistemom pumpi koje obezbeđuju potrebnu vrednost pritiska živine pare. Elektroda za paljenje je u vidu štapića načinjenog od karbonata bora ili silicijuma, a uronjena je u živu.

Ako se na ignitor (između ignitora i žive) dovede pozitivni napon od stotinjak volta, između ignitora i površine žive obrazuje se snažno električno polje, koje iz katode izvlači elektrone, koji pod dejstvom polja koje stvara pozitivna anoda prouzrokuju jonizaciju živine pare. Pozitivni napon za ignitor može se dobiti vezivanjem ignitora na anodu preko velikog otpora, ili se, pak, može ostvariti pomoću posebnog izvora napona. U nekim primenama, upravo se koristi tiratron, koji, u pogodnom trenutku, dovodi pozitivan napon na ignitor.

Ignitroni imaju niz industrijskih primena u upravljanju električnim mašinama. Najsnažnije među ovim cevima sa lakoćom rade sa snagama od više hiljada kilovata.

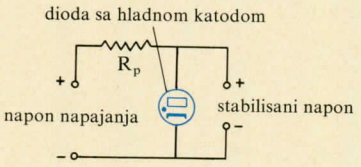


Sl. 45. — Ignitron.

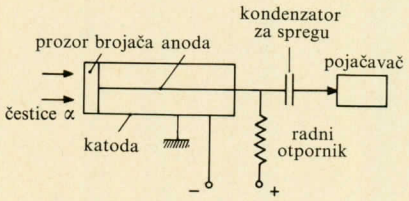
CEVI SA HLADNOM KATODOM. Kad između dve hladne elektrode u gasu postoji dovoljan napon, uvek se javlja električno pražnjenje. Ovo se objašnjava činjenicom da u gasu uvek postoji izvesna jonizacija koja je prouzrokovana raznim zračenjima, kao što su svetlosno zračenje, kosmički zraci i prirodna radioaktivnost. U električnom polju između elektroda, negativni joni i elektroni kreću se ka anodi, a pozitivni joni ka katodi. Ove čestice se u svom kretanju sudaraju sa atomima gasa i jonizuju ih. Ako je napon između elektroda dovoljno velik, stvara se znatan broj jona i dolazi do pražnjenja. Električni luk je vidljiva manifestacija tog pražnjenja, prouzrokovanog jonizacijom gasa.

Diode sa hladnom katodom. Ove cevi sadrže dve hladne elektrode u atmosferi nekog plemenitog gasa (neon, argon, helijum). Neke od tih cevi koriste se kao svetlosni indikatori, druge kao stabilizatori napona, a treće kao generatori ultraljubičastog zračenja. Cevi koje rade kao stabilizatori napona veoma se mnogo koriste u elektronskim uređajima.

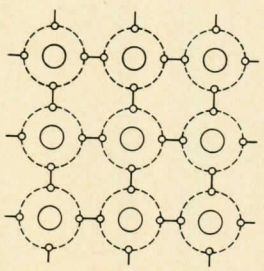
Pražnjenje u gasu vrši se na tačno određenom naponu. Posle paljenja, unutrašnja otpornost cevi postaje vrlo mala, tako da je potrebno da se struja ograniči nekim zaštitnim otporom R_p (*sl.* 46). Kada se uspostavi pražnjenje, napon V_A na krajevima cevi ostaje konstantan, bez obzira na veličinu struje I_A koja protiče kroz cev. Ovaj napon se naziva *napon stabilizacije*. Cevi ovog tipa mogu da se koriste bilo za direktnu stabilizaciju nekog jednosmernog napona, bilo za dobijanje referentnog napona koji upravlja radom drugih kola za stabilizaciju napona.



Sl. 46. — Osnovna shema za stabilizaciju napona.



Sl. 47. — Princip brojača sa Gajger-Milerovom cevi.



Sl. 48. — Kristalna struktura čistog germanijuma.

Tiratroni s hladnom katodom. Ovi tiratroni imaju iste opšte osobine kao tiratroni sa grejanom katodom, ali ne sadrže zagrevno vlakno. Postoji nekoliko tipova ovih tiratrona, i to samo za male snage. Oni imaju dobru osobinu da u neprovodnom stanju ne troše snagu, što predstavlja prednost u izvesnim primenama, gde se zahteva da uređaj bude stalno uključen (daljinsko upravljanje, sigurnosni uređaji).

Gajger-Milerovi brojači. Gajger-Milerove (Geiger-Müller) cevi se koriste za detekciju i merenje intenziteta radioaktivnog zračenja emitovanih iz radioaktivnih materija, kao i kosmičkog zračenja. Brojači se sastoje od staklenog ili metalnog balona cilindričnog oblika, duž čije je ose postavljeno vrlo tanko vlakno, koje ima ulogu anode. U slučaju da je balon brojača od stakla, katoda je izvedena bilo metalizacijom stakla, bilo pomoću grafitnog sloja. Kada je omotač od metala, onda on istovremeno predstavlja i katodu. U cevi se nalazi smeša plemenitih gasova, kojoj se ponekad dodaje para neke organske materije (alkohol, metan) ili halogenog elementa. Ovaj dodatak organske ili halogene pare u atmosferi cevi daje joj osobinu da se sama gasi, što znači da se pražnjenje nastalo u gasu spontano prekida.

Između anode i katode priključuje se jednosmerni napon. Ako čestica dovoljne energije prođe kroz cev, ona će jonizovati gas i izazvati električno pražnjenje. Impuls anodne struje koji pri tom nastaje, daje na krajevima otpora opterećenja naponski impuls čija veličina može biti između nekoliko volta i stotinjak volta (*sl.* 47). Impuls koji nastaje u brojaču usled prolaska čestice naziva se *odbroj*.

Postoji veliki broj različitih brojača, od kojih je svaki pogodan za neku posebnu namenu: za jednostavnu detekciju zračenja, za merenje ili čak i za određivanje prirode zračenja.

Ponašanje elektrona u čvrstim telima

POLUPROVODNICI. Već dugo postoji podela materijala na *provodnike* i *izolatore*. Razlika u provodnosti kod raznih materijala objašnjava se činjenicom da provodnici sadrže slobodne elektrone, koji se mogu kretati pod dejstvom električnog polja, čije kretanje upravo i sačinjava električnu struju. Pri tome je za smer proticanja struje usvojen smer suprotan kretanju elektrona. Za razliku od provodnika, izolatori ne sadrže slobodne elektrone, tako da električno polje u njima ne može izazvati kretanje elektrona. Pri običnim temperaturama specifična otpornost metalnih provodnika je reda 1,6 do 150 $\mu\Omega$ dok kod najboljih izolatora može dostići $10^{19}\,\Omega$cm.

Podela materijala na provodnike i izolatore pitanje je dogovora, pošto postoje i materijali, elementi ili jedinjenja, čija se otpornost nalazi između otpornosti metala i izolatora. Ovi materijali nazivaju se *poluprovodnici*. Postoji veliki broj ovakvih materijala, kako elemenata (germanijum, silicijum, telur) tako i intermetalnih jedinjenja, a i kombinacija kao što su oksid bakra, olovo-sulfid, kadmijum-sulfid, silicijum-karbid. Provodnost poluprovodnika zavisi od sadržaja primesa (nečistoća). Stoga germanijum i silicijum, koji su u čistom stanju gotovo savršeni izolatori, postaju prilično dobri provodnici ako sadrže i najmanju količinu primesa.

Za kristale je karakterističan pravilan raspored atoma, koji su međusobno povezani zajedničkim elektronima iz spoljašnje ljuske *(sl.* 48). Veze pomoću spoljašnjih elektrona susednih atoma nazivaju se *valentne veze*. Ako se u kristal unesu primese sa drugačijim brojem valentnih elektrona, dolazi do lokalne promene kristalne strukture, što je praćeno smanjenjem električne otpornosti. Strani element koji se uvodi u kristal poluprovodnika naziva se dopant, dok se sam postupak uvođenja stranog elementa u kristal poluprovodnika naziva *dopiranje*. Ako se neki četvorovalentni kristal, kao npr.,

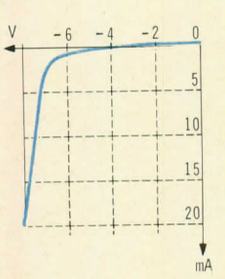
germanijum, dopira izvanredno malom količinom (1 : 10 000 000) nekog petovalentnog elementa kao što je npr. arsen *(sl.* 49), onda će se atom arsena ugraditi u kristalnu strukturu na mesto atoma germanijuma. Pri tome četiri njegova elektrona obrazuju kovalentne veze sa susednim atomima germanijuma. Peti elektron ostaje slobodan i može da se kreće pod dejstvom električnog polja. Na taj način germanijum je postao provodnik. Kristal germanijuma dopiran arsenom ima višak elektrona, što predstavlja negativno električno opterećenje, zbog čega se svrstava u poluprovodnike N-tipa.

Ako se za dopiranje germanijuma umesto petovalentnog upotrebi neki trovalentni element, kao što je galijum *(sl.* 50), jedna od četiri valentne veze atoma germanijuma neće biti ostvarena pošto nedostaje jedan elektron. Ovo odsustvo jednog elektrona fizičari su nazvali *šupljina*. Usled toplotnog kretanja jedan elektron iz nekog od susednih atoma može popuniti tu šupljinu, pri čemu će se stvoriti šupljina na mestu gde se taj elektron prethodno nalazio. Ima se utisak kao da se šupljina premestila sa jednog na drugi atom. Umesto da se kaže da je došlo do kretanja elektrona, može se takođe reći da se kreće šupljina. U odsustvu električnog polja kretanje šupljina je haotično. Ako se na kristal dovede neki električni napon, šupljine će se kretati u smeru polja. Šupljini se stoga može pripisati pozitivno naelektrisanje. Poluprovodnik dopiran na ovaj način predstavlja poluprovodnik P tipa.

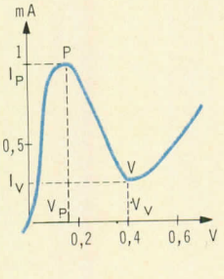
PN SPOJ. Ako se odgovarajućih tehnoloških postupkom spoje poluprovodnici P i N tipa, dobija se PN spoj. U dobijenom spoju ispoljava se karakteristična nesimetrija: P-oblast sadrži višak šupljina, dok N-oblast ima višak elektrona. Ukoliko se između P i N, PN oblasti priključi električni napon, očigledno je da će ponašanje spoja bitno zavisiti od smera dovedenog napona. Ako se PN spoj inverzno polariše, odnosno ako se pozitivan pol izvora priključi na N-oblast, a negativan pol na P-oblast *(sl.* 51), pozitivni pol izvora će privlačiti slobodne elektrone iz N-oblasti, dok će negativni pol privlačiti šupljine iz P-oblasti. Dakle, na samom spoju ostaje jedna zona bez ikakvog električnog opterećenja, te stoga nikakva struja ne može proticati kroz spoj. Ako se, pak, spoj direktno polariše, odnosno ako se pozitivni pol izvora priključi na P-oblast, a negativan pol na N-oblast *(sl.* 52) elektroni iz N-oblasti prelaze u P-oblast, a šupljine iz P-oblasti u N-oblast. Sam spoj postaje provodan i struja protiče. Prema tome, PN spoj predstavlja provodnik u direktnom, a izolator u inverznom smeru. Ako se priključi naizmenični napon, spoj će biti provodan samo za onu poluperiodu koja odgovara direktnom smeru. Dakle PN spoj praktično predstavlja idealan ispravljač.

Postoje diode sa PN spojem za vrlo različite snage — — minijaturnih dioda, koje služe za detekciju radio-signala, do silicijumskih dioda velikih snaga, koje mogu ispravljati struje od više hiljada ampera i izdržavaju inverzne napone od hiljadu volta. Uostalom, lako je vezivati i više dioda u paralelu da bi se dobile veće struje, dok se vezivanjem dioda na red omogućuje njihovo korišćenje u visokonaponskim kolima.

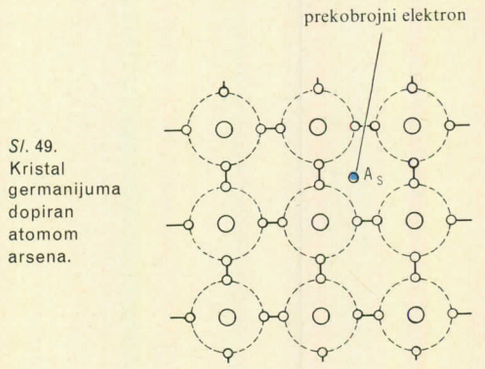
Karakteristike PN spoja. Kroz inverzno polarisan PN spoj, teorijski, ne bi trebalo da protiče nikakva



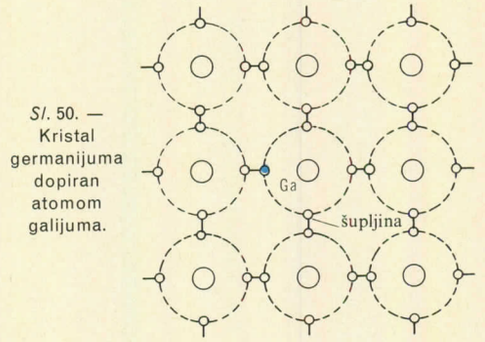
Sl. 54. — Karakteristika Cenerove diode.



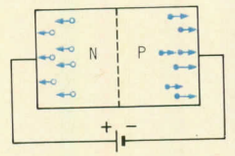
Sl. 55. — Karakteristika tunel diode.



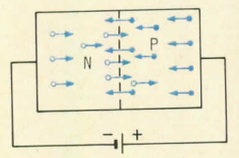
Sl. 49. Kristal germanijuma dopiran atomom arsena.



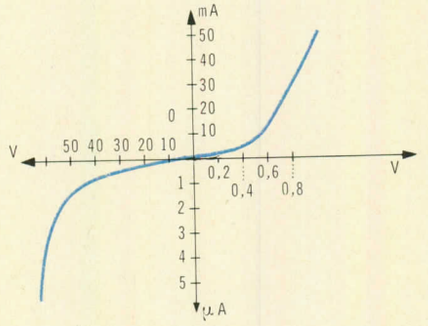
Sl. 50. — Kristal germanijuma dopiran atomom galijuma.



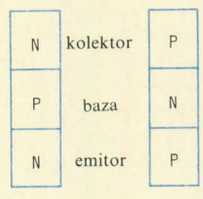
Sl. 51. — Inverzno polarisani P—N spoj.



Sl. 52. — Direktno polarisani P—N spoj.



Sl. 53. — Karakteristika germanijumske diode.



Sl. 56. NPN i PNP tranzistor.

struja. U stvarnosti, ako je primenjeni inverzni napon relativno velik, kroz spoj protiče neka mala struja, koja nastaje usled toplotnog kretanja elektrona. Ova struja se naziva *inverznom strujom*. Ona se povećava sa porastom temperature, kao i sa osvetljajem kome je spoj izložen. Na *sl.* 53. prikazana je karakteristika germanijumske diode male snage. Treba uočiti da se razmere po koordinatnim osama veoma razlikuju za pozitivne i negativne vrednosti napona i struja.

Cenerove diode. Inverzna struja PN spoja ima osobinu da naglo raste pri određenoj vrednosti napona, koji se naziva Cenerov (Zener) napon (*sl.* 54). Vrednost Cenerovog napona uslovljena je stepenom dopiranja N i P oblasti. Na ovom principu prave se specijalne diode koje se koriste kao stabilizatori ili ograničavači napona za vrednosti koje se nalaze u opsegu od 2 do približno 650 volta.

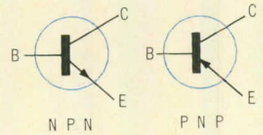
Tunel diode ili Esaki diode. Ako se jako poveća stepen dopiranja poluprovodnika koji sačinjavaju diodu, uočava se da se vrednost negativnog Cenerovog napona smanjuje, čak da može dobiti i pozitivnu vrednost reda nekoliko desetina milivolta. Ako se na takvu, jako dopiranu, diodu priključi u direktnom smeru rastući napon, uočiće se da struja raste *(sl.* 55), prolazi kroz maksimum P, potom opada do minimalne vrednosti V, a zatim ponovo počinje da raste. Napon V_p kome odgovara maksimalna struja I_p i napon V_v kome odgovara minimalna struja I_v predstavljaju karakterističke veličine tunel diode. Između tačaka P i V koeficijent pravca krive je negativan, što je karakteristično za kola sa negativnom dinamičkom otpornošću. Ova osobina omogućila je da tunel diode nađu više značajnijih primena, na čemu se i dalje radi. Tako je, npr., dovoljno povezati ovakvu diodu i izvor jednosmernog napona paralelno podešenom oscilatornom kolu da bi se dobile oscilacije čija učestanost može dostići 5 000 MHz. Međutim ovo je ostvarljivo samo za vrlo male snage.

TRANZISTOR. Amerikanci Bardin (Bardeen), Bratin (Brattain) i Šokli (Shockley) pronašli su 1948. tranzistor. Ovo otkriće izazvalo je pravu revoluciju u elektronici. Vrlo brzo su novopronađene komponente ovladale najvažnijim oblastima elektronike. Tranzistorizovanje uređaja omogućilo je prelaz sa minijaturizacije na mikrominijaturizaciju, što je dovelo do spektakularnih ostvarenja u oblasti kosmičkih istraživanja. Jedan od takvih primera je i ostvarenje telekomunikacionih satelita, koji su već ušli u upotrebu i predstavljaju ogroman napredak u tehnici veza na velikim rastojanjima. Danas je i mikrominijaturizacija prevaziđena: štampana kola sa diskretnim elementima ustupaju mesto integrisanim kolima. Pri tom se težina i veličina smanjuju i čitavih pet stotina hiljada puta u odnosu na klasična kola, kakva su građena pre dvadesetak godina. Autori vizionarskih romana sada s mukom sustižu inženjere, tako da će naučna fantastika uskoro kasniti za naukom.

Struktura tranzistora. Tranzistor se sastoji od dva PN spoja u opoziciji. Prema orijentaciji spojeva razlikuju se tranzistori NPN tipa i PNP tipa *(sl.* 56). Srednja oblast naziva se *baza*, a spoljašnje oblasti *emitor* i *kolektor*. Na slici 57 prikazan je uobičajeni simbol za predstavljanje tranzistora; strelica na emitoru označava konvencionalni smer struje (smer suprotan kretanju elektrona).

Princip rada tranzistora. Da bi ispunile ulogu koja im je određena, elektrode tranzistora moraju se vezati na odgovarajuće izvore napona. Drugim rečima, to znači, kad se za jednu od elektroda usvoji

Sl. 57. Uobičajeni simboli NPN i PNP tranzistora.



referentni potencijal, ujedno je određen napon svake od dveju preostalih elektroda. Referentna elektroda je zajednička za kola koje ona čini sa ostalim dvema elektrodama. Postoje, dakle, tri moguća načina priključenja tranzistora:

— veza sa zajedničkim emitorom;
— veza sa zajedničkom bazom;
— veza sa zajedničkim kolektorom.

Veza sa zajedničkim emitorom. Ako se NPN tranzistor veže (kao što je prikazano na *sl.* 58) sa izvorom napona E_c između emitora E i kolektora C, tako da je pozitivni pol izvora vezan na kolektor, ustanovljava se da kroz kolo teče zanemarljivo mala struja. Slobodni elektroni iz kolektora privučeni su prema njegovom kraju koji se nalazi na pozitivnom potencijalu, dok se elektroni iz emitora odbijaju od njegovog negativnog kraja i nagomilavaju na spoju emitor-baza. S obzirom da je PN spoj kolektor-baza inverzno polarisan, kroz njega teče samo zanemarljivo mala struja, koja je nastala usled toplotnog kretanja elektrona. Ako se na spoj baza-emitor dovede mali pozitivan napon (*sl.* 59), elektroni će lako prolaziti kroz ovaj spoj, pošto je on direktno polarisan. Ovi elektroni obrazuju struju baze I_b. Pošto su dospeli u bazu, elektroni su izloženi dejstvu privlačenja kolektora, koji je pozitivniji od baze. Usled toga kroz tranzistor protiče kolektorska struja I_c od kolektora prema emitoru.

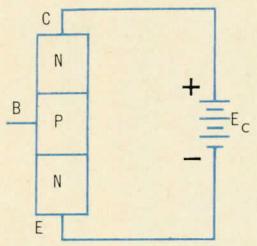
Može se smatrati kao da su elektroni iz izvora koji predstavlja spoj emitor-baza otvorili branu, koju čini zakočeni spoj baza-kolektor, i omogućili elektronima iz izvora E_C prolaz kroz tranzistor. Ako se postave merni instrumenti u kolo baze i kolektora, ustanoviće se da je struja baze I_B, koja otvara kolektor, znatno manja od kolektorske struje I_C.

Stoga se može definisati koeficijent pojačanja, odnosno strujno pojačanje tranzistora β. Ovaj koeficijent β jednak je odnosu $\frac{I_C}{I_B}$. Kod običnih tranzistora njegova vrednost se kreće između 30 i 50. Emitor predstavlja zajedničku tačku za kola kolektor-emitor i baza-emitor; zbog čega se ova veza i naziva »veza sa zajedničkim emitorom«. Veza tranzistora sa zajedničkim emitorom i upravljanje tranzistorom preko baze može se uporediti sa vezom triode sa zajedničkom katodom i upravljanjem pomoću rešetke (*sl.* 60). Treba, međutim, uočiti da se upravljanje tranzistorom vrši pomoću struje, dok se upravljanje triodom obavlja pomoću napona. Ovo proizlazi iz činjenice da je ulazna otpornost cevi vrlo velika, dok je kod tranzistora relativno mala.

Veza sa zajedničkom bazom. Ova veza prikazana je na *sl.* 61. Izvor napona E_C priključuje se između kolektora i baze tako da inverzno polariše spoj. Dakle, spoj je zakočen i ne teče emitorska struja. Ako se spoj baza-emitor polariše u direktnom smeru nekim malim naponom, kroz njega će proticati struja I_E. Kada elektroni dospeju u bazu, privlači ih pozitivni kolektor, i kroz njega teče struja I_C. Pošto je u ovom slučaju upravljačka struja I_E, može se definisati koeficijent strujnog pojačanja α kao odnos $\frac{I_C}{I_E}$. Vodeći računa o smeru između triju struja može se uspostaviti sledeća relacija:

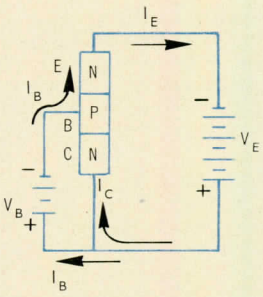
$$I_B = I_E - I_C \text{ ili } I_C = I_E - I_B .$$

Vidi se da je kolektorska struja manja od emitorske struje, pa je α uvek manje od jedinice. Moglo bi da izgleda da ovakvo pojačanje nije korisno. Međutim, to nije tačno, s obzirom da je u ovoj vezi izlazna impendansa tranzistora mnogo veća od ulazne, tako da se ostvaruje znatno pojačanje snage, iako je izlazna struja manja od ulazne. Pojačanje α može se izvesti iz strujnog pojačanja β prema relaciji:

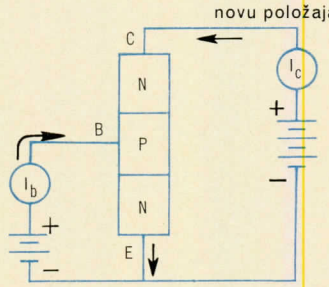


C — kolektor;
B — baza;
E — emitor.

Sl. 58. — Spoj kolektor-baza polariše se u inverznom smeru.

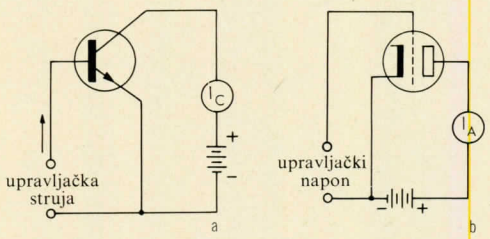


Sl. 62. — Veza sa zajedničkim kolektorom: razlika potencijala između baze B i emitora E iznosi $V_E - V_B$, pri čemu je $V_B < V_E$. Potencijal baze je, prema tome, viši od potencijala emitora, pa struja baze teče od baze ka emitoru, suprotno od smera koji bi se na prvi pogled mogao pretpostaviti na osnovu položaja baterije V_B. Emitorska struja I_E jednaka je zbiru $I_B + I_C$.

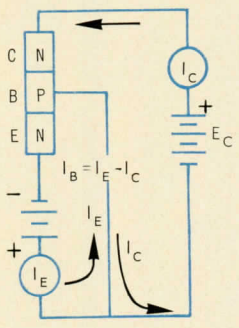


Sl. 59. — Struja baze protiče kroz spoj baza-emitor, koji se polariše u direktnom smeru.

Sl. 60. — Poređenje veze tranzistora sa zajedničkim emitorom i upravljanjem pomoću baze *(a)* i veze triode sa zajedničkom katodom i upravljanjem pomoću rešetke *(b)*.



a. Struja I_C u kolektorskom kolu menja se u zavisnosti od upravljačke struje;
b. Struja I_A u anodnom kolu menja se zavisno od upravljačkog napona.



Sl. 61. — Veza sa zajedničkom bazom.

$$\alpha = \frac{\beta}{1+\beta} .$$

Kod većine tranzistora α se nalazi u granicama od 0,96 do 0,99.

Veza sa zajedničkim kolektorom. Kod ove veze kolektor predstavlja zajedničku elektrodu, a izlazni signal se uzima sa emitora E *(sl.* 62). Ulazni signal se dovodi na bazu B. Ako se na bazu B dovede napon V_B koji je negativan u odnosu na napon kolektora ali nešto pozitivniji od napona na emitoru E, elektroni prolaze kroz spoj emitor-baza, što znači da teče struja I_B. Deo elektrona, koje privlači pozitivni kolektor, uspeva da prođe kroz spoj baza-kolektor, te nastaje struja I_C od kolektora ka emitoru. Emitorska struja I_E jednaka je zbiru kolektorske struje I_C i struje baze I_B.

Kolo radi na isti način kao i kod veze sa zajedničkim emitorom, a koeficijent strujnog pojačanja β' približno je jednak β. Pojačanje snage je malo, ulazna impedansa velika, a izlazna impedansa mala.

Ova veza se malo primenjuje, ali se ipak ponekad koristi za prilagođenje impedansi, naročito pri pojačanju na visokim učestanostima.

Upoređenje različitih načina vezivanja tranzistora. Veza sa zajedničkim emitorom se najviše koristi. Pri tom, baza služi kao ulazna elektroda i prima signal koji treba pojačati ili transformisati. Kolektor je izlazna elektroda.

Veza sa zajedničkom bazom retko se koristi, sem u slučajevima gde se vrši prilagođenje. Isto se može reći i za vezu sa zajedničkim kolektorom.

Karakteristike tranzistora. Shema prikazana na *sl.* 63. omogućuje da se dobiju različite krive koje predstavljaju karakteristike NPN tranzistora u vezi sa zajedničkim emitorom. Ista shema odgovarala bi i za PNP tranzistor, pod uslovom da se promeni polaritet izvora napona; prirodno je da će se u tom slučaju promeniti i smerovi struja. Karakteristike tranzistora prikazuju uticaj napona kolektora i baze na veličinu struje kolektora i baze. Može se ustanoviti da, kao posledica unutrašnje reakcije kolektora na bazu, struja baze nije funkcija samo napona baze, već i napona kolektora. Stoga je za tranzistor potrebno dati više karakteristika nego za elektronsku cev.

Kriva koja prikazuje zavisnost kolektorske struje I_C od napona kolektor-emitor V_C, pri čemu se struja

OSOBINE RAZLIČITIH SHEMA VEZIVANJA TRANZISTORA

KARAKTERISTIČNA VELIČINA	Stepen sa uzemljenim emitorom	Stepen sa uzemljenom bazom	Stepen sa uzemljenim kolektorom
Strujno pojačanje	veliko	blisko 1	veliko
Ulazna impedansa	srednja	mala	velika
Izlazna impedansa	srednja	velika	mala
Pojačanje snage	veliko	srednje	malo

baze I_B održava konstantnom, predstavlja osnovnu karakteristiku tranzistora. Uzimajući struju baze kao promenljivi parametar, što se ostvaruje promenom potencijala V_B, može se snimiti familija ovih karakteristika, koja je prikazana na *sl.* 64. Upadljiva je sličnost ove familije krivih sa anodnim karakteristikama pentode.

Kriva za $I_B = 0$ predstavlja promenu kolektorske struje pri otvorenom kolu baze. Ova struja, koja bi trebalo da bude jednaka nuli, potiče od toplotnog kretanja elektrona. Ona se označava simbolom I_{CEO} i naziva se *intenzivnom strujom zasićenja kolektorskog spoja*.

Za izvesne primene prave se tranzistori sa vrlo malom inverznom strujom zasićenja, kod kojih pri dovoljno velikoj struji baze maksimalna kolektorska struja može dostići i stotine miliampera. Ovakvi tranzistori mogu se koristiti kao izvrsni prekidači, pošto kolektorska struja prelazi sa zanemarljivo male vrednosti reda mikroampera na veličinu desetog dela ampera. Ovaj rad na principu »sve ili ništa« naziva se *prekidački režim* i koristi se u mnogim industrijskim primenama (elementi računara, logička kola, sistemi za pamćenje, generatori različitih periodičnih talasnih oblika, upravljanje mašinama, regulatori brzine itd). Na slici 65. prikazan je, kao primer, skup karakteristika za tranzistor male snage.

Polarizacija i stabilizacija. Da bi tranzistor ispravno radio, odnosno da bi se postiglo dovoljno veliko pojačanje bez znatnijih izobličenja izlaznog signala i bez opasnosti da se prekorači dozvoljena kolektorska struja, potrebno je da se pravilno odrede vrednosti izvora napajanja, opterećenja i polarizacije upravljačke elektrode.

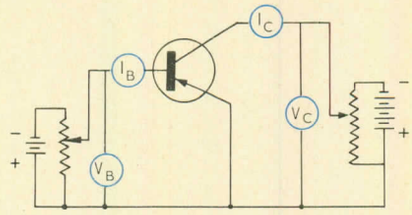
Tranzistori, uostalom, kao i svi poluprovodnički elementi, jako su osetljivi na promene temperature. Povišenje temperature dovodi do pojačanog toplotnog kretanja elektrona, usled čega se povećava kolektorska struja. Povećanje disipacije na kolektorskom spoju dovodi do novog povišenja temperature. Ovo uzajamno dejstvo koje se može nazvati *toplotnim kumulativnim procesom* dovodi do uništenja tranzistora, ukoliko se ne preduzmu odgovarajuće mere.

S druge strane, ne može se izbeći da se čak i tranzistori istog tipa znatno razlikuju po svojim karakteristikama. Ovo predstavlja ozbiljnu smetnju u serijskoj proizvodnji tranzistorskih uređaja, jer je neizbežno vršiti njihovo pojedinačno završno podešavanje. Stoga je tranzistore neophodno polarisati tako da se u najvećoj meri izbegne pomeranje radne tačke.

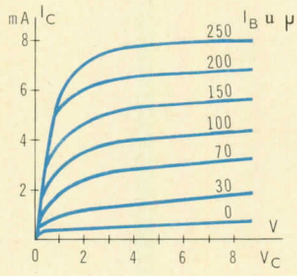
U vezi tranzistora sa zajedničkim emitorom, koja je ranije opisana, korišćen je poseban izvor napajanja za polarizaciju baze. Ovaj izvor je istog polariteta kao i kolektorski, samo ima manju vrednost. Stoga je prirodan zaključak da se taj napon može uzeti sa dela kolektorskog izvora napajanja, pa se takvo rešenje redovno i primenjuje.

Postupak polarizacije. Na slici 66. prikazana je veza tranzistora sa zajedničkim emitorom. Naizmenični signal u_b dovodi se između baze i emitora, a pojačani signal u_c uzima se između kolektora i emitora.

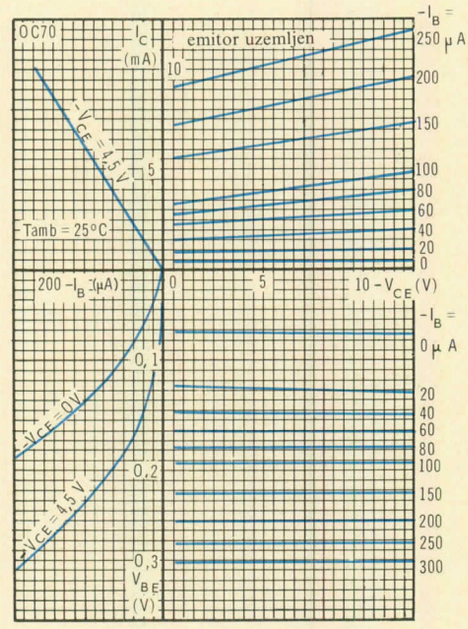
• Baza se polariše pomoću razdelnika napona, vezanog između krajeva izvora napajanja kolektora V_{CC}. Zbir otpora R_1 i R_2 treba da bude dovoljno velik, kako bi se ograničila potrošnja samog razdelnika. Zbog svog lakog prilagođavanja, ovaj postupak polarizacije se najviše koristi.



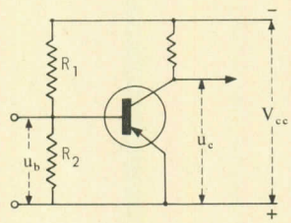
Sl. 63. — Shema za snimanje karakteristika tranzistora u vezi sa zajedničkim kolektorom.



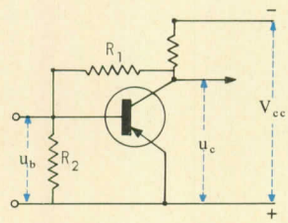
Sl. 64. — Osnovne karakteristike tranzistora.



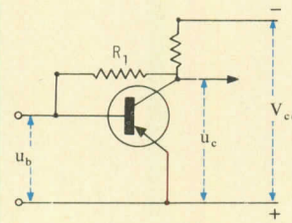
Sl. 65. — Skup karakteristika tranzistora OC 70.



Sl. 66. — Polarizacija baze tranzistora pomoću razdelnika napona koji je priključen na napon napajanja kolektora.



Sl. 67. — Polarizacija baze tranzistora pomoću razdelnika napona između emitora i kolektora.



Sl. 68. — Polarizacija baze tranzistora pomoću otpora između baze i kolektora.

• Moguće je postaviti razdelnik i između kolektora i emitora *(sl.* 67). U ovom slučaju, deo izlaznog napona u_c vraća se na ulaz pojačavača, što smanjuje pojačanje. Ova pojava, koja se naziva *negativna povratna sprega*, ima povoljnu osobinu da smanjuje izobličenja.

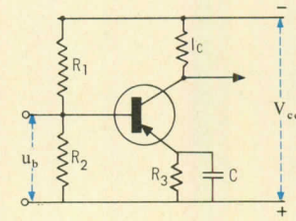
• Kod poslednjeg načina polarizacije baza se vezuje na kolektor preko otpora R_1 *(sl.* 68). Ova shema se dobija iz prethodne ako se izostavi otpor R_2. Struja baze, koja protiče kroz otpor R_1 daje potreban pad napona za održavanje baze na odgovarajućem potencijalu.

Postupak temperaturne stabilizacije. Jedan od najefikasnijih načina temperaturne stabilizacije tranzistora sastoji se u postavljanju otpora R_3 na red sa emitorom *(sl.* 69). Pri porastu kolektorske struje, napon na emitoru takođe raste u odnosu na zajedničku tačku, čime se smanjuje razlika potencijala između baze i emitora. Ovo dovodi i do smanjenja struje baze, čime se sprečava porast kolektorske struje I_C. Međutim, ovim postupkom se uvodi povratna sprega, koja znatno smanjuje pojačanje. To se sprečava premoštavanjem emitorskog otpornika kondenzatorom C velike kapacitivnosti. Kondenzator propušta naizmenični signal, čime sprečava njegov uticaj na ulaz.

Prekomerno zagrevanje tranzistora može da dovede do njegovog razaranja. Disipacija energije u tranzistoru najveća je na kolektorskom spoju. Stoga je najčešće kolektor zalemljen za metalno kućište kako bi se lakše odvodila razvijena toplota. Disipacija energije na kolektoru jednaka je proizvodu struje i unutrašnjeg pada napona između kolektora i emitora. Disipacija ne postoji ako je ma koji od ovih činilaca jednak nuli. Ona ima maksimalnu vrednost kada je unutrašnji pad napona u tranzistoru jednak padu napona na otporu opterećenja. Neophodno je da se omogući odgovarajuće odvođenje toplotne energije razvijene na kolektoru, da se ne bi premašila dozvoljena temperatura tranzistora koju propisuje proizvođač. Lako je odrediti temperaturu koju dostiže kolektor koristeći *toplotnu otpornost*, koja se daje u podacima za svaki tranzistor. Toplotna otpornost se izražava u Celzijusovim stepenima po vatu, odnosno po milivatu za tranzistore male snage. To je razlika temperature spoja i temperature okoline u kojoj se nalazi tranzistor, pri disipaciji na kolektoru od 1 W, odnosno 1 mW. Ako dostignuta temperatura prelazi dozvoljenu granicu, potrebno je smanjiti disipaciju na kolektoru ili postaviti tranzistor na hladnjak, koji omogućuje bolje odvođenje razvijene energije.

Disipacija toplotne energije predstavlja ključni problem tranzistorskih uređaja, naročito kod onih koji koriste tranzistore velike snage, ili su predviđeni za rad u sredini sa povišenom temperaturom, ili tamo gde je otežana toplotna razmena sa okolinom (rad na velikim visinama ili izvan atmosfere). U takvim slučajevima može biti potrebno da se predvide rashladni uređaji da bi se snizila temperatura tranzistorskih uređaja. Maksimalna temperatura koju izdržava spoj kod germanijumskih tranzistora nalazi se, zavisno od tipa, između 75°C i 90°C. Ova temperatura kod silicijumskih tranzistora leži između 150°C i 175°C.

Granična učestanost. Pri povećanju učestanosti signala koji se dovodi na upravljačku elektrodu tranzistora, uočava se opadanje strujnog pojačanja, što ograničava mogućnosti primene tranzistora. Učes-



Sl. 69. — Temperaturna stabilizacija tranzistora pomoću otpora vezanog na red sa emitorom.

tanost pri kojoj strujno pojačanje pada na 70% svoje vrednosti pri niskoj učestanosti naziva se *granična učestanost*. Tranzistor se može koristiti i na učestanostima višim od granične, ukoliko je prihvatljiva činjenica da je njegovo pojačanje znatno smanjeno. Kod prvih tranzistora je granična učestanost bila vrlo niska, i neprimenljivost tranzistora za rad na visokim učestanostima predstavljala je njihov ozbiljan nedostatak; na primer, prvi tranzistorski radio-prijemnici nisu imali kratkotalasno područje.

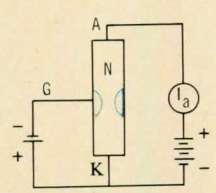
Znatan napredak tehnologije i primena novih metoda proizvodnje doveli su do proizvodnje različitih tipova tranzistora, kao što su drift, meza i planarni tranzistori. Vreme prelaska elektrona ovih tranzistora znatno je skraćeno, tako da je i na vrlo visokim učestanostima moguće dobiti zadovoljavajuće pojačanje. Sada se proizvode tranzistori koji rade na učestanostima od više stotina megaherca, tako da ih je moguće koristiti u televizijskim prijemnicima frekventno modulisanih radio-signala. U toku su istraživanja koja će omogućiti da se oni koriste i u oblasti vrlo kratkih talasa.

Tranzistori snage. Tranzistori kod kojih je kolektorska disipacija manja od 1 W obično se smatraju tranzitorima male snage. Ako snage prelaze 1 W, radi se o tzv. *tranzistorima snage*. Proizvode se germanijumski tranzistori sa disipacijom od stotinjak vati a izvesni tipovi silicijumskih tranzistora mogu da razviju i 300 W.

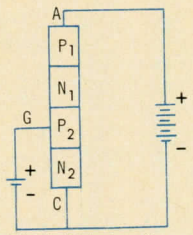
Tranzistori sa efektom polja. Tranzistor sa efektom polja, koji se ponekad naziva i *unipolarni tranzistor*, sastoji se od štapića poluprovodnika N tipa, koji po sredini ima žleb ili suženje. Na suženju štapića ugrađen je poluprovodnik P tipa, koji sa štapićem obrazuje PN spoj. Krajevi štapića nazvani su katoda (K) i anoda (A) (*sl.* 70). Kada se na krajevima štapića priključi napon, ostvaruje se protok struje I_a. Ako se na tranzistor sa efektom polja P tipa između katode i elektrode G priključi negativan napon, PN spoj biće intenzivno polarisan. Tako ostvareno polje odbija elektrone i obrazuje oblast bez slobodnih nosilaca, koja se prostire od PN spoja prema sredini štapića. Sužena oblast kroz koju protiču elektroni naziva se kanal. Sa povećanjem inverzne polarizacije PN spoja smanjuje se efektivni presek kanala, a time i struja između katode i anode. Princip rada tranzistora sa efektom polja može se potpuno uporediti sa radom triode, pri čemu elektroda G ima ulogu upravljačke elektrode. Za tranzistor sa efektom polja može se definisati i strmina na isti način kao i kod elektronskih cevi — kao promena anodne struje u miliamperima pri promeni napona upravljačke elektrode od 1 V. Pošto dovedeni upravljački napon polariše PN spoj u inverznom smeru, ulazna impedansa komponente je vrlo visoka, što je bitna osobina za izvesne primene.

TIRISTORI. Tiristori su poluprovodničke silicijumske komponente sa četiri uzastopne oblasti PNPN. Komponenta se ponaša kao pravi prekidač koji pomoću vrlo male upravljačke struje može vrlo brzo da prelazi iz neprovodnog u provodno stanje, i obratno. U prodaji ove komponente su poznate pod različitim nazivima, na primer: tiristor, trinistor, tirator, čvrst tiratron i kontrolisani ispravljač.

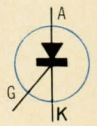
Način rada tiristora (naziv je usvojen u skladu sa preporukom Udruženja proizvođača elektronskih cevi i poluprovodnika u Francuskoj) može se uporediti sa radom tiratrona. Tiristor se sastoji od četiri poluprovodne oblasti P_1, N_1, P_2, N_2 (*sl.* 71). Dva spoljašnja sloja predstavljaju anodu A i katodu K ovog sistema, a sloj P_2 upravljačku elektrodu G, *okidač* ili *vrata* (engl. *gate*).



Sl. 70. Tranzistor sa efektom polja.

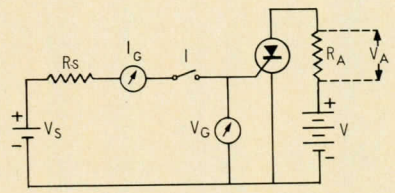


Sl. 71. *Polarizacija* tiristora.

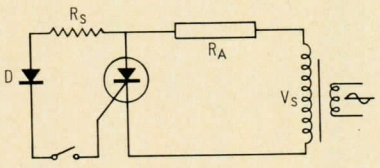


Sl. 72. — Oznaka za predstavljanje tiristora.

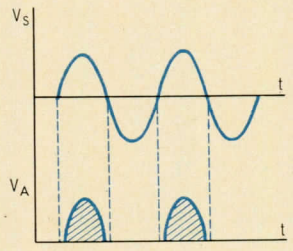
(A, anoda; K, katoda; G, *vrata*.)



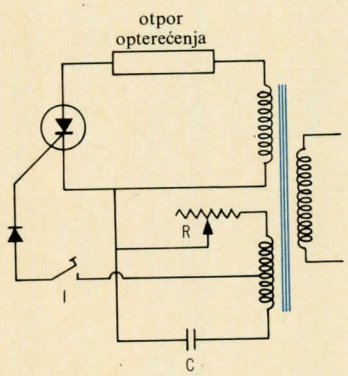
Sl. 73. — Upravljanje paljenjem tiristora koji se napaja jednosmernom strujom.



Sl. 74. — Upravljanje paljenjem tiristora koji se napaja naizmeničnom strujom.



Sl. 75. — Promena napona V_A na otporu opterećenja. Ovaj napon se javlja tek kad trenutna vrednost napona napajanja V_S dostigne određenu veličinu.



Sl. 76. — Upravljanje paljenja tiristora pomoću razlike faza anodnog i upravljačkog napona. Kondenzator C i promenljivi otpor R omogućuju da se menja fazni ugao napona koji se dovodi na rešetku.

Simbol za tiristor koji se koristi u električnim shemama prikazan je na *sl.* 72. Kao kod germanijumskih i silicijumskih dioda, i kod tiristora postoji »propusni« ili direktni smer, od anode ka katodi, i »nepropusni« ili inverzni smer. Ako se između anode i katode priključi napon u direktnom smeru, kroz tiristor ipak ne prolazi struja, ukoliko je unutrašnji spoj N_1P_2 polarisan u inverznom smeru. Međutim, ako se između P_2 i N_2 priključi mali pozitivni napon, što znači da se ovaj spoj polariše u propusnom smeru, kroz njega se uspostavlja struja. Izvestan broj šupljina kretaće se difuzijom kroz srednji spoj P_2N_1, usled čega on postaje provodan i trenutno se uspostavlja struja između anode i katode. Tiristor time postaje provodan ili »upaljen«, i može da propušta struju od više desetina ampera, pri čemu je na njemu vrlo mali pad napona, npr., 2 V. Prelaz iz zakočenog u provodno stanje može biti vrlo brz, i može se izvršiti upravljačkim impulsom trajanja nekoliko mikrosekundi.

Kao i u slučaju tiratrona, upravljačka elektroda tiristora nema više nikakvog uticaja čim je tiristor upaljen; da bi se tiristor ponovo zakočio, »ugasio«, mora anodna struja da se snizi ispod određene kritične vrednosti. Najmanja vrednost anodne struje koja je potrebna da se održi provođenje tiristora naziva se *struja održavanja*. Na slici 73. prikazana je osnovna shema kola za okidanje tiristora jednosmernom strujom. Između anode i katode tiristora priključen je napon napajanja V. Izvor napona V_S može se preko otpornika R_s priključiti na upravljačku elektrodu. Čim se zatvori prekidač I, tiristor postaje provodan i na otporniku R_A javlja se napon V_A. Napon V_s i upravljačka struja I_G biraju se tako da prelaze najmanje potrebne vrednosti napona i struja za paljenje tiristora na najnižoj radnoj temperaturi. U tom slučaju paljenje tiristora je pri svim višim temperaturama tim pre obezbeđeno.

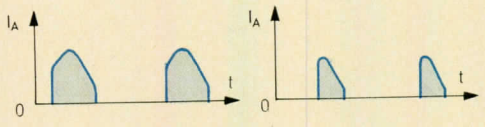
Naizmenično napajanje. U većini primena, anoda tiristora napaja se naizmeničnim sinusoidalnim naponom V_s preko otpora opterećenja R_A. Prednost ovakvog napajanja leži u činjenici da se tiristor sam gasi po prestanku svake pozitivne poluperiode. Paljenje tiristora može da se ostvari pomoću pozitivne poluperiode napona koji se dovodi na anodu; najčešće se napon za paljenje uzima sa anode preko otpora R_s (*sl.* 74). Dioda D, koja se nalazi u kolu upravljačke elektrode, propušta upravljačku struju, ali ne dozvoljava protok struje u inverznom smeru za vreme negativne poluperiode napona napajanja. Kada je tiristor u provodnom stanju, upravljačko kolo je praktično kratko spojeno, i kroz upravljačku elektrodu protiče zanemarljivo mala struja.

Talasni oblik napona na otporniku R_A prikazan je na slici 75. Ovaj napon je kraći od vremena cele poluperiode sinusoide, pošto tiristor počinje da provodi tek kad struja upravljačke elektrode dostigne dovoljnu vrednost. Međutim, to kašnjenje je dovoljno malo da se njegov uticaj na efektivnu vrednost ispravljene struje može zanemariti.

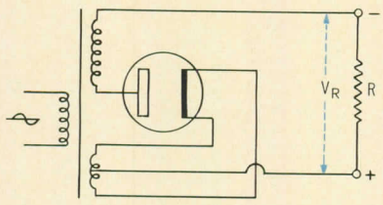
Da bi se mogla menjati efektivna vrednost ispravljene struje, na rešetku se dovodi naizmenični napon promenljive faze. Princip ovog postupka upravljanja dat je na *sl.* 76. Zavisno od faze upravljačkog napona, do paljenja tiristora dolazi sa većim ili manjim kašnjenjem, što omogućuje podešavanje snage koja se daje potrošaču (*sl.* 77).

Drugi način upravljanja, koji se često koristi, sastoji se u dovođenju na rešetku kratkih pozitivnih impulsa čija se faza može podešavati.

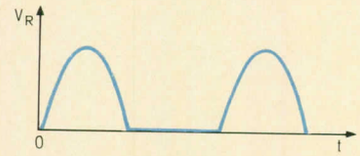
Područje primene tiristora se jako proširilo za vrlo kratko vreme. Tiristori su u mnogim slučajevima



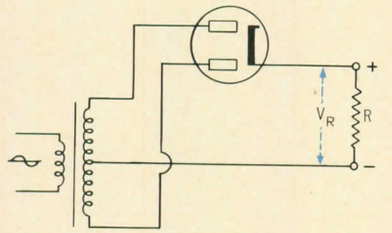
Sl. 77. — Struje tiristora pri dve različite faze napona dovedenog na rešetku.



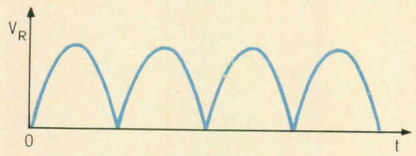
Sl. 78. — Shema ispravljača koji koristi cev sa jednom anodom i direktnim grejanjem. Ispravlja se samo jedna poluperioda naizmeničnog napona.



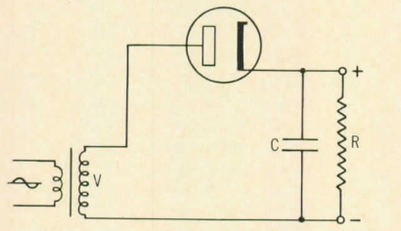
Sl. 79. — Napon ispravljen pomoću cevi sa jednom anodom.



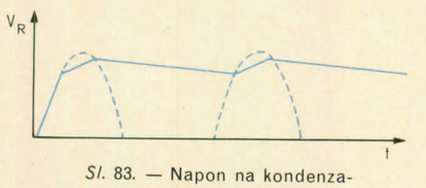
Sl. 80. — Ispravljač koji koristi indirektno grejanu cev sa dve anode. Ispravljaju se obe poluperiode naizmeničnog napona.



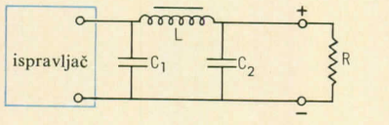
Sl. 81. — Napon ispravljen pomoću cevi sa dve anode (dvostrano ispravljanje).



Sl. 82. — Shema ispravljača sa jednostranim ispravljanjem i filtriranjem pomoću kondenzatora u paraleli sa opterećenjem.



Sl. 83. — Napon na kondenzatoru za filtriranje.



Sl. 84. — π-filter postavljen između ispravljača i potrošača.

zamenili gasne tiratrone, ignitrone, tranzistore snage i magnetne pojačavače. Oni su doneli neosporan napredak u izgradnji industrijskih ispravljača i regulatora brzine. Takođe se koriste za pravljenje pretvarača, koji imaju suprotan zadatak od ispravljača, odnosno dobijanje naizmenične struje iz jednosmernog izvora napajanja. Tako se ostvaruju generatori, koji su u stanju da sa kašnjenjem manjim od desetog dela sekunde zamene napajanje iz električne mreže u slučaju kvara na dovodu. Ovakvi pretvarači su dragoceni u slučajevima gde bi nestanak mrežnog napajanja mogao imati ozbiljne ili čak i dramatične posledice — u železničkoj signalizaciji, vođenju aviona, snabdevanju hirurških operacionih sala električnom energijom itd. Polifazni ispravljači koji napajaju velike motore mogu se ostvariti na principu pretvarača, tako da se pri kočenju motora vraća energija u mrežu.

Osnovna elektronska kola

OSNOVNA KOLA. Bez obzira na svoju namenu i složenost, svi elektronski uređaji sastavljeni su od izvesnog broja osnovnih kola, koja su međusobno povezana na odgovarajući način.

Tako se ostvaruju uređaji koji mogu obavljati složene funkcije: napajanje drugih kola, stabilizaciju, pojačanje, generisanje signala različitih oblika, vremensko kašnjenje, prekidanje itd. Ova kola obično su zasnovana na jednostavnim osnovnim shemama, a njihovi elementi zavise od osobina koje se žele postići.

KOLA SA ELEKTRONSKIM CEVIMA

ISPRAVLJAČI SA VAKUUMSKIM CEVIMA. Diode se koriste kao ispravljači za napajanje anodnih kola u elektronskim uređajima, naročito ako se radi sa malim snagama. Ovi ispravljači obično sadrže jednu cev sa direktnim grejanjem, koja ima jednu ili dve anode. Cevi sa jednom anodom ispravljaju samo jednu poluperiodu, dok cevi sa dve anode služe za ispravljanje obe poluperiode naizmenične struje.

Na slici 78. prikazana je shema ispravljača, koji koristi direktno grejanu cev samo sa jednom anodom. Ispravljeni napon V_R, koji se dobija na krajevima + i — ispravljača, služi za napajanje nekog kola, koje je predstavljeno otporom R. Oblik ispravljenog napona prikazan je na *sl.* 79.

Na *sl.* 80. predstavljena je shema ispravljača kod koga je upotrebljena indirektno grejana cev sa dve anode. Radi uprošćenja, kolo grejanja katode nije prikazano na shemi, a isti princip je sproveden i u daljem tekstu. Oblik napona koji se dobija iz ispravljača sa dve anode prikazan je na *sl.* 81.

Ako se naizmenični napon efektivne vrednosti V priključi na anodu (odnosno na svaku od anoda) ispravljača, amplituda ispravljenog napona trebalo bi da iznosi $V\sqrt{2}$, u slučaju da se otporniku R ne predaje nikakva snaga. U stvari, maksimalna vrednost ispravljenog napona manja je od $V\sqrt{2}$ usled omskog pada napona u transformatoru i cevi.

Ispravljena struja, koja se sastoji od niza talasa, ne može da se smatra kao strogo jednosmeran izvor struje. Potrebno je odstraniti periodično talasanje, čime će se dobiti približno jednosmerna struja, koja sadrži što je moguće manju naizmeničnu komponentu. To se postiže postupkom filtriranja. Najprostiji filter sastoji se od kondenzatora C vezanog na izlazne priključke ispravljača (*sl.* 82). Kapacitivnost ovog kondenzatora mora da bude dovoljno velika, kako bi se sprečilo prekomerno opadanje napona za vreme negativne poluperiode. Na slici 83. prikazan je oblik napona na takvom kondenzatoru. Može se smatrati da ovde postoji jednosmerni napon, kome je superponiran talasasti napon mrežne učestanosti. U slučaju ispravljanja obe poluperiode, učestanost talasanja biće jednaka dvostrukoj mrežnoj učestanosti.

Talasnost napona stvarno je srazmerna struji koju ispravljač daje kolu potrošača. Pri relativno velikoj potrošnji talasnost napona se mnogo povećava.

Povećavanje kondenzatora radi smanjivanja talasnosti napona ne daje zadovoljavajuće rešenje, zbog njegove glomaznosti, težine i cene. Osim toga, i cev bi morala da daje preterano veliku struju da bi se ovaj kondenzator mogao napuniti u malom delu pozitivne poluperiode.

Stoga se pribegava postupku filtriranja pomoću π—*filtra*, koji sadrži rednu induktivnost L i paralelnu vezu kondenzatora C_1 i C_2 (*sl.* 84). Kondenzator C_1 ima ulogu rezervoara, koji se periodično dopunjava preko ispravljača, a preko induktivnosti neprekidno napaja strujom kolo potrošača. Ovde je iskorišćena osobina induktivnosti da se suprotstavlja promeni struje koja kroz nju prolazi. Kondenzator C_2 takođe doprinosi smanjenju talasnosti struje.

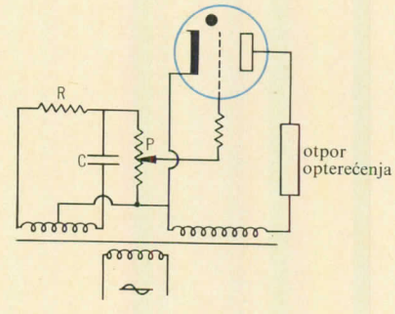
Za napajanje pojačavača, radio-prijemnika i malih predajnika najčešće se koristi ispravljač sa dve anode, pri čemu se filtriranje obavlja π—filtrom. Kondenzatori u filtru imaju kapacitet 8 do 50 μF, a induktivnost je reda desetak henrija. Negativni pol ispravljača obično se vezuje na masu šasije uređaja, a ponekad se i uzemljuje.

ISPRAVLJAČ SA GASNIM CEVIMA. Zbog svog izvanrednog stepena korisnog dejstva gasne cevi se koriste u ispravljačima različitih tipova, pri čemu mogu da se postignu i najveće snage.

Ispravljač sa fanotronima. Fanotroni se upotrebljavaju za ispravljanje struja koje mogu da dostignu do 20 A, dok je maksimalni inverzni napon ograničen na 20 000 V. Ispravljači sa fanotronima posebno se upotrebljavaju kad srednja ispravljena snaga ostaje praktično konstantna. Opšta shema je ista kao za vakuumske cevi, a ista je i namena upotrebljenih filtera. Za ispravljače sa fanotronima najvećih snaga koristi se trofazno ili čak šestofazno napajanje, što olakšava problem filtriranja.

Ispravljač sa tiratronima. Velika prednost ispravljača sa tiratronima je da omogućuje lako podešavanje ispravljene snage pomoću upravljanja na rešetki. Upravljanje na rešetki tiratrona može se obaviti na više načina, bilo pomoću naizmeničnog napona promenljive amplitude, bilo pomoću naizmeničnog napona konstantne amplitude i promenljive faze, bilo pomoću konstantnog naizmeničnog napona koji se sabira sa jednosmernim naponom koji se podešava.

Shema na slici 85. pokazuje princip ispravljača kojim se upravlja pomoću promene amplitude naizmeničnog napona na rešetki cevi. Ovaj napon je fazno pomeren pomoću kola RC. Potenciometar P omogućuje podešavanje amplitude dovedene na rešetku cevi kao i pomeranje tačke t_1 koja predstavlja presek napona rešetke i kritičnog napona paljenja (*sl.* 86). Ako se želi da se izazove paljenje tiratrona u tačno određenoj tački pozitivne poluperiode anodnog napona, to se postiže pomoću kratkotrajnog pozitivnog impulsa napona koji se dovodi na re-



Sl. 85. — Ispravljač kojim se upravlja pomoću amplitude napona na rešetki.

šetku. U ovom slučaju, kriva rešetkinog napona, skoro pod pravim uglom, seče kritičnu krivu, što izaziva paljenje, koje je skoro nezavisno od uvek mogućih promena anodnog napona i temperature. Slika 87. pokazuje shemu principa ovog postupka paljenja.

Rešetka tiratrona obično je inverzno polarisana pomoću negativnog napona. Impulsni transformator omogućuje da se na rešetku dovedu kratki pozitivni impulsi, koji okidaju tiratron. Primar impulsnog transformatora napaja se naponom čija faza može da se podešava.

Shema na slici 88. predstavlja monofazni ispravljač koji ispravlja obe poluperiode naizmeničnog napona. Ovde se vrednost ispravljenog napona određuje promenom otpornika R, koji zajedno sa kondenzatorom C obrazuje kolo za podešavanje faze.

Ako je ispravljač namenjen za napajanje elektronskih kola, iza njega mora da se nalazi sistem za filtriranje.

Na isti način pravi se i trofazni ispravljač, koji koristi tri tiratrona i trofazni sistem za pomeranje faze.

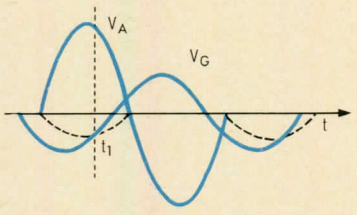
Pretvarači sa tiratronima. Tiratroni omogućavaju pravljenje pretvarača koji jednosmerni napon transformišu u naizmenični. Potrebno je da se koriste dva tiratrona, koji »seckanjem« jednosmerne struje propuštaju periodične impulse struje u izlazno kolo. Budući da impulsi nisu sinusoidalni, najčešće je potrebno da se postavi na red prigušnica koja smanjuje amplitudu harmonika.

Shema na slici 89. prikazuje princip pretvarača koji jednosmerni napon izvora V_B pretvara u naizmenični. Kondenzator C služi da svaki tiratron naizmenično prebaci iz provodnog u neprovodno stanje. Učestanost dobijenog naizmeničnog napona jednaka je učestanosti koja se dobija iz generatora G_f, čiji se naizmenični napon dovodi na rešetke tiratrona. Ovaj generator male snage može da bude oscilator sa vakuumskom cevi. Namotaj L služi da smanji amplitudu harmonika koji se stvaraju za vreme naglog uspostavljanja ili prekidanja struje u tiratronu.

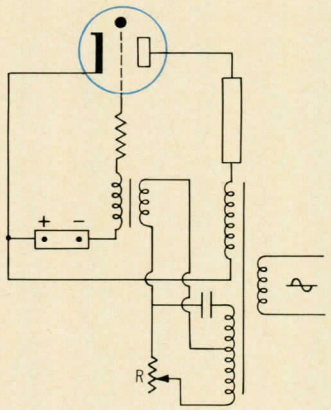
Ignitroni i ispravljači sa živinom parom sa upravljačkom rešetkom omogućuju da se naprave pretvarači napona velike snage.

Ispravljač sa ignitronima. Ovi ispravljači su namenjeni za napajanje potrošača velike snage (do 1 000 kW) i strujom od nekoliko hiljada ampera. Oni su od velike koristi u nekim industrijskim oblastima (električna vuča, upravljanje električnim pećima i motorima za valjanje, elektroliza u proizvodnji aluminijuma itd.), pošto njihova neosetljivost na kratkotrajna preopterećenja obezbeđuje veliku sigurnost rada. Kao i kod tiratrona, određivanje trenutka paljenja upravljačkim naponom omogućuje precizno podešavanje ispravljene struje.

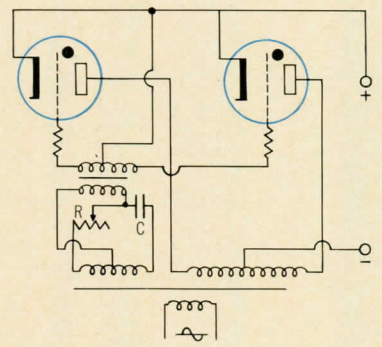
Za ispravljače velikih snaga najčešće se na ignitron dovodi pozitivan napon posredstvom tiratrona, čija rešetka dobija naizmenični napon promenljive faze. Tako je moguće da se sa izvanrednom tačnošću upravlja i podešava vrlo velika snaga pomoću potenciometra malih dimenzija. Shema na slici 90. pokazuje princip takvog podešavanja na jednoj fazi trofaznog ispravljača.



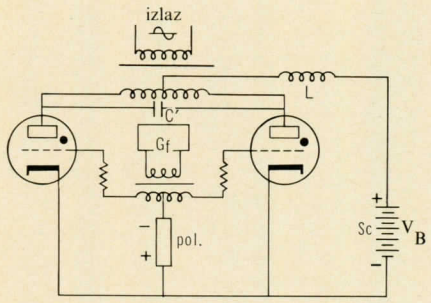
Sl. 86. — Podešavanje trenutka t_1 paljenja ispravljača promenom amplitude napona rešetke V_G.



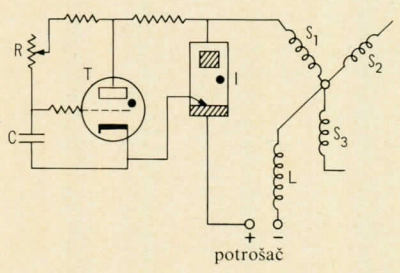
Sl. 87. — Upravljanje paljenjem tiratrona podešavanjem faze pozitivnog impulsa dovedenog na rešetku. (Ova faza se menja zavisno od veličine promenljivog otpora R.)



Sl. 88. — Ispravljač sa podešavanjem veličine izlaznog napona.



Sl. 89. — Pretvarač napona sa tiratronima.



Sl. 90. — Upravljanje pomoću tiratrona jednim od ignitrona trofaznog ispravljača. (S_1, S_2 i S_3 su sekundarni namotaji trofaznog mrežnog transformatora. Qtpor R i kondenzator C obrazuju kolo za podešavanje faze napona koji se dovodi na rešetku tiratrona. Induktivnost L koristi se za prigušenje harmonika.)

Tri namotaja sekundara S_1, S_2 i S_3 transformatora za napajanje povezana su u zvezdu. Ignitron I obezbeđuje ispravljanje struje namotaja S_1. Namotaj L smanjuje talasnost ispravljene struje. Paljenje ignitrona izazvano je pomoću tiratrona T, koji, dok je provodan, obezbeđuje pozitivan napon ignitoru ignitrona. Trenutak paljenja tiratrona T podešava se promenom faze naizmeničnog napona koji se dovodi na njegovu rešetku. Ova faza se podešava okretanjem reostata R.

Pritisak živine pare u ignitronu zavisi od njegove temperature. Zaista, problem hlađenja ignitrona ima veliku važnost za ignitrone snage. Termoregulatori postavljeni u sistem za hlađenje vodom određuju njen protok zavisno od temperature tela u unutrašnjosti ignitrona. Odsustvo vode ili nenormalan rad termoregulatora prouzrokuju isključivanje ispravljača.

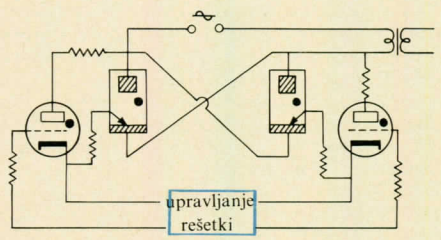
Prekidači sa ignitronima. U izvesnom broju primena, npr., u upravljanju mašinama za varenje, naizmeničnim motorima, grejanjem peći kupatila, ignitron se ne koristi kao ispravljač, već kao prekidač. Kako svaki element propušta struju samo u jednom smeru, koriste se dva elementa postavljena u antiparalelnu vezu (vezuju se antiparalelno). Ovaj sistem ima prednost da se upravljanje prekidača ostvaruje dovođenjem smanjenog napona na rešetku tiratrona, što zahteva samo malu snagu u odnosu na ukupnu snagu kojom se upravlja. Zatvaranje ovog elektronskog prekidača može da se izazove u tačno određenom trenutku periode naizmenične struje, što omogućuje preciznu regulaciju propuštene snage. Nikakav prekidač sa elektromagnetnim upravljanjem ne bi mogao da radi sa takvom preciznošću.

Na *sl.* 91. prikazana je shema principa prekidača sa ignitronima, koji su postavljeni na red sa primarom transformatora. Paljenje jednog od ignitrona, što odgovara zatvaranju prekidača, izazvano je pomoću odgovarajućeg tiratrona.

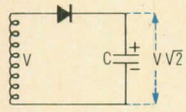
Gašenje nastaje pri kraju poluperiode naizmenične struje, osim ako sistem za upravljanje rešetkama tiratrona ne izazove paljenje drugog ignitrona. U tom slučaju, proticanje struje obezbeđeno je sukcesivno jednim ili drugim ignitronom, sve dok im sistem za upravljanje tiratronima dozvoljava paljenje.

POLUPROVODNIČKI ISPRAVLJAČI. Poluprovodnički ispravljači sve više zamenjuju ispravljače sa vakuumskim ili gasnim cevima. Pojava silicijumskih dioda izazvala je pravi preokret u elektronici. Usled svog izvanrednog stepena korisnog dejstva, svoje male zapremine, svoje mehaničke čvrstoće i svog dugog veka, one su se nametnule u velikom broju industrijskih primena. Dodavanjem upravljačke elektrode, pretvara se jednostavna obična dioda u tiratron, koji omogućuje da se naprave ispravljači čiji se izlazni napon može podešavati, što otvara ogromnu oblast primene u upravljanju mašinama svih snaga. Automatsko upravljanje mašinama doprinosi jednostavnosti i sigurnosti njihovog rada.

Ispravljači sa silicijumskim diodama. Na slici 92. prikazano je nekoliko uobičajenih shema ovih ispravljača.

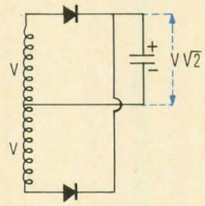


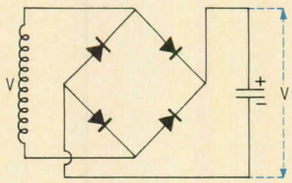
Sl. 91. — Prekidač naizmenične struje ostvaren pomoću »antiparalelne« veze dva ignitrona.

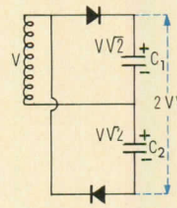


Sl. 92 a. — Ispravljanje jedne poluperiode monofaznog napona.

Sl. 92b$_1$. i *sl.* 92b$_2$ *(desno)* predstavljaju ispravljanje obe poluperiode monofaznog napona.







Sl. 92c. — Ispravljanje obe poluperiode naizmeničnog napona. Udvajač napona (Laturova shema).

Montaža različitih ispravljača

• *Jednostrano ispravljanje monofaznog napona.* Maksimalni napon ispravljene poluperiode je $V\sqrt{2}$, gde je V efektivna vrednost naizmeničnog napona dovedena na ispravljač. Kondenzator C, vezan između pozitivnog i negativnog izvoda izlaza ispravljača puni se na napon $V\sqrt{2}$ *(sl.* 92a).

• *Dvostrano ispravljanje monofaznog napona.* Koristi:

— ili transformator čiji sekundar daje napon 2 V i ima srednji izvod; maksimalni ispravljeni napon je i ovde $V\sqrt{2}$ (*sl.* 92b$_1$);

— ili transformator čiji sekundar daje napon V. Struje stvorene uzastopnim poluperiodama slede različite puteve u mostu, pri tome svaki put sadrži dva redno vezana ispravljača *(sl.* 92b$_2$).

• *Dvostrano ispravljanje, udvajač napona (shema Latur).* Transformator daje napon V: svaka uzastopna poluperioda puni jedan od dva kondenzatora C_1 i C_2 na maksimalni napon $V\sqrt{2}$. S obzirom da su ovi kondenzatori vezani na red, raspoloživi napon iznosi $2V\sqrt{2}$ (*sl.* 92c).

• *Dvostrano ispravljanje, udvajač napona (shema Šenkel).* Transformator daje napon V. U prvoj poluperiodi puni se kondenzator C_1 preko diode D_1 na napon $V\sqrt{2}$. U drugoj poluperiodi na kondenzator C_2 preko diode D_2, dovodi se napon $V\sqrt{2}+V\sqrt{2}$, odnosno $2V\sqrt{2}$ (sl. 92d).

• *Dvostrano ispravljanje. Umnožavanje napona.* Ovo kolo (*sl.* 92e) predstavlja proširenje prethodnih shema. Budući da je kondenzator C_2 napunjen na napon $2V\sqrt{2}$, dodavanje kondenzatora C_3 i diode D_3 omogućuje da se na kondenzator C_3 dovede napon $V\sqrt{2}+2V\sqrt{2}-V\sqrt{2}$, tako da se C_3 puni na napon $2V\sqrt{2}$. Raspoloživi napon između tačaka A i B je $3V\sqrt{2}$, a između tačaka D i F on iznosi $4V\sqrt{2}$. Dodajući prema istom principu po jedan kondenzator i diodu, raspoloživi napon povećava se za $2V\sqrt{2}$. Dakle, na taj način se mogu dostići vrlo visoki ispravljeni naponi.

Diode u paraleli. U slučaju ispravljača za velike snage potrebno je da se paralelno spregnu dve ili više dioda u svakoj grani ispravljača. Da bi se dobila dobra raspodela struja u diodama, neophodno je da se različite diode vezane u paralelu, odaberu prema srednjoj struji u propusnom smeru; drugim rečima, one treba da imaju istu srednju struju u propusnom smeru za praktično iste direktne napone. U slučaju paralelnog vezivanja dioda neophodno je da se maksimalna dozvoljena struja uzme u račun sa koeficijentom smanjenja bar 0,85.

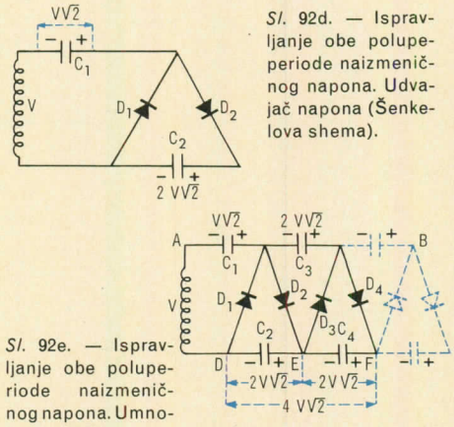
Diode u seriji. Za ispravljanje visokih naizmeničnih napona često je potrebno da se više dioda postavi na red. U tom slučaju neophodno je da se izjednače inverzni naponi kojima je izložena svaka dioda. Stoga treba paralelno svakoj diodi postaviti otpornik velike vrednosti, koji je ipak manji od inverzne otpornosti diode. Tada se inverzni napon raspoređuje skoro podjednako na sve diode. Ukupna inverzna struja koja prolazi kroz diode i njima paralelne otpore zanemarljiva je u odnosu na struju u provodnom smeru.

Upravljanje tiristorima. U opštem slučaju, postupci paljenja tiristora analogni su postupcima koji se već koriste kod tiratrona. Najčešće se koristi upravljanje pomoću pomeraja faze upravljačkog napona *(sl.* 93). Vreme provođenja je utoliko manje ukoliko je pomeraj faze veći. Moguće je da se iskoriste obe poluperiode mrežnog napona korišćenjem samo jednog sistema za pomeranje faze *(sl.* 94).

U nekim slučajevima može da bude korisno da se paljenje izazove pomoću zasićene induktivnosti. Na *sl.* 95. prikazana je principska shema ovog postupka. Zasićena induktivnost sadrži dva namotaja na zajedničkom jezgru: namotaj induktivnosti L, koji se napaja naizmeničnom strujom iz mreže ispravljenom pomoću diode D, i namotaj kroz koji teče struja I_c, koja se podešava.

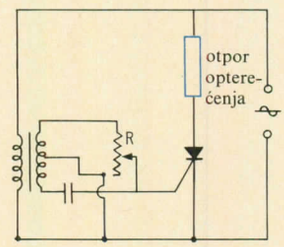
Ako je struja I_c jednaka nuli, struja kroz namotaj L, je vrlo mala usled velike vrednosti induktivnosti L. Ako struja I_c raste, induktivnost L opada usled zasićenja magnetnog jezgra.

Izvesni magnetni materijali imaju oštru krivu zasićenja, što dozvoljava da se za male promene struje I_c dobije naponski impuls na rešetki dovoljan za paljenje tiristora.

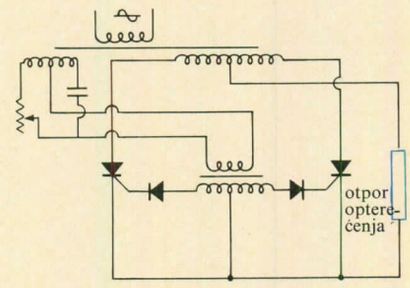


Sl. 92d. — Ispravljanje obe poluperiode naizmeničnog napona. Udvajač napona (Šenkelova shema).

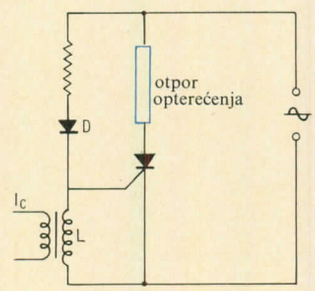
Sl. 92e. — Ispravljanje obe poluperiode naizmeničnog napona. Umnožač napona.



Sl. 93. — Princip upravljanja paljenjem tiristora korišćenjem faznog pomeraja. (Trenutak paljenja se određuje podešavanjem vrednosti otpora R.)



Sl. 94. — Upravljanje paljenjem dva tiristora pomoću zajedničkog sistema za pomeranje faze.



Sl. 95. Upravljanje paljenjem dva tiristora pomoću jedne induktivnosti sa zasićenjem.

POJAČAVAČI. Pojačanje signala predstavlja operaciju koja se koristi u vrlo velikom broju oblasti: telekomunikacijama, snimanju i reprodukciji zvukova, snimanju i reprodukciji slika magnetnim putem, proučavanju fizičkih ili bioloških pojava koje se ne mogu neposredno posmatrati, upravljanju mehanizama pod uticajem malih promena različitih parametara (osvetljenosti, temperature, pritiska) itd. Bitna karakteristika pojačavača je njegova mogućnost da na izlazu ima veću snagu od one koja je dovedena na ulaz. Prirodno je da se efikasnost pojačavača meri pomoću odnosa snage na izlazu P_i i snage na ulazu P_u : $A=\frac{P_i}{P_u}$. Ovaj odnos se naziva pojačanje. Često je pogodnije izraziti pojačanje ne pomoću odnosa A, već pomoću dekadnog logaritma ovog odnosa. U ovom slučaju pojačanje se izražava u belima, ali kako je ova jedinica suviše velika obično se koristi njen deseti deo, koji se naziva decibel (simbol dB). Dakle

$$G \text{ (u decibelima)} = 10 \log A = 10 \log \frac{P_i}{P_u}.$$

Odnos snaga i napona koji odgovaraju pojačanjima izraženim u decibelima

Pojačanje u dB	$\frac{P_i}{P_u}$	$\frac{v_i}{v_u}$
1	1,26	1,12
2	1,58	1,26
3	1,99	1,41
4	2,54	1,58
5	3,16	1,78
6	3,98	1,99
10	10	3,16
20	100	10
30	1 000	31,6
40	10 000	100
50	100 000	316
60	1 000 000	1 000
70	10 000 000	3 160
80	100 000 000	10 000

Ako se snage P_u i P_i stvaraju na jednakim otpornicima i ako su naponi na krajevima ovih otpornika v_u i v_i, onda je pojačanje dato sa:

$$A = \frac{P_i}{P_u} = \frac{v_i^2}{v_u^2} \text{ i } G = 20 \log \frac{v_i}{v_u}.$$

Kad su dva pojačavača postavljena jedan za drugim, njihovo pojačanje izraženo u decibelima jednako je zbiru pojedinačnih pojačanja.

Razni tipovi pojačanja. Prvo treba izdvojiti pojačavače naizmeničnih napona male učestanosti od nekoliko desetina herca, i pojačavače gotovo jednosmernih napona, odnosno napona koji se vrlo sporo menjaju, tako da im je učestanost bliska nuli. U ovom drugom slučaju nastaju ozbiljni problemi ako je potrebno postići znatno pojačanje napona, što često vodi primeni raznih postupaka.

Princip rada pojačavača. Pojačavač sa elektronskim cevima radi, uglavnom, na sledeći način: signal koji treba pojačati dovodi se na rešetku cevi, koja se nalazi na negativnom potencijalu, nazvanom *negativni prednapon*. Promena potencijala na rešetki, pod uticajem dovedenog signala, izaziva promenu anodne struje, usled čega se menja napon na krajevima radne impedance. Promena napona na krajevima opterećenja predstavlja izlazni signal pojačavača.

Klase pojačavača. Prema vrednosti negativnog napona na rešetki elektronske cevi pojačavači se dele u više klasa: A, B, AB i C.

• *Pojačavač klase A (sl.* 96) ima prednapon rešetke V_G i naizmenični napon signala v_g koji su takvi da anodna struja I_A neprekidno teče za vreme cele periode naizmeničnog signala.

• *Pojačavač klase B (sl.* 97) ima prednapon rešetke V_G približno jednak prekidnom naponu, tako da je anodna struja I_A skoro jednaka nuli u odsustvu signala v_{ug} koji se dovodi na rešetku. Anodna struja I_A teče kroz cev samo za vreme pozitivne poluperiode signala.

• *Pojačavač klase AB (sl.* 98) radi u režimu rada između klase A i klase B. Anodna struja I_A prolazi za vreme koje je veće od jedne poluperiode signala v_g, ali u trajanju manjem od cele periode.

• *Pojačavač klase C* (*sl.* 99) ima prednapon rešetke V_G veći od prekidnog napona V_B. Dakle, anodna struja I_A protiče samo u jednom delu pozitivne poluperiode signala v_g. Stepen korisnog dejstva je veći u klasi B nego u klasi A, a najveći u klasi C.

Ako se zahteva pojačavač bez izobličenja, što je bitan uslov za reprodukciju zvuka, mogu se koristiti isključivo pojačavači klase A u stepenu koji sadrži samo jednu cev. S druge strane, pojačavači sa simetričnom spregom koji koriste dve cevi koje rade u opoziciji faza, mogu imati prednosti pri radu u klasi B ili u klasi AB.

Što se tiče ponašanja pojačavača u odnosu na učestanost korisnog signala, može se izvršiti podela na dve osnovne kategorije: aperiodični i selektivni pojačavači.

Aperiodični pojačavači, što znači neselektivni pojačavači, koriste se kada je potrebno ravnopravno pojačati sve električne signale, bez obzira na njihovu učestanost. Ovo je neophodno ako se želi da izlazni signal ima isti oblik kao i ulazni signal, pri čemu ima samo veću amplitudu. Prirodno je da se ova vrsta pojačavača koristi u svim aparatima za snimanje i reprodukciju zvuka i, u opštem slučaju, za uređaje koji treba verno da reprodukuju ulazni signal, kao što su npr. aparati za merenje, katodni oscilografi itd. Aperiodični pojačavač sastoji se jednostavno od pojačavačke cevi i otpornosti R_A, koja je postavljena na red sa anodnim kolom, pa se naziva pojačavačem sa *otpornim opterećenjem*. Shema takvog pojačavača sa triodom prikazana je na slici 100. Anodno kolo se napaja iz izvora napajanja V_B. Ulazni napon v_g, koji treba pojačati, dovodi se između rešetke i katode, dok se izlazni napon v_i dobija na krajevima otpornika R_A. Ova shema ima dva nedostatka:

1. Za vreme pozitivne poluperiode ulaznog signala v_g, rešetka postaje pozitivna, anodna struja se ne menja linearno sa v_g te pojačavač nema linearno pojačanje.

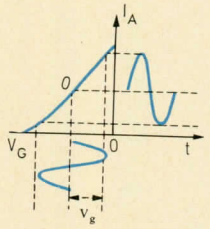
2. Na otporniku R_A, usled prolaska jednosmerne anodne struje, stvara se stalni pad napona, koji se sabira sa izlaznim signalom, pri čemu ga izobličava. Na *sl.* 101. prikazana je poboljšana shema istog pojačavača, koja otklanja pomenute nedostatke. Otpornik R_k je umetnut između katode i negativnog kraja izvora napajanja V_B. Usled prolaska struje kroz katodni otpornik R_k, katoda postaje pozitivna u odnosu na $-V_B$, kao i u odnosu na rešetku povezanu sa $-V_B$ preko generatora signala v_g. Otpornost R_k se određuje tako da rešetka ostaje negativna u odnosu na katodu za najveće amplitude signala v_g. Kondenzator C_k je namenjen da propusti naizmeničnu komponentu anodne struje, koja bi inače naizmeničnu komponentu unosila u polarizaciju rešetke. Kondenzator C prenosi izlazni signal v_i na sledeći stepen, a ne propušta jednosmerni napon.

Na slici 102. prikazan je pojačavački stepen sa pentodom. Napon napajanja zaštitne rešetke dobija se, preko otpornika R_E, sa izvora anodnog napajanja. Kondenzator C_E ima zadatak da odvede na masu naizmeničnu komponentu struje zaštitne rešetke.

Različiti kondenzatori za premošćenje i za najniže učestanosti pojačavanih signala, mora da imaju malu impedansu u odnosu na otpornike kojima su paralelno vezani.

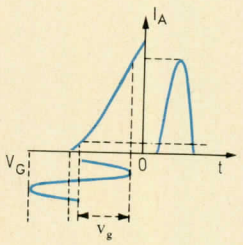
Pojačavanje pojačavača sa otpornim opterećenjem u anodi. Teorijski, pojačanje napona jednog pojačavačkog stepena sa opterećenjem u anodi dato je

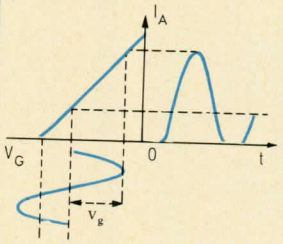
Sl. 96, 97, 98, 99. — Pojačanje u klasi A, B, AB i C.



A. Anodna struja stalno protiče.

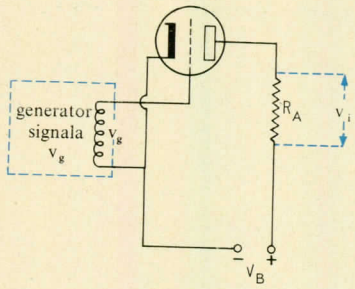
B. Anodna struja I_A postoji samo za vreme pozitivnih poluperioda signala v_g dovedenog na rešetku.



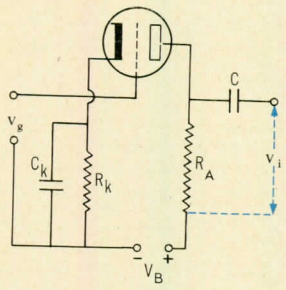


AB. Anodna struja protiče samo za vreme pozitivne poluperiode i jednog dela negativne poluperiode signala v_g dovedenog na rešetku.

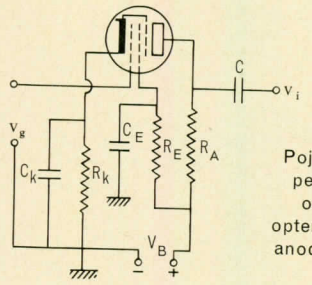
C. Anodna struja I_A protiče samo za vreme jednog dela pozitivne poluperiode signala v_g dovedenog na rešetku.



Sl. 100. — Princip pojačavača sa otpornim opterećenjem u anodnom kolu.

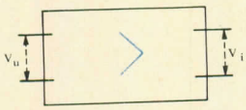


Sl. 101. — Pojačavač sa triodom i otpornim opterećenjem u anodnom kolu, kod koga se polarizacija rešetke dobija proticanjem anodne struje. Kondenzator C služi za spregu sa sledećim stepenom.

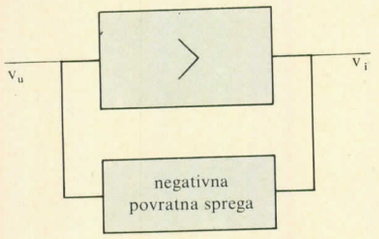


Sl. 102. Pojačavač sa pentodom i otpornim opterećenjem u anodnom kolu:

v_g — ulazni signal; V_B — izvor napajanja anodnog kola; R_A — otpor opterećenja; v_i — izlazni signal; R_k — otpor za polarizaciju; C_k — kondenzator za premoštavanje otpora R_k; C — kondenzator za spregu; R_E — otpor preko koga se dovodi napajanje zaštitne rešetke; C_E — kondenzator za premoštavanje otpora R_E.



Sl. 103. — Simbol pojačavača u shemama.



Sl. 104. — Pojačavač sa negativnom povratnom spregom.

izrazom $A=\frac{\mu R_A}{R_i+R_A}$; u kome je μ faktor pojačanja, R_A radni otpornik, i R_i unutrašnja otpornost cevi. Pojačanje napona koje se može dobiti sa triodom obično je blisko vrednosti tri četvrtine faktora pojačavanja μ. Sa pentodom, dobijeno pojačanje je samo mali deo faktora pojačanja, ali zahvaljujući njegovoj velikoj vrednosti, stvarno pojačanje može da dostigne vrednost 300 ili 350.

Simbol za predstavljanje pojačavača. U složenim elektronskim uređajima, koji se sastoje od raznih funkcionalnih elemenata, pojačavač se predstavlja pomoću pravougaonika sa strelicom (*sl.* 103), čiji vrh označava smer prolaska ulaznih signala prema izlazu pojačavača.

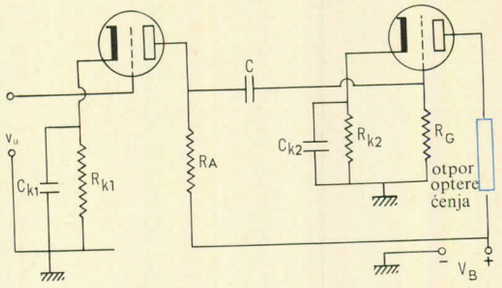
Negativna reakcija. Negativna reakcija se sastoji u vraćanju jednog dela izlaznog napona na ulaz pojačavača, i to tako da vraćeni signal ima suprotnu fazu u odnosu na ulazni signal.

Kolo kojim se vraća deo napona βv_i na ulaz pojačavača naziva se kolom negativne reakcije (N. R.), a sam pojačavač predstavlja »direktni lanac« (*sl.* 104). Dakle, usled negativne reakcije, amplituda dovedenog signala na rešetku prve cevi se smanjuje, i rezultat toga je da je izlazni signal manji od onog koji bi se dobio bez negativne reakcije. Ako je A pojačanje bez negativne reakcije, pojačanje A′ istog pojačavača biće $A'=\frac{A}{1-\beta A}$, gde je β uvek negativno, pošto je vraćeni signal u protufazi sa ulaznim signalom. Obično je, u imenitelju $(1-\beta A)$, jedinica zanemarljiva prema βA, te se pojačanje pojačavača sa negativnom reakcijom svodi na $\frac{1}{|\beta|}$, što znači da je ono nezavisno od sopstvenog pojačavača u odsustvu negativne reakcije.

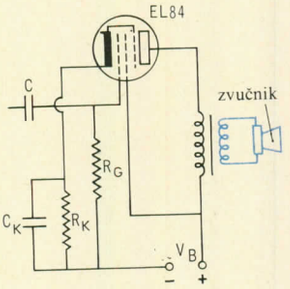
Negativna reakcija, dakle, predstavlja vrlo efikasno sredstvo za stabilizaciju pojačanja nekog pojačavača. Ona omogućava da se znatno smanje izobličenja i parazitni šumovi koji se stvaraju u pojačavaču, što znači da je poboljšana kriva odgovora. Ako kolo negativne reakcije sadrži impedansu zavisnu od učestanosti, dobija se selektivna negativna reakcija, koja, zavisno od sheme, ističe ili slabi signale određenih učestanosti.

Višestepeni pojačavač. Napon pojačan pomoću prve cevi može da se dovede na rešetku drugog pojačavačkog stepena. Tada je pojačanje jednako proizvodu pojačanja svih stepena.

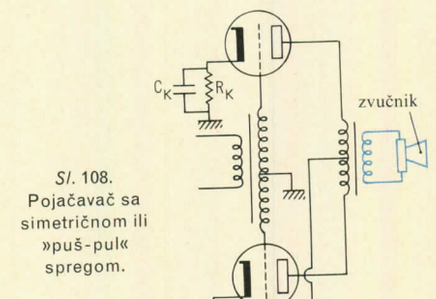
Shema na slici 105. predstavlja dvostepeni pojačavač. Kondenzator C prenosi izlazni signal prve cevi na rešetku druge cevi i naziva se *kondenzatorom za spregu*. Otpornost R_G velike vrednosti, koja se naziva *odvodnom otpornosti*, povezuje rešetku druge cevi i masu. Dakle, rešetka je na potencijalu nule i negativna u odnosu na katodu, pošto je ova pozitivna u odnosu na masu usled proticanja anodne struje kroz otpornik R_{k2}. U ranije datom izrazu za pojačanje $A=\frac{\mu R_A}{R_i+R_A}$ ne pojavljuje se učestanost signala: pojačavač sa otpornim opterećenjem bio bi, dakle, strogo aperiodičan. Međutim, ako se za jedan takav pojačavač nacrta kriva pojačanja G zavisno od učestanosti *f*, koja se naziva *kriva odgovora*, videće se da ona ima oblik sličan krivoj prikazanoj na *sl.* 106, iako bi savršen pojačavač trebalo da ima konstantno pojačanje. Ovo proizlazi iz činjenice da sprežni kondenzator predstavlja za najmanje učestanosti vrlo veliku reaktansu, što smanjuje preneseni napon na rešetku drugog pojačavačkog stepena. Pri najvišim učestanostima, reaktansa $\frac{1}{C\omega}$ sprežnog kondenzatora je zanemarljiva, ali unutrašnji kapaciteti cevi, koji su u paraleli za ulazne i izlazne signale svakog stepena, predstavljaju vrlo malu reaktansu i kratko spajaju ove signale. Iz ovoga proizlazi znatno smanjenje pojačanja na visokim učestanostima. Smanjivanje pojačanja na krajevima frekventnog opsega koji se pojačavaju, predstavlja nedostatak za uređaje koji su namenjeni reprodukciji zvuka, ali različiti postupci omogućuju da se koriguje



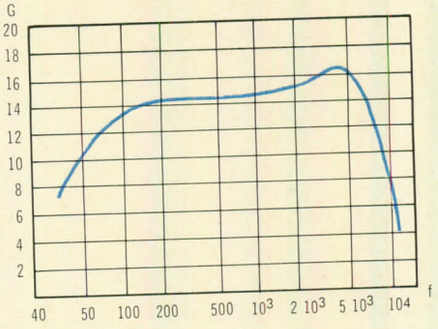
Sl. 105. — Neselektivni dvostepeni pojačavač: v_u — ulazni signal; V_B — izvor napajanja anodnih kola; R_{k1}, R_{k2} — otpornici za polarizaciju; C_{k1}, C_{k2} — kondenzatori za premoštavanje otpora R_{k1} i R_{k2}; R_A — otpor opterećenja prve cevi; C — kondenzator za spregu između stepena; R_G — odvodi otpornik rešetke druge cevi.



Sl. 107. Pojačavač snage.



Sl. 108. Pojačavač sa simetričnom ili »puš-pul« spregom.



Sl. 106. — Frekventna karakteristika pojačavača sa otpornim opterećenjem bez kompenzacije.

kriva odgovora pojačavača radi poboljšanja vrednosti reprodukcije.

Pojačavači snage. Često se u primeni zahteva da izlazni signal pojačavača poseduje električnu snagu koja može da pokrene neki mehanički organ, npr., rele, pisač, zvučnik, a ne samo da bude verna reprodukcija ulaznog signala. U ovom slučaju pribegava se pojačavačima snage čije su cevi proračunate zavisno od korišćenih napona i struja.

Kola opterećenja koja koriste električnu snagu pojačavača najčešće poseduje impedansu koja se veoma razlikuje od unutrašnje otpornosti snažne elektronske cevi. Da bi se kolu opterećenja prenela maksimalna snaga, potrebno je izvršiti prilagođenje impedanse ovog kola i impedansi cevi. U ovu svrhu koristi se transformator za prilagođenje, čija vrednost impedanse primara treba da bude jednaka unutrašnjoj otpornosti cevi, a čija impedansa sekundara treba da bude jednaka impedansi potrošača. U praksi, gubici u gvožđu, magnetna rasipanja, zasićenje, raspodeljene kapacitivnosti namotaja posebno otežavaju realizaciju izlaznog transformatora, koji ne bi unosio izobličenja. Pored toga, visokokvalitetan izlazni transformator, od koga se zahteva veoma verna reprodukcija zvuka, predstavlja komponentu sa relativno visokom cenom.

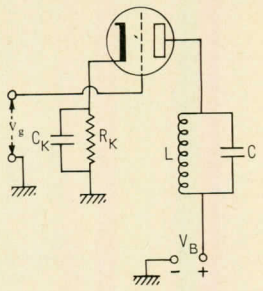
Na slici 107. prikazana je shema pojačavača snage sa pentodom, koja se često koristi za napajanje zvučnika u radio-prijemnicima. Primar transformatora ima impedansu od 4 500 Ω, čija je vrednost jednaka impedansi cevi EL 84. Takođe i impedansa sekundara treba da bude što je moguće više približna vrednosti impedanse korišćenog zvučnika. U opštem slučaju, zahtevi za industrijske primene su mnogo blaži, i najčešće impedansa potrošača ima dosta veliku vrednost, koja omogućuje da se ona neposredno veže na red sa anodnim kolom izlaznog stepena.

Pojačavač sa simetričnom spregom (»*push — pull*«). Ova shema koristi dve snažne cevi koje su simetrično postavljene (*sl.* 108). Dovedeni signali na rešetke obe cevi su u protivfazi, pa su i izlazni signali takođe u protivfazi. Opterećenje obe cevi sastoji se od transformatora čiji primar sadrži izvod u sredini. Samo jedan napaja kolo opterećenja. Anode cevi su povezane na dva kraja primara, i trenutna promena anodne struje obe cevi sabira se u primaru. Pojačavač sa simetričnom spregom veoma je pogodan u izgradnji izvanredno vernih pojačavača snage. Ova veza ima sledeće prednosti:

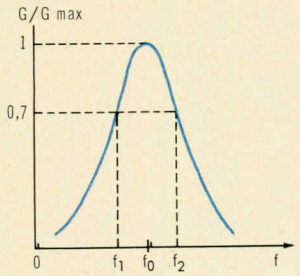
1. Usled kompenzacije smanjuju se izvesna izobličenja, pri čemu se posebno otklanjaju parni harmonici.

2. Povećanje polarizacije rešetke cevi omogućuje dovođenje ulaznog signala veće amplitude, iz čega proizlazi smanjivanje struje koja teče u odsustvu signala i poboljšanje stepena korisnog dejstva.

3. Otklanjanje permanentne indukcije magnetnog kola transformatora, s obzirom na to da su amper-navojci obe polovine primara u opoziciji; ovo omogućuje da se koriste mnogo veće struje bez opasnosti od zasićenja, koje prouzrokuje izobličenje.

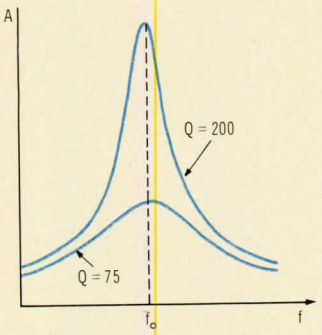


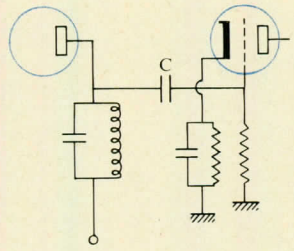
Sl. 109. — Princip selektivnog pojačavača.



Sl. 110. — Propusni opseg selektivnog pojačavača.

Sl. 111. Rezonantna kriva za dva zaptivna oscilatorna kola podešena na istu učestanost, ali sa različitim selektivnostima.





Sl. 112. — Kapacitivna sprega između stepena.

4. Smanjivanje brujanja koje se javlja usled nesavršenog filtriranja anodnog napona napajanja; stoga je moguće zadovoljiti se skromnijim filtriranjem napona napajanja stepena snage. Moguće je usvojiti veliki, negativan prednapon rešetke, tako da struja u odsuštvu signala bude skoro nula. Dakle, svaka cev radi samo za vreme jedne poluperiode signala. Ovaj rad u klasi AB omogućava dobijanje veće snage po cevi nego u klasi A, a da se pri tom održava izvanredna vernost reprodukcije.

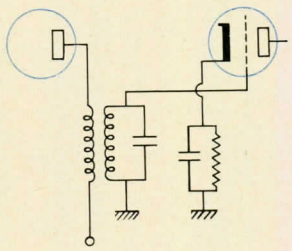
Selektivni pojačavači. Selektivni pojačavač ima osobinu da znatno pojačava signale koji se nalaze samo u određenom opsegu učestanosti. Pri realizaciji takvih pojačavača pribegava se rezonantnim kolima podešenim na učestanost signala koji treba da se pojača. Selektivni pojačavački stepen predstavljen je pomoću sheme na *sl.* 109. Ulazni signal učestanosti f_0 dovodi se između rešetke i mase. Anodno opterećenje se sastoji od zaptivnog oscilatornog kola, koje sadrži u paraleli namotaj L i kapacitet C, čije su vrednosti određene tako da kolo bude u rezonanci za učestanost f_0. Impedansa zaptivnog kola je najveća pri rezonanci, stoga će i pojačanje pojačavača biti najveće za učestanost f_0. Iz tog razloga ovakvo pojačanje naziva se *rezonantnim pojačanjem.*

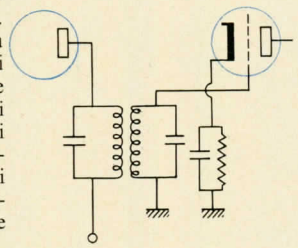
Kriva pojačanja zavisno od učestanosti signala f dovedenih na rešetku cevi, za neko dato rezonantno kolo, prikazana je na *sl.* 110. Savršen selektivni pojačavač trebalo bi da pojačava samo signale učestanosti f_0, ali, u praksi, usled oblika rezonantne krive zaptivnog kola biće, takođe, pojačani i signali učestanosti u okolini učestanosti f_0. Opseg učestanosti između f_1 i f_2, za koje maksimalna vrednost pojačanja G_{max} opadne za manje od 3 dB, odnosno za koje je pojačanje pojačavača G veće od vrednosti 0,7 G_{max}, naziva se *propusnim opsegom.* Da bi se odstranili signali okolnih učestanosti, mora se koristiti pojačavač sa veoma uskim opsegom učestanosti, odnosno pojačavač sa zaptivnim kolom koje ima vrlo oštru rezonantnu krivu.

Slika 111. pokazuje rezonantne krive dva zaptivna kola, koja su podešena na istu učestanost, ali imaju različitu selektivnost. Kvalitet kola je određen pomoću faktora dobrote $Q = \frac{\omega L}{R}$.

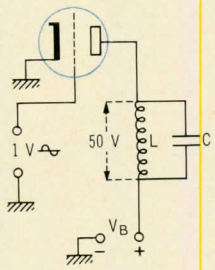
Vidi se da za veću selektivnost kola, otpornost R treba da bude što je moguće manja. Ako se želi veliko pojačanje A, potrebno je vezati u kaskadu više rezonantnih pojačavačkih stepena. Veza između stepena može da se ostvari bilo pomoću kapaciteta za vezu (*sl.* 112), bilo pomoću transformatora kome su jedan (*sl.* 113) ili oba namotaja (*sl.* 114) prilagođeni na učestanost f_0. Selektivnost pojačavača raste sa brojem podešenih kola.

Sl. 113. Sprega između stepena pomoću transformatora sa podešenim kolom u sekundaru.

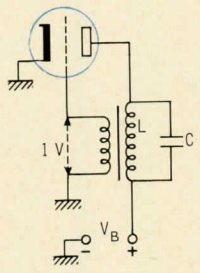




Sl. 114. Sprega između stepena pomoću transformatora kod koga su primarno i sekundarno kolo podešeni na istu učestanost.

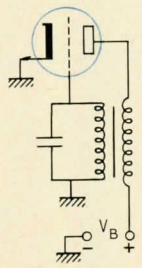


Sl. 115. Rezonantni pojačavač na čiju se rešetku dovodi signal iz generatora.



Sl. 116. — Oscilator. Signal doveden na rešetku dobija se iz sekundara transformatora kroz čiji primar protiče anodna struja.

OSCILATORI. U najširem značenju, oscilator predstavlja fizički sistem sposoban da održava periodične pojave. Postoje mehanički, hidraulički, električni oscilatori itd. Kako svi fizički sistemi imaju različite gubitke (trenje, Džulov efekat, histerezis), i oscilator, ma kakav on bio, mora da se koristi spoljašnjom energijom da bi održao oscilacije. Svi pojačavački sistemi mogu da rade kao oscilatori, kad se jedan deo raspoložive energije na izlazu vraća na ulaz, tako da u određenom smeru deluje na uzorak koji izaziva oscilacije. Ako se ovo primeni na električne oscilacije, signal vraćen sa izlaza na ulaz oscilatora mora da ima određenu fazu. Elektronska cev sa upravljačkom rešetkom predstavlja gotovo savršen element pomoću koga se (ako se dobro iskoristi) može ostvariti odličan oscilator.



Sl. 117. — Oscilator koji daje učestanost na koju je podešeno njegovo rešetkino kolo.

Elektronski oscilator. Neka pojačavač koristi kao opterećenje zaptivno kolo LC, čija rezonantna učestanost iznosi, npr., 1 000 Hz (*sl.* 115). Ako se na upravljačku rešetku pojačavača dovodi napon od 1 V i učestanosti 1 000 Hz, onda neka amplituda pojačanog napona na krajevima zaptivnog kola iznosi, npr., 50 V.

Umesto da se iz posebnog generatora dovodi na ulaz signal učestanosti 1 000 Hz, prirodno da je moguće iskoristiti naizmeničnu energiju koja nastaje na krajevima samog zaptivnog kola. Na primer, neka namotaj L bude primar transformatora sa odnosom 1/50, čiji sekundar pobuđuje upravljačku rešetku cevi potrebnim naponom od 1 V (*sl.* 116). Prema tome, oscilator od 1 000 Hz napravljen je tako da napon upravljačke rešetke upravlja anodnom strujom i da anodna struja određuje napon upravljačke rešetke. Sprega između izlaznog i ulaznog kola mora da bude takva da trenutne vrednosti potencijala anode i upravljačke rešetke budu u protivfazi.

Moglo bi se pomisliti da oscilacije ne mogu spontano nastati u kolu koje je napravljeno prema *sl.* 116, pošto izgleda da kroz namotaj L prolazi samo jednosmerna anodna struja. Međutim, u stvarnosti, neprekidno kretanje elektrona u provodniku dovoljno je da dovede do veoma malih oscilacija koje će se odmah pojačati. S druge strane, moglo bi se takođe pomisliti da će amplituda oscilacija neograničeno rasti. Međutim, ni do toga neće doći jer, ako pobudni napon vraćen na upravljačku rešetku postane prevelik, počinje da teče rešetkina struja za vreme pozitivne poluperiode. Ova struja apsorbuje višak energije koja se prenosi sa anode, usled čega se uspostavlja stabilna amplituda oscilovanja. Elektronske cevi su veoma pogodne za oscilatore, jer je sa istom cevi moguće ostvariti oscilacije učestanosti od nekoliko herca do nekoliko stotina megaherca, što zavisi od vrednosti upotrebljenih elemenata.

Rešetkino i anodno kolo mogu izmeniti mesta; zaptivno kolo može da se postavi između rešetke i anode, a namotaj za spregu može da se veže na red sa anodom (*sl.* 117). U svakom slučaju, amplituda oscilatora zavisi od stepena sprege između anodnog i rešetkinog kola. Dobijene oscilacije su strogo sinusoidalne ako je sprega između rešetke i anode slaba. U ovom slučaju kaže se da sistem radi na granici održavanja oscilacija.

Množač učestanosti. Ako je sprega između anodnog i rešetkinog kola nekog oscilatora veoma jaka, amplituda oscilacija postaje takva da se radna tačka pomera na karakteristikama i izlazi iz njihovog pravolinijskog dela, usled čega se oscilacije izobličavaju i nisu više sinusoidalne. Poznato je da su takve oscilacije utoliko bogatije harmonicima ukoliko više odstupaju od sinusoide.

Ako neki generator stvara nesinusoidalne oscilacije, moguće je izdvojiti, npr., drugi i treći harmonik uz pomoć kola koje je podešeno na dvostruku ili trostruku osnovnu učestanost. Na ovom principu prave se množači učestanosti.

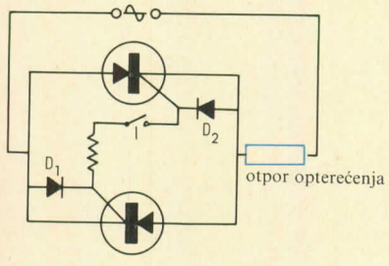
MULTIVIBRATOR. Multivibrator su pronašli 1918. Abraham i Bloh (Abraham, Bloch). To je najvažniji nesinusoidalni oscilator. Sastoji se od dva pojačavačka stepena sa otpornim opterećenjem koji su vezani u zatvorenu petlju, pri čemu se celokupna amplituda izlaznog signala vraća na rešetku ulazne cevi (*sl.* 118). Dakle, ostvaruje se maksimalno moguća sprega između izlaza i ulaza, te je izlazni signal skoro četvrtast, bogat harmonicima višeg reda, koji su čak i 200 puta viši od osnovne učestanosti. Potrebna učestanost oscilovanja podešava se odgovarajućim izborom sprežnih kapaciteta i otpornika u kolima rešetke. Multivibrator može lako da se sinhronizuje pomoću oscilatora koji napaja prvu rešetku signalom, čija je učestanost znatno veća od sopstvene učestanosti multivibratora. Perioda oscilovanja multivibratora biće smanjena tako da sadrži tačno ceo broj perioda signala oscilatora za sinhronizaciju. Na taj način multivibrator može da obavlja funkciju delitelja učestanosti.

Ekles-Džordanovo kolo. Bistabilni multivibrator. Ovo kolo predstavlja prvo u nizu kola koja imaju dva stabilna stanja i koja mogu lako da se prebace iz jednog stanja u drugo, pod dejstvom spoljašnjeg naponskog impulsa. Zbog toga je ovaj tip kola nazvan *bistabilni multivibrator*.

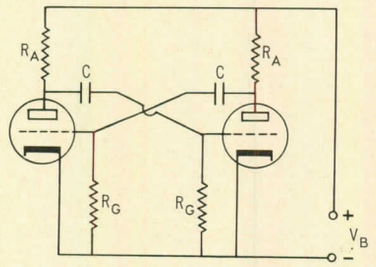
Ekles-Džordanovo (Eccles, Jordan) kolo je multivibrator kod koga je veza između rešetki i anoda direktna, bez kondenzatora, pri čemu rešetke imaju različite napone polarizacije zavisno od stanja kola. Kada je prva cev u provodnom stanju, druga je zakočena usled negativnog napona koji se dovodi na njenu rešetku. Ako se na rešetku druge cevi dovede pozitivan impuls, ova cev počinje da provodi struju, a prva cev biva zakočena, usled pada napona na anodnoj otpornosti druge cevi. Obično se pozitivni impulsi preko malih kapaciteta C_1 i C_2 jednovremeno dovode na obe rešetke (*sl.* 119). Drugi pozitivan impuls prouzrokovaće povratak u prvobitno stanje. Prema tome, potrebno je dva impulsa da bi jedna cev izvršila potpun ciklus, što znači da dva puta promeni svoje stanje. Dakle, ovo kolo deli sa dva učestanost dovedenih impulsa. Ako se koristi *n* kola u kaskadi, izlazni impuls poslednjeg kola dobija se kad prvi stepen primi 2^n impulsa. Na ovaj način može se deliti visoka učestanost ulaznih impulsa da bi se oni mogli brojati pomoću elektromehaničkih brojača, koji su u stanju da zabeleže svega 10 impulsa u sekundi.

KOLA SA POLUPROVODNICIMA

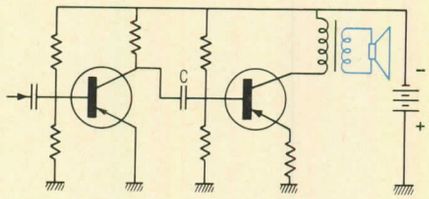
U osnovnim kolima koja ostvaruju do sada opisane funkcije korišćene su elektronske cevi. Napredak u proizvodnji poluprovodnika, dioda, tranzistora i tiristora omogućio je da se elektronske cevi u velikom broju primena zamene ovim novim komponentama, pri čemu njihove specifične osobine posebno dolaze do izražaja. Najzad, razumljivo je da tranzistori koji se koriste u pojačavačkim kolima, mogu da se upotrebe i u oscilatorima ili multivibratorima, ostvarenjem pogodne sprege između izlaznih i ulaznih elektroda. Radi primera date su razne sheme (*sl.* 120. do 126) koje prikazuju princip nekoliko kola sa tranzistorima, koji vrše različite funkcije preuzete od elektronskih cevi.



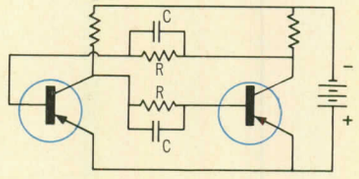
Sl. 125 — Prekidač sa tiristorima.
Naizmenični napon se dovodi na opterećenje kada je prekidač I zatvoren. Svaki tiristor omogućuje prolaz jedne poluperiode struje. Diode D_1 i D_2 ispravljaju napone dovedene na rešetke.



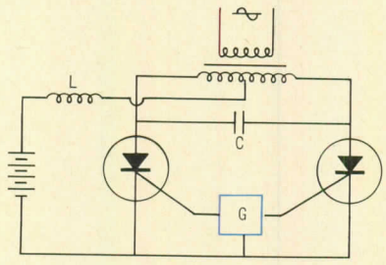
Sl. 118. — Princip multivibratora.
(C — kondenzator za spregu; R_G — odvodni otpornik; R_A — otpor opterećenja.)
Pojačavač radi u zatvorenoj petlji, što znači da izlazni signal jednog stepena predstavlja pobudni signal koji se vodi na rešetku drugog stepena.

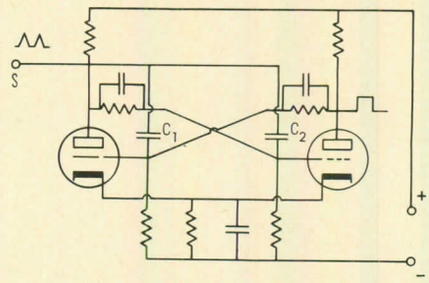


Sl. 120. — Shema dvostepenog neselektivnog pojačavača sa tranzistorima u vezi sa zajedničkim emitorom. Baze se polarišu pomoću razdelnika sa otpornicima. Veza između stepena ostvaruje se pomoću kondenzatora C. Otpornik za stabilizaciju postavljen je u emitorsko kolo drugog stepena.

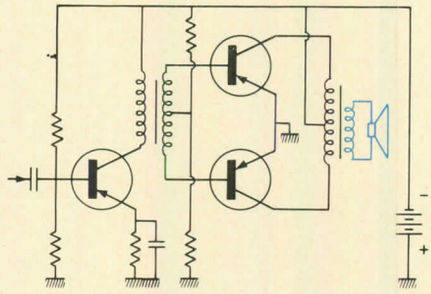


Sl. 123. — Princip multivibratora sa tranzistorima. Učestanost oscilovanja zavisi od vremenske konstante RC kola koja se koriste za spregu kolektora jednog tranzistora sa bazom drugog tranzistora.

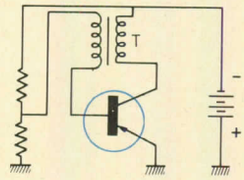




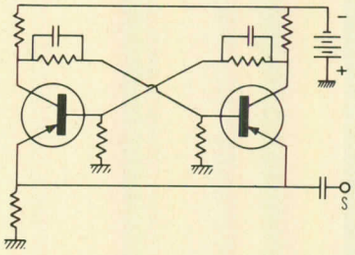
Sl. 119. — Princip bistabilnog multivibratora. Kondenzatori C_1 i C_2 prenose na rešetke pozitivne impulse koji prouzrokuju promenu stanja cevi.



Sl. 121. — Neselektivni pojačavač u čijem je drugom stepenu primenjena simetrična sprega tranzistora.



Sl. 122. — Oscilator sa tranzistorom. Sprega između kolektora i baze ostvarena je pomoću transformatora T.



Sl. 124. — Princip bistabilnog multivibratora sa tranzistorima.
Okidni impulsi dovode se na emitore, pri čemu se svaki od tranzistora sukcesivno koči i otvara. Za vraćanje kola u početno stanje potrebno je na tačku S dovesti dva uzastopna impulsa.

Sl. 126. — Pretvarač sa tiristorima. Generator G napaja rešetke tiristora radnom učestanošću pretvarača *f*. Uloga kalema L je da u izlaznoj struji priguši harmonike učestanosti *f*. Kondenzator C ima svrhu da ostvari naizmenično prelaženje svakog tiristora iz provodnog u neprovodno stanje.

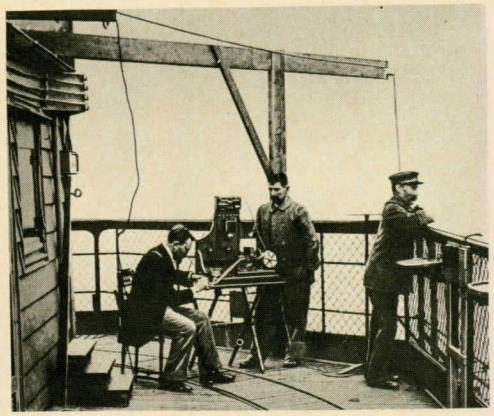
Radio-veze i reprodukcija zvuka

ISTORIJA

Radio-veze datiraju od 1895, kada je Markoni preneo »bez žica« telegrafske signale na nekoliko stotina metara. Godine 1898. Dikrete (Ducretet) je ostvario radio-vezu između Ajfelove kule i Panteona (*sl.* 127). Najzad, iste godine, prvi radio-telegram prešao je kanal Lamanš. Korišćeni talasi imali su veliku talasnu dužinu (nekoliko kilometara) i zahtevali antene velikih raspona. Talasi su proizvođeni pomoću generatora-varničara.

U toku prvog svetskog rata, bežične radio-veze doživele su veliki razvitak zahvaljujući prvim elektronskim cevima-triodama. Upotreba predajnika sa triodama omogućila je da se prenese i govor, a ne samo telegrafski znaci. To je, istovremeno bio početak primene radija u aeronautici (razmena poruka sa avionima) i radio-goniometrije, koja je omogućila da se okretanjem okvira prijemne antene, odredi pravac u kome se nalazi predajnik.

Godine 1922. emitovani su sa Ajfelove kule eksperimentalni programi radio-telefonije — preteče radio-difuzije — koji su primljeni od prvih »radio-amatera«. Elektronske cevi toga doba imale su ograničenu snagu. Po završetku rata predajnici su još bili opremljeni generatorima sa lukom ili alternatorima visoke učestanosti, koja je, uostalom, bila ograničena konstruktivnim teškoćama. Ovo ograničenje učestanosti nije izgledalo suviše nepovoljno, jer se smatralo da domet bežičnih međukontinentalnih veza raste sa dužinom talasa. Uostalom teoretičari tog vremena ustanovili su zakonitost koja je i matematički potvrdila ovo mišljenje. Dakle, razumljiv je stav za korišćenjem talasa velike dužine. Ovo je bio slučaj sa predajnicima iz Liona i Bordoa (Croix-d'Hins), sa talasnom dužinom od 15 500, odnosno 23 450 metara. Snaga predajnika dostizala je vrednost i do 500 kW. Antene su bile izgrađene od horizontalne mreže žica dužine i do 3 km, a širine nekoliko stotina metara, postavljene na nosače i metalne stubove čija je visina dostizala i do 250 metara. Težina jednog od metalnih nosača predajnika iz Bordoa iznosila je 560 tona. Lako je zamisliti troškove izgradnje takvog postrojenja. Iznenadan preokret dogodio se 1921—1922, kada su radio-amateri objavili da, koristeći se dužinom talasa manjom od 200 m i skromnom snagom predajnika od nekoliko vati, mogu preneti poruke i preko Atlantika. U ovom slučaju upotrebljene su antene od obične bakarne žice čija dužine nije prelazila nekoliko desetina metara, a bile su zategnute između dva stuba. Nesrazmera između uloženih sredstava i dobijenih rezultata bila je takva da su ovi eksperimenti izazvali nepoverenje stručnjaka. Međutim, morala se prihvatiti činjenica da je uzajamna veza preko Atlantika sigurno uspostavljena, a zatim između Evrope i Japana, Južne Amerike, Novog Zelanda i Indokine. Dakle, trebalo je preispitati postojeću teoriju ili, bolje rečeno, preokrenuti je. Već 1925—1926. više zvaničnih stanica usvaja talasnu dužinu manju od 100 m ostvarujući veći domet uz ogromnu uštedu snage.



Sl. 127. — Uređaj kojim je Dikrete 1898. ostvario vezu između Ajfelove kule i Panteona.

Kasnije prihvaćena teorija potvrđuje da se kratki talasi prostiru samo na malom rastojanju od predajnika. I zaista, ova teorija je u važnosti samo za direktne ili prizemne talase, koji se prostiru pravolinijski, pri čemu nailaze na razne prepreke (zgrade, neravno tlo, šume) koje ih zaustavljaju i apsorbuju. Međutim, jedan deo energije izračene iz antene prostire se u vertikalnom pravcu ili pod kosim uglom iznad tla. Ovi talasi odbijaju se od jonizovanih slojeva, koji se nalaze visoko u atmosferi, na visini između 100 i 320 km. Pojava odbijanja kombinuje se sa savijanjem talasa pri prolazu kroz slojeve sa promenljivim stepenom jonizacije. Posledica svega ovoga je zakrivljenje putanje talasa, koji se vraćaju prema zemlji, tako da posle odbijanja od zemljinog tla mogu ponovo stići u jonizovane slojeve. Na taj način, uzastopnim odbijanjem između zemljinog tla i jonosfere, talasi mogu da pređu više hiljada kilometara, čak i desetine hiljada kilometara, i da obiđu Zemljinu kuglu. Naravno, uslovi prostiranja talasa zavise od talasne dužine, meteoroloških uslova, doba dana, godišnjeg doba, sunčevog ciklusa — ukratko, od svih prirodnih pojava koje mogu da utiču na jonizaciju atmosfere. Ali sada su svi ovi uticaji već dobro proučeni, i izborom talasne dužine, prema postojećim uslovima, sa kratkim talasima se ostvaruje potpuno sigurna veza, koja obezbeđuje njihovu pouzdanu eksploataciju.

Po upoznavanju specifičnih osobina kratkih talasa i otkrivanju mogućnosti njihove primene u telekomunikacijama, fizičari su proučavali sve kraće i kraće talase, vrlo visokih učestanosti. Utvrđeno je da, ukoliko je učestanost veća, utoliko je veća sličnost osobina ovih i svetlosnih talasa. Nađene su iste zakonitosti pravolinijskog prostiranja, odbijanja, savijanja i polarizacije. Ovi talasi su vrlo značajni za mnoge primene, pogotovu kad je potrebno da se izračena energija usmeri u određenom pravcu.

Raspon talasnih dužina koje se u današnje vreme koriste u telekomunikacijama, znatan je i deli se u frekventne opsege koji imaju svoje nazive i čija je širina tačno određena po učestanosti, odnosno talasnoj dužini.

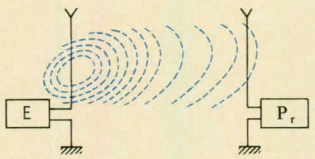
Opsezi učestanosti koji se koriste u radio-komunikacijama

Skraćenica koja označava opseg	Broj opsega	Opseg učestanosti (donja granica isključena, gornja uključena)	Talasna dužina	Naziv talasa
VLF	4	3 do 30 kHz	100 km do 10 km	mirijametarski
LF	5	30 do 300 kHz	10 km do 1 km	kilometarski
MF	6	300 do 3000 kHz	1000 m do 100 m	hektometarski
HF	7	3 do 30 MHz	100 m do 10 m	dekametarski
VHF	8	30 do 300 MHz	10 m do 1 m	metarski
UHF	9	300 do 3000 MHz	1 m do 10 cm	decimetarski
SHF	10	3 do 30 GHz	10 cm do 1 cm	centimetarski
EHF	11	30 do 300 GHz	10 mm do 1 mm	milimetarski
	12	300 do 3000 GHz ili 3 THz	1 mm do 0,1 mm	decimilimetarski

Fot. C.F.T.H.

Radio-telegrafija

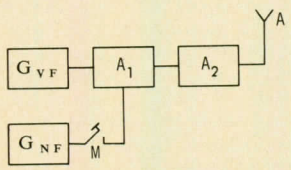
PRINCIP RADIO-TELEGRAFSKE VEZE. Osnovna shema radio-telegrafske veze je vrlo jednostavna (*sl.* 128). Predajnik E napaja predajnu antenu strujom visoke učestanosti, usled čega ova zrači u prostor energiju u vidu elektromagnetnog polja. Amplituda emitovanih talasa se menja (moduliše) u ritmu signala koji se prenose, zbog čega se ovaj postupak modulacije naziva *amplitudna modulacija*. Prijemna antena se nalazi na izvesnom odstojanju od predajne antene i u njoj se indukuje naizmenična struja koja potiče od ovog a vrlo često i drugih predajnika. Indukovana energija u prijemnoj anteni najčešće je beznačajna i nepodesna za direktnu upotrebu. Zbog toga se iz struja iz prijemne antene mora izdvojiti koristan signal koji se potom pojačava i transformiše.



Sl. 128. — Princip rada radio-telegrafske veze.

SHEMA RADIO-TELEGRAFSKE PREDAJNE STANICE

RADIO-TELEGRAFSKA PREDAJNA STANICA (*sl.* 129) sadrži sledeće elemente:



Sl. 129. — Princip rada predajne radio-telegrafske stanice.

1. generator visoke učestanosti G_{VF}, snage nekoliko vati, koji je projektovan i napravljen tako da proizvodi stabilne i čiste oscilacije;

2. niz pojačavača A_1, A_2..., koji postepeno povećavaju snagu od nekoliko vati na snagu koja treba da bude izračena iz antene i koja, zavisno od namene, iznosi od nekoliko desetina vati do više stotina kilovata;

3. modulator, koji na jednom od pojačavačkih stepena moduliše amplitudu talasa u ritmu neke čujne učestanosti, čime se olakšava prijem; upotrebljena čujna učestanost ili učestanost modulacije određuje visinu zvuka signala koji se prima u telefonskoj slušalici ili zvučniku prijemnika; generator G_{NF} proizvodi učestanost modulacije koja se vodi na jedno pojačavačko kolo;

4. ručni ili automatski prekidač M, koji uspostavlja ili prekida signal modulacije prema odgovarajućem kodu;

5. antenski sistem A, manje ili više komplikovan, od jednostavne zategnute žice čija dužina zivisi od upotrebljene učestanosti predajnika do složene mreže elemenata predviđene da obezbedi maksimalno zračenje u određenom pravcu.

STABILIZACIJA UČESTANOSTI PREDAJNIKA. Da bi se obezbedile brojne jednovremene veze bez smetnji, potrebno je da se svaka od njih obavlja na jednoj, što je moguće stabilnijoj učestanosti. Rešenje se traži u stabilizaciji učestanosti pomoću piezoelektričnog efekta kvarca. Pažljivo izbrušena pločica kvarca, čije su dve suprotne strane posrebrene, postavljena je paralelno oscilatornom kolu. Pod uticajem dovedenog električnog polja, ona se uzastopno skuplja i širi i dostiže maksimalnu amplitudu pri debljini pločice koja odgovara njenoj mehaničkoj rezonansi. Usled mehaničkih deformacija pločice stvara se električni napon na njenim posrebrenim stranama i ovaj periodični napon nameće svoju rezonantnu učestanost generatoru.

Stabilnost učestanosti je izvanredna (10^{-6}) u slučaju da se kvarc nalazi u sredini sa nepromenljivom temperaturom. Uvođenjem posebnih mera predostrožnosti moguće je dobiti stabilnost čak od 10^{-8}.

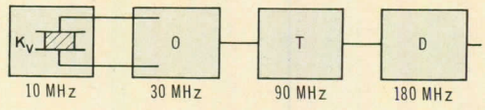
Praktično je nemoguće obraditi kvarc za učestanosti veće od 20 MHz, pošto bi on bio suviše tanak, a samim tim vanredno lomljiv. Za više učestanosti koristi se generator čija je učestanost tri ili pet puta veća od osnovne učestanosti kvarca, što odgovara trećem ili petom harmoniku. Ako je potrebno, iza generatora se koriste umnožači učestanosti (za udvostručenje ili utrostručenje frekvencije).

Slika 130. prikazuje dobijanje učestanosti od 180 MHz, koja je stabilisana pomoću kvarca osnovne učestanosti od 10 MHz. Kvarc K_v stabiliše oscilator O od 30 MHz, iza koga se nalazi utrostručivač učestanosti T i udvajač učestanosti D.

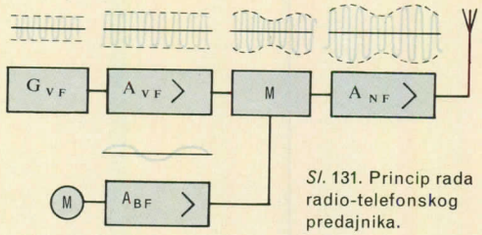
Radio-telefonija

PRINCIP RADIO-TELEFONSKIH VEZA. Čim je, zahvaljujući elektronskim cevima, bilo moguće ostvariti predajnike čistih i stabilnih talasa visoke učestanosti, pokušalo se sa prenosom govora, što je bio relativno jednostavan problem.

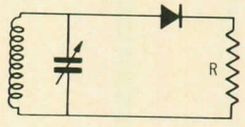
Principska shema radio-telefonskog predajnika praktično je ista kao i za radio-telegrafski predajnik. Generator niske učestanosti modulacije jednostavno je zamenjen mikrofonom i pojačavačem niskih učestanosti. Slika 131. prikazuje principsku shemu radio-telefonskog predajnika, kakav se koristi, npr., za radio-difuziju. Generator visoke učestanosti G_{VF} napaja pojačavač visoke učestanosti A_{VF}. Modulator M prima oscilacije visoke učestanosti iz generatora G_{VF} i oscilacije niske učestanosti iz mikrofona M, odnosno pojačavača niske učestanosti A_{NF}. Modulisana struja visoke učestanosti pojačava se pojačavačem A_{VF}, koji napaja antenu.



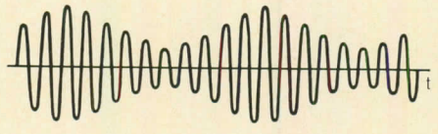
Sl. 130. — Dobijanje učestanosti od 180 MHz pomoću kristala kvarca sa osnovnom učestanošću 10 MHz.



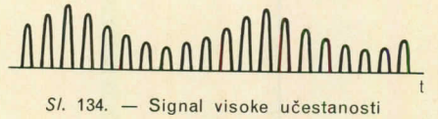
Sl. 131. Princip rada radio-telefonskog predajnika.



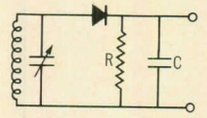
Sl. 132. — Shema detektora sa kristalnom diodom koja ispravlja signal visoke učestanosti.



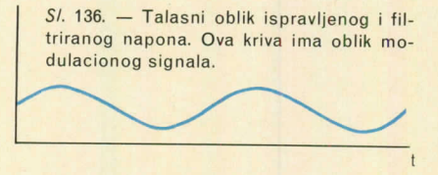
Sl. 133. — Modulisani signal visoke učestanosti pre detekcije.



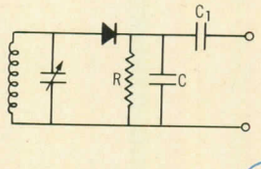
Sl. 134. — Signal visoke učestanosti posle ispravljanja.



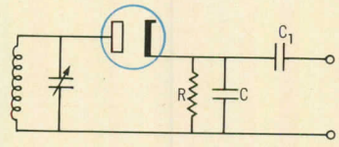
Sl. 135. — Ispravljač sa kondezatorom za filtriranje C.



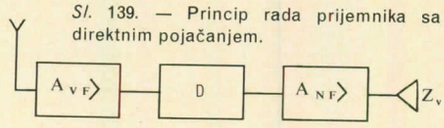
Sl. 136. — Talasni oblik ispravljenog i filtriranog napona. Ova kriva ima oblik modulacionog signala.



Sl. 137. — Detekcija sa odstranjivanjem jednosmernog napona.



Sl. 138. Detektor sa vakuumskom diodom.



Sl. 139. — Princip rada prijemnika sa direktnim pojačanjem.

OPIS RADA PRIJEMNIKA I OSNOVNIH KOLA

Prijemnik ima zadatak da od svih signala indukovanih u anteni izdvoji baš onaj koji se želi primiti, odnosno čuti. Ovaj zadatak obavljaju selektivna kola. Osetljivi prijemnici sadrže više visokofrekventnih pojačavačkih stepena, čija su sva kola podešena na prijemnu učestanost. Ovaj postupak se naziva *direktnim pojačanjem*. U opštem slučaju, podešavanje raznih kola na željenu učestanost ostvaruje se promenom kapacitivnosti mehanički spregnutih promenljivih kondenzatora, čime se omogućava jedinstvena komanda za biranje stanica.

Posle pojačanja potrebno je odvojiti modulacioni signal od nosećeg talasa. Ova operacija naziva se *detekcijom* i omogućava primanje signala niske učestanosti.

DETEKCIJA. Detekciju čine dva procesa: ispravljanje i filtriranje. Ispravljanje se obavlja ili kristalnom ili vakuumskom diodom.

Detektor sa kristalnom diodom. Slika 132. prikazuje shemu ispravljača sa kristalnom diodom, koja se nalazi na izlazu kola visoke učestanosti. Detektovani napon se pojavljuje na krajevima radnog otpornika R. Slika 133. prikazuje oblik napona pre detekcije. Posle ispravljanja nestaju negativne poluperiode napona *(sl.* 134), tako da struju obrazuju samo uzastopni signali istog znaka. Ako se paralelno radnom otporniku R priključi kondenzator C *(sl.* 135), on se puni do maksimalnog napona ispravljača. Ako napon na ispravljaču opada, kondenzator se polako prazni preko otpornika R. Napon na krajevima otpora R istog je oblika kao i modulacioni napon *(sl.* 136). Odmah se vidi da nemodulisani noseći talas stvara stalni jednosmerni signal, koji se dodaje modulacionom naponu. Da se otkloni jednosmerni signal, dovoljno je da se na red sa detektorom postavi kondenzator C_1, koji zaustavlja jednosmernu, a propušta samo naizmeničnu komponentu detektovane struje *(sl.* 137).

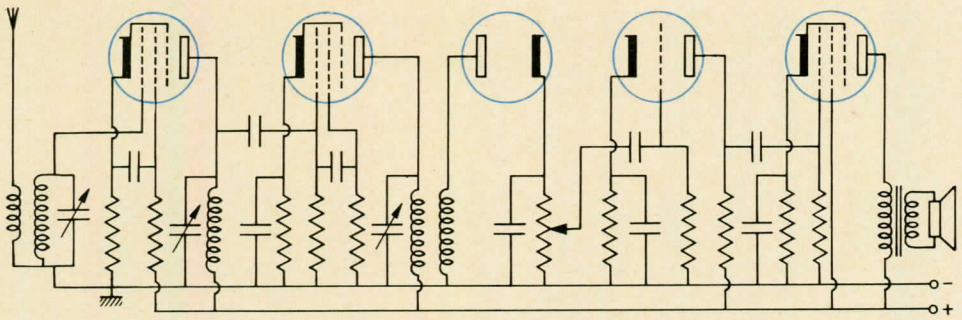
Najčešće se za ispravljanje naizmeničnog napona koristi germanijumska ili silicijumska kristalna dioda. Ovaj tip detektora ima znatne prednosti s obzirom na male dimenzije, jednostavnost povezivanja i smanjenja potrošnje energije jer ne zahteva grejanje. Osim toga, on ima praktično neograničen vek, neosetljiv je na udare i, najzad, može da radi na vrlo visokim učestanostima.

Detektor sa vakuumskom diodom. Na slici 138. prikazana je shema detektora sa vakuumskom diodom. Očigledna je sličnost sheme ovog detektora i detektora sa poluprovodničkom diodom. Detektori sa vakuumskom diodom su sve manje u upotrebi i sve se više zamenjuju detektorima sa poluprovodničkom diodom.

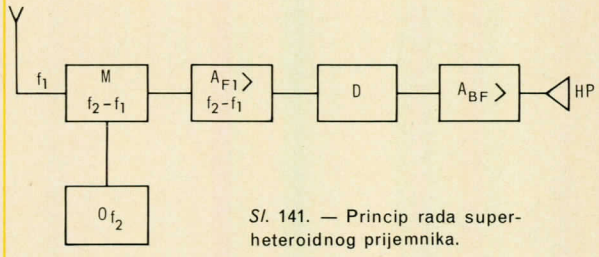
POJAČANJE NISKIH UČESTANOSTI. Posle detektovanja, signal niske učestanosti pojačava se sa jednim ili češće sa dva pojačavača niske učestanosti, od kojih je prvi pojačavač napona, dok je drugi pojačavač snage i služi za napajanje zvučnika. Prema tome, blok shema čitavog prijemnika sa direktnim pojačavanjem može da se predstavi kao na *sl.* 139. Pojačavač visoke učestanosti A_{VF} sastoji se od jednog ili više pojačavačkih stepena i podešen je na prijemnu učestanost. Za njih slede detektorski stepen D i pojačavač niske učestanosti A_{NF} koji napaja zvučnik Z_v.

PRIJEMNIK SA PROMENOM UČESTANOSTI. Prijemnici sa direktnim pojačanjem (principska shema prikazana je na *sl.* 140) nepogodni su s obzirom na neophodnost da sva kola moraju biti podešena na prijemnu učestanost. Podešavanje vrednosti promenljivih kondenzatora jednim dugmetom ne rešava u potpunosti problem, a pogotovo ga ne rešava pri višim učestanostima; osim toga, i pojačanje se mnogo menja sa promenom prijemne učestanosti.

Zbog nedostataka prijemnika sa direktnim pojačanjem, razmatran je drugi princip rada prijemnika,



Sl. 140. — Shema prijemnika sa direktnim pojačanjem.



Sl. 141. — Princip rada superheteroidnog prijemnika.

koji ima takve prednosti da ga koristi većina savremenih prijemnika. Ovaj princip prijema poznat je pod imenom *prijemnik sa promenom učestanosti ili superheterodin*.

Superheterodin. Ovaj sistem prijema pronašao je 1917. francuski inženjer Lisjen Levi (Lucien Levy). Njegova osnovna ideja sastoji se u pretvaranju prijemne učestanosti u neku određenu učestanost ili, takozvanu, *međufrekvenciju* (MF). Dakle, modulisani talas pojačava se posle pretvaranja učestanosti. Za ovaj princip rada pojačavač se može konstruisati da radi uvek na istoj učestanosti-međufrekvenciji, što znači da ima veću efikasnost, a posebno bolji odnos između pojačanja i selektivnosti. Posle pojačanja međufrekventnog signala sledi detekcija i, tek na kraju, niskofrekventno pojačanje. Princip rada superheterodinog prijemnika ilustruje *sl.* 141. Ulazno kolo je podešeno na prijemnu učestanost f_1. Signal učestanosti f_2 iz lokalnog oscilatora O šalje se u modulator gde se sabira sa prijemnim signalom učestanosti f_1. U modulatoru se proizvodi izbijanje učestanosti $f_2 - f_1$. Učestanost f_2 podešava se tako da razlika $f_2 - f_1$ bude jednaka izabranoj (usvojenoj) učestanosti (za vrednost) međufrekvencije MF. Na *sl.* 141: D predstavlja detektor, A_{NF} niskofrekventni pojačavač.

Radio-difuzni prijemnici obično koriste međufrekventnu učestanost od 455 kHz.

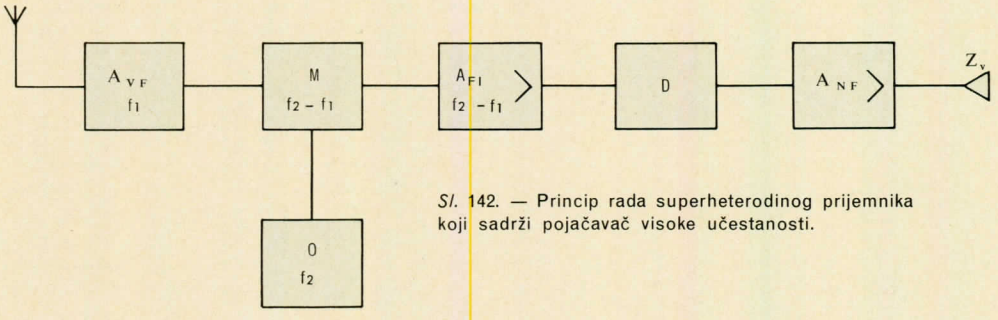
Da bi se primio signal željene učestanosti, npr., 1 MHz, lokalni oscilator treba da proizvede oscilacije učestanosti:

$$1\,000 \text{ kHz} + 455 \text{ kHz} = 1\,455 \text{ kHz}$$

čije bi izbijanje $f_2 - f_1$ zaista bilo jednako učestanosti međufrekvencije MF od 455 kHz. Pored izbijanja $f_2 - f_1 = 455$ kHz, koje omogućuje prijem učestanosti f_1 od 1 000 kHz, treba primetiti da ista vrednost učestanosti lokalnog oscilatora f_2 može da izazove takođe i izbijanje $f_3 - f_2 = 455$ kHz, ako učestanost f_3 od 1 910 kHz indukuje dovoljan napon na ulaznom kolu podešenom na prijemnu učestanost f_1. Na taj način, prijemnik će jednovremeno primati nepoželjnu učestanost f_3 i željenu učestanost f_1.

Ovo predstavlja nedostatak samog principa superheterodina. Učestanost f_3 nazvana je *simetričnom učestanosti* — u odnosu na učestanost f_1, od koje se razlikuje za dvostruku vrednost međufrekventne učestanosti. U primeni ne postoji stvarna opasnost da učestanost od 1 910 kHz izazove smetnje za prijem talasa od 1 000 kHz, ako podešeno ulazno kolo ima dovoljno izraženu rezonancu.

U slučaju da se snažna predajna stanica nalazi u blizini prijemnika i da radi na simetričnoj učestanosti, postoji opasnost da se poremeti rad prijemnika. Ovaj problem se može rešiti korišćenjem visokofrekventnog pojačavačkog stepena pre promene učestanosti. To je upravo i urađeno u savremenim prijemnicima *(sl.* 142).



Sl. 142. — Princip rada superheterodinog prijemnika koji sadrži pojačavač visoke učestanosti.

GRANICA OSETLJIVOSTI PRIJEMNIKA. Osetljivost prijemnika izražava se naponom koji mora da se dovede na ulaz, da bi se na izlazu dobila odgovarajuća snaga, obično 50 mW. Na prvi pogled izgleda da bi povećanjem broja pojačavačkih stepena mogla da se ostvari ma koja željena osetljivost. Međutim, to nije moguće, pošto pri prijemu, pored korisnog signala, postoje parazitni signali i različiti šumovi, koji se takođe pojačavaju. Na ovaj način se dolazi do nekog odnosa signal/šum, ispod koga je nekorisno dalje pojačanje prijemnog signala.

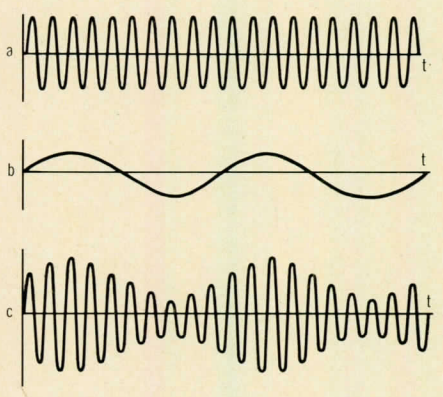
Atmosferske i industrijske smetnje. Električna pražnjenja pri atmosferskim nepogodama stvaraju parazitne signale koji pri prijemu prouzrokuju snažne smetnje, naročito na dugim talasima. U tropskim predelima, gde su nepogode česte, prijem je najčešće nemoguć. Parazitni atmosferski signali su i u ostalim oblastima prisutni u izvesnoj meri. Ovim smetnjama se dodaju smetnje prouzrokovane industrijskim električnim sistemima (mašine, razne električne mreže). Nivo svih ovih smetnji raste ako se povećava osetljivost prijemnika.

Termički šumovi. Kretanje slobodnih elektrona obrazuje struju u električnim kolima prijemnika, a njihova energija je srazmerna apsolutnoj temperaturi. Pri porastu temperature raste i energija slobodnih elektrona, usled čega je i haotično kretanje elektrona intenzivnije, što može da ima za posledicu male promene napona (šum) na krajevima provodnika. Ovi šumovi pojavljuju se podjednako u celom propusnom opsegu pojačavača, što znači da su utoliko izrazitiji ukoliko je propusni opseg pojačavača veći.

Šumovi prouzrokovani elektronskim cevima. Emisija elektrona sa katode nije strogo ujednačena, usled čega se javlja Šotkijev (Schottky) šum ili efekat sačme. Smetnje, termički šumovi i sopstveni šum prijemnika obrazuje šum koji se ne može izbeći. Povećanjem osetljivosti prijemnika, pojačava se korisni signal, ali se takođe u istom odnosu pojačava i šum. Stoga, da bi se obezbedila sigurnost neke veze, potrebno je povećati korisni signal, odnosno snagu predajnika.

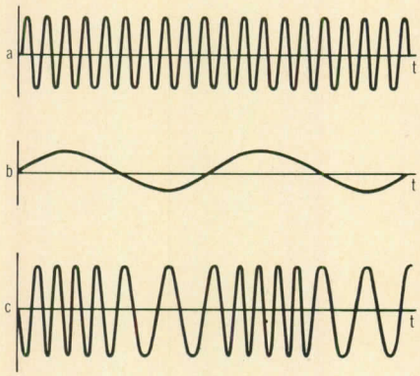
FREKVENTNA MODULACIJA

Postupak frekventne modulacije (FM) predstavlja dalji korak u tehnici radio-difuzije i ima za cilj da otkloni ili bar znatno smanji uticaj atmosferskih i industrijskih smetnji i da olakša prenos većeg opsega zvučnih učestanosti. Ovaj postupak modulacije omogućuje da se ostvari sistem radio-difuzije, koja ima izvanredne osobine reprodukcije.

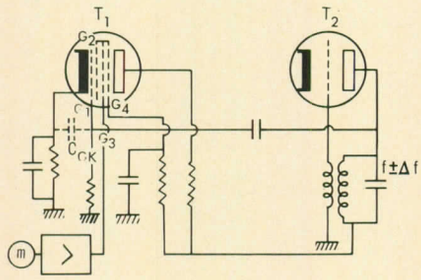


Sl. 143. — Amplitudna modulacija:
a — nemodulisani signal visoke učestanosti;
b — signal niske učestanosti;
c — amplitudno modulisani signal visoke učestanosti.

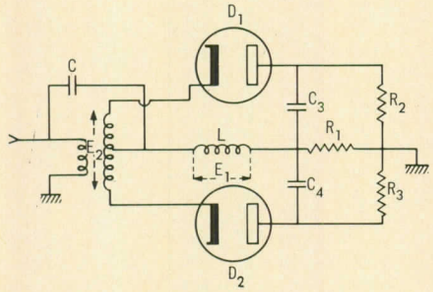
Opisani sistemi predaje koristili su amplitudnu modulaciju, što znači da je amplituda nosećih talasa modulisana srazmerno amplitudi zvučnog signala *(sl.* 143). Nasuprot tome, u sistemu frekventne modulacije, amplituda nosećeg signala ostaje nepromenjena, dok se učestanost nosećeg talasa menja srazmerno amplitudi signala koji se prenosi *(sl.* 144). Ako raste amplituda signala koji se prenosi, raste i širina opsega promene noseće učestanosti *f*. Da se ne bi ometao prenos drugih stanica, za sada je dozvoljena promena učestanosti ograničena na 100 kHz i sa jedne i sa druge strane noseće učestanosti *f*. Ovo znači da najveća širina prenosnog kanala svake stanice iznosi 200 kHz, što, naravno, zahteva upotrebu vrlo visokih učestanosti. Obično je promena učestanosti ograničena na 75 kHz i s jedne i s druge strane nominalne učestanosti *f*.



Sl. 144. — Frekventna modulacija:
a — nemodulisani signal visoke učestanosti;
b — signal niske učestanosti;
c — frekventno modulisani signal visoke učestanosti.



Sl. 145. — Shema principa frekventne modulacije pomoću reaktivne cevi.



Sl. 146. — Principska shema diskriminatora za demodulaciju frekventno modulisanog signala.

PREDAJNIK SA FREKVENTNOM MODULACIJOM. Shema predajnika sa frekventnom modulacijom ne razlikuje se mnogo od sheme predajnika sa amplitudnom modulacijom. Postoje različiti postupci za frekventnu modulaciju. Jedan od najjednostavnijih postupaka koristi promenu ulazne kapacitivnosti elektronske cevi zavisno od promene njenog pojačanja. Na *sl.* 145. prikazan je korišćeni princip. Koristi se heksoda sa dve upravljačke rešetke G_1 i G_3, odvojene pomoću zaklona koji čine rešetke G_2 i G_4. Prva rešetka, pa, prema tome, i unutrašnja kapacitivnost rešetka-katoda C_{GK} povezane su paralelno oscilatornom kolu i predstavljaju deo oscilatorskog stepena. Ako se na drugu upravljačku rešetku G_3 dovede promenljiv napon, menja se kapacitet rešetka-katoda, što prouzrokuje promenu Δf učestanosti oscilatornog kola. Da bi se ostvarila frekventna modulacija, dovoljno je da se rešetka G_3 napaja naizmeničnim signalom neposredno iz mikrofona *m* ili preko pojačavača, ukoliko je potreban. Cevi koje se koriste za promenu učestanosti nazivaju se *reaktivne cevi.*

Potrebno je napomenuti da se pri promeni učestanosti postupkom frekventne modulacije ne sme nimalo menjati amplituda nosećeg talasa, odnosno da ostaje strogo konstantna.

PRIJEM FREKVENTNO MODULISANIH TALASA. Iz frekventno modulisanog talasa ne može se pomoću uobičajenog amplitudnog detektora dobiti početni, modulacioni signal. Zaista, posle ispravljanja talasa jednake amplitude dobija se jednosmerni napon, koji nimalo ne deluje na aparate za reprodukciju zvuka, slušalice ili zvučnike, ili na uređaje za snimanje signala. Umesto da se primljeni frekventno modulisani talasi detektuju, odnosno isprave, potrebno ih je demodulisati, što znači da iz njih treba izdvojiti prvobitnu komponentu niske učestanosti. Demodulacija se obavlja pomoću diskriminatora, čiji je zadatak da promenu učestanosti pretvori u odgovarajuću promenu napona. Da bi se ovaj zadatak uspešno obavio, potrebno je da amplituda signala bude strogo konstantna, što se postiže pomoću ograničavanja amplitude ili limitera, koji odseca deo signala iznad određene vrednosti.

Parazitni signali koji ometaju prenos amplitudno modulisanih talasa, ne utiču na frekventno modulisane talase, pošto se odstranjuju postupkom odsecanja.

Diskriminator. Principska shema najčešće korišćenog diskriminatora predstavljena je na slici 146. Naponski signal se dovodi, s jedne strane, na primar transformatora, a s druge, preko kondenzatora C i otpornika R_1, na namotaj L. Izvod sekundara transformatora nalazi se u sredini, tako da svaka polovina namotaja napaja po jednu od dioda D_1 i D_2. Ako je E_1 napon na krajevima namotaja L i E_2 napon na krajevima sekundara, svaka dioda prima i ispravlja napon $E_1 + \frac{E_2}{2}$. Posle ispravljanja, svaki se od ovih napona filtrira pomoću otpornosti R_2 i R_3 i kondenzatora C_3 i C_4.

Ako je učestanost primarnog signala potpuno jednaka nominalnoj učestanosti *f*, naponi $\frac{E_2}{2}$ sa obe polovine biće fazno pomereni u odnosu na napon E_1, i to jedan za 90° unapred a drugi za 90° unazad. Dakle, dobijeni naponi posle ispravljanja biće u protivfazi i jednaki po amplitudi. Prema tome, oni se u ovom slučaju poništavaju i ne pojavljuje se nikakav napon na krajevima otpornika R_1.

Ako se učestanost signala promeni i prestane da bude jednaka nominalnoj učestanosti *f*, jednakost fazno pomerenih napona više ne postoji i sistem postaje neuravnotežen, usled čega se na krajevima otpornika R_1 pojavljuje napon niske učestanosti. Na *sl.* 147. prikazana je shema rada superheterodinog prijemnika sa frekventnom modulacijom. Pojačavač A_{VF} radi na prijemnoj učestanosti f_1. Oscilator O proizvodi učestanost f_2, koja se zajedno sa signalom iz pojačavača A_{VF} učestanosti f_1 dovodi u modulator M. Metodom izbijanja dobija se rezultujući signal međufrekvencije $f_2 - f_1$, koji se pojačava pomoću pojačavača A_{MF}. Zatim se amplituda signala ograničava pomoću limitera L. Najzad, u demodulatoru D dobija se signal niske učestanosti koji pojačan u pojačavaču niske učestanosti A_{NF}, napaja zvučnik (Zv).

PROPUSNI OPSEG. Broj predajnika je ograničen usled mogućnosti uzajamnog ometanja između različitih stanica, odnosno mešanja njihovih programa. U stvari, kad bi predajnik emitovao talase tačno određene učestanosti i amplitude, što znači bez ikakve modulacije, zauzeo bi beznačajno mali opseg učestanosti u odnosu na ukupan spektar učestanosti. Međutim, pošto se signal niske učestanosti *f* moduliše noseći talas visoke učestanosti F, to se izlazni signal iz predajnika ne sastoji više samo od učestanosti F, već, takođe, i od učestanosti $F + f$ i $F - f$, koje se nazivaju *bočnim učestanostima.* Prema tome, prijemnik treba da bude osetljiv na učestanosti koje se nalaze u frekventnom opsegu od $F + f$ do $F - f$. Učestanost u radio-telegrafiji je reda veličine nekoliko stotina herca. Međutim, da bi se u radio-telefoniji sačuvala dobra razumljivost i prirodna boja ljudskog glasa, potrebno je da se prenose učestanosti do 4 500 Hz. Dakle, ukupna širina kanala treba da iznosi 9 kHz, što zahteva da se noseće učestanosti različitih predajnika moraju razlikovati najmanje za tu vrednost.

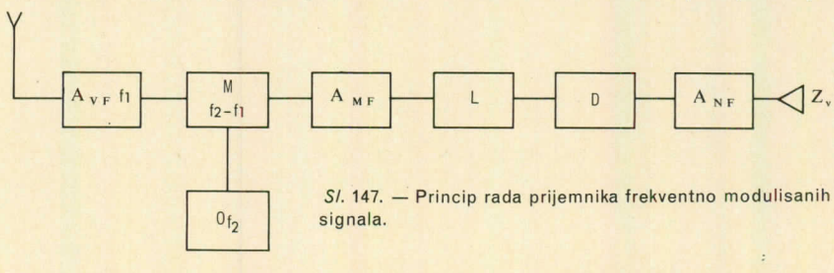
Prenos televizijskih slika zahteva mnogo šire frekventne opsege, reda veličine megaherca. Razumljivo je da takav opseg učestanosti može da se prenosi samo sa velikom nosećom učestanosti koja se nalazi u metarskom ili decimetarskom području.

Zna se da skup bočnih učestanosti, koje su simetrično raspoređene sa jedne i druge strane nominalne ili noseće učestanosti F, obrazuju utoliko veći frekventni opseg ukoliko je veća količina informacija prenesenih u jedinici vremena. Broj novih predajnika neprestano raste usled sve većih potreba, što neminovno vodi zakrčenosti etra. Proces zakrčivanja etra može da se uspori samo strogim poštovanjem međunarodnih propisa o raspodeli učestanosti između pojedinih država, i daljom preraspodelom učestanosti na razne korisnike unutar svake zemlje. Da bi se smestio što veći broj različitih prenosa u raspoloživi opseg učestanosti, dozvoljeno je i da više predajnika radi na istoj učestanosti F, pod uslovom da se koristi sistem usmerenih antena i sa ograničenom snagom predajnika, kako bi se u najvećoj meri smanjila mogućnost interferencija talasa. Ovo predstavlja samo delimično rešenje, dok stvarno rešenje počiva na primeni novih tehnika: prenosu samo jednog bočnog opsega, odnosno primeni sistema multipleks.

Predajnik sa jednim bočnim opsegom. U ovom sistemu pri predaji, filtrira se proizvedeni spektar da bi se odstranio jedan od dva bočna opsega, a osim toga se i amplituda nosećeg talasa znatno smanjuje. Pri prijemu ponovo se uspostavlja pogodna amplituda nosećeg talasa. Odstranjivanjem jednog od dva bočna opsega smanjuje se zakrčenost etra postojećim signalima, čime i oni postaju manje osetljivi na smetnje i feding (*fading*).

Sistem multipleks. Sistemi multipleks omogućuju da se na istom radio-električnom kanalu jednovremeno prenosi više telefonskih veza. U ovu svrhu koriste se dve metode: transponovanje spektra učestanosti (frekventni multipleks) i vremenski multipleks.

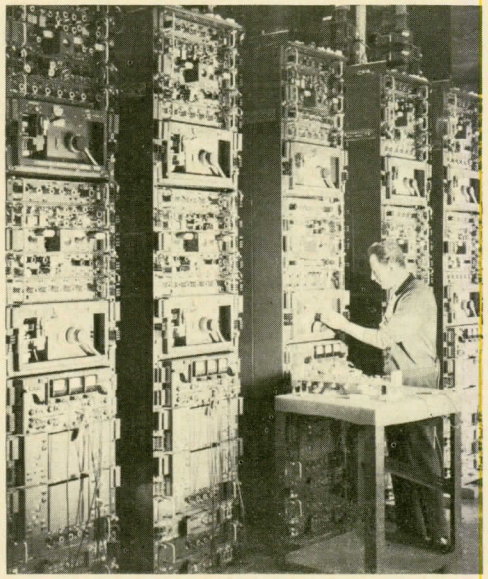
U postupku transponovanja pomera se na poseban način spektar učestanosti svake prenesene veze. Ako svaka veza obuhvata spektar učestanosti od 100 do 3 600 Hz, druga veza biće pomerena, npr., na 8 000 Hz, tako da obuhvata spektar učestanosti od 8 100 do 11 600 Hz. Treća veza biće pomerena na 12 000 Hz i obuhvata spektar učestanosti od 12 100 do 15 600 Hz. Isti postupak se primenjuje



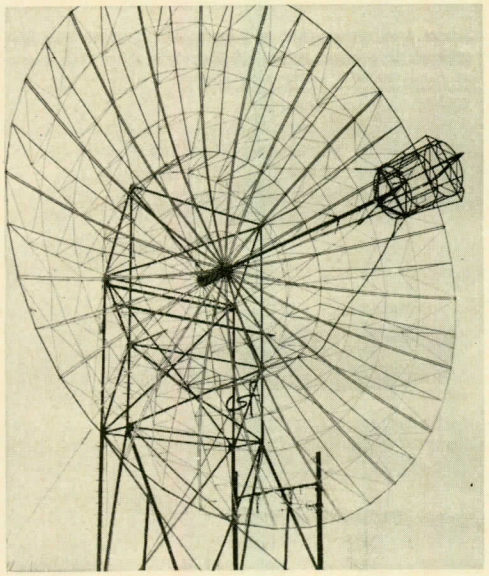
Sl. 147. — Princip rada prijemnika frekventno modulisanih signala.



Sl. 148. — Relejni toranj za radio-veze (veza Pariz — Strazbur).



Sl. 149. — Uređaji za radio-vezu stanice za 1800 kanala.



Sl. 150. — Predajna antena za troposferske veze.

i na sve ostale veze. Dakle, noseća učestanost je modulisana skupom učestanosti svih transponovanih veza. Pri prijemu, demoduliše se rezultujući signal i detektovane struje se podvrgavaju obrnutom postupku, pri čemu svaka veza ponovo dobija prvobitni opseg učestanosti.

Pri upotrebi vremenskog multipleksa elektronski prekidač sukcesivno ustupa liniju svakoj vezi u trajanju od nekoliko milionitih delova sekunde, ali tako da se svaka veza uspostavlja dovoljno često da uho može pouzdano da raspozna prvobitni signal. Naravno da elektronski prekidač u prijemniku radi sinhrono sa prekidačem u predajniku, tako da signale koji pripadaju istoj vezi ponovo spaja u celinu, koju dostavlja korisniku. Posebnim signalom obezbeđuje se sinhroni rad oba prekidača.

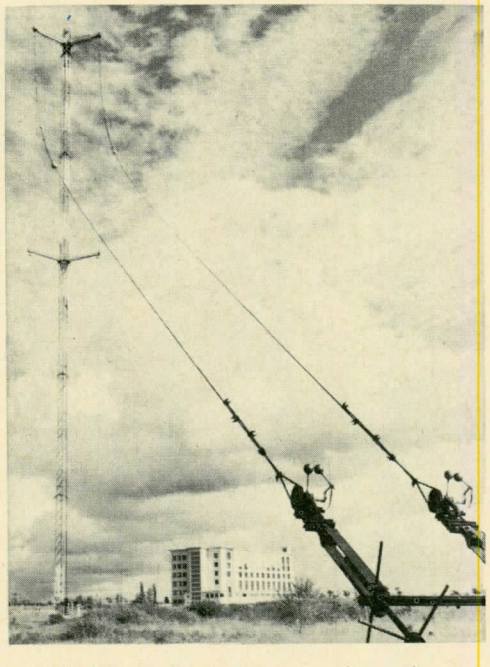
Povećanje propusne moći telefonskih linija. Statističko proučavanje telefonskih razgovora pokazuje da »praznine«, tj. vremenski intervali u kojima je kanal neiskorišćen, predstavljaju oko polovine ukupnog vremena zauzetosti linija. Dakle, korišćenjem ovih »praznina« u razgovoru može da se udvostruči broj jednovremenih veza na jednom kanalu, čime se povećava njegova propusna moć. Postupak se sastoji u »sečenju« razgovora elektronskim putem u vrlo kratke delove, reda veličine dve mikro sekunde, i u sukcesivnom prenosu svakog dela razgovora preko kanala koji je trenutno slobodan. Naravno, sukcesivni delovi razgovora mogu da koriste različite kanale.

Bežični prenos. Sistem multipleks je posebno dragocen za prenos telefonskih veza, bilo koaksijalnim kablom, bilo posredstvom usmerenog bežičnog prenosa, koji se ponekad naziva Hercov kabl. Bežični prenos je ekonomičniji od kablovskog, naročito u slučaju brežuljkastih predela između stanica. Bežični prenos često može da zameni vezu ostvarenu podmorskim kablovima čije je postavljanje i održavanje veoma skupo. Kao primer može da se navede telefonska veza između Francuske i Korzike, duga 200 km. I televizija predstavlja još jedno područje primene Hercovih kablova, pošto oni mogu da prenose, kako stotine telefonskih i telegrafskih veza, tako i više televizijskih programa.

Predajnici za bežične veze koriste vrlo malu snagu, manju od 1 W. Koristi se učestanost reda nekoliko hiljada megaherca. Relejne stanice su postavljene na istaknutim tačkama ili na tornjevima (*sl.* 148), sa međusobnim rastojanjem oko 40 km. Krajnje stanice, komandom na daljinu upravljaju radom relejnih stanica. Demodulacija i remodulacija obično se ne obavljaju u relejnim stanicama, već samo u krajnjim stanicama, koje poseduju relativno složene uređaje za transponovanje učestanosti i veliki broj filtera koje oni zahtevaju (*sl.* 149).

Troposferske veze. Ultrakratki talasi, usmereni pomoću paraboličnog reflektora ili sistema antena za efikasno usmeravanje (*sl.* 150), prostiru se pravolinijski i, teorijski, ne mogu da premaše polovinu vizuelnog dometa. Međutim, ostvareni su znatno veći dometi koji se mogu objasniti uz pomoć teorije troposferskog prostiranja. Troposfera dostiže visinu do 10 km od zemljine površine. Dielektrična konstanta suvog vazduha je neznatno veća od jedinice i raste sa stepenom vlage. Zbog promene dielektrične konstante, talasi koji se prostiru u troposferu savijaju se blago prema tlu, usled čega raste i njihov domet. Međutim, pod određenim uslovima, oni se mogu prostirati između dva sloja atmosfere sa različitim stepenom vlage i mogu dostići domet od više hiljada kilometara.

Pogodni atmosferski uslovi najčešće se sreću u toplim oblastima Zemljine kugle, gde se već uspostavljaju troposferske veze sa dometom od 400 do 1 500 km, koje se ponekad nazivaju *transhorizon*. Pri ovoj vezi se koriste, bilo decimetarski talasi sa predajnikom snage reda kilovata, bilo metarski talasi sa snagom reda 50 kW.



Sl. 151. — Predajna stanica francuske radio-difuzije u Aluju.

RADIO-DIFUZIJA. Godina 1925. smatra se godinom nastajanja radio-difuzije, novog sredstva za neposredno saopštavanje novosti, sredstva informacija, obrazovanja, ali i moćnog sredstva propagande na raspolaganju vlada.

Savremeni radio-difuzni sistemi zahtevaju značajnu organizacionu strukturu, koja se ne odnosi samo na snažne predajne stanice (*sl.* 151), već i na celu mrežu prenosa koja povezuje oblasne i nacionalne centre. Ovi centri međusobno izmenjuju programe, bilo da oni potiču iz samih studija, bilo od reporterskih ekipa. Procenjuje se da danas u svetu radi više od 12 000 predajnih radio-stanica, a da ukupan broj prijemnika premašuje 400 miliona. I stvarno, ne postoji tačka na Zemljinoj kugli, gde ne bi mogao da se primi bar jedan program radio-difuzije. U najnaprednijim zemljama, od pojave tranzistorskih radio-prijemnika računa se na više prijemnika po domaćinstvu.

Da bi povećale zonu pouzdanog prijema, velike stanice za radio-difuziju koriste vrlo snažne predajnike visoke učestanosti. Tako, Radio-stanica Luksemburg koristi više predajnika na dugačkim talasima koji normalno rade u paraleli i čija ukupna izračena snaga iznosi 1 100 kW. Snaga najnovijeg od ovih predajnika iznosi 600 kW. Njegov izlazni stepen sadrži četiri cevi po 150 kW sa koeficijentom korisnog dejstva od 90%. Ove su cevi sa keramičkim omotačem a hlade se isparavanjem vode.

RADAR. Jedna od najvažnijih primena kratkih talasa je sistem za otkrivanje objekata (detekcija) pomoću elektromagnetskih talasa, koji su Amerikanci, tokom poslednjeg rata, nazvali RADAR (Radio Detecting And Ranging). Prvi sistem za elektromagnetnu detekciju bio je postavljen 1935. na obali Normandije radi otkrivanja ledenih bregova.

Radar radi na sličnom principu kao odjek, ali umesto zvučnih talasa koristi elektromagnetne talase koji se odbijaju od prepreke. Radar koristi kratke i ultra kratke talase, koji se prostiru pravolinijski a odbijaju se prema analognim zakonima prostiranja svetlosti poznatim iz optike. Da se ostvari veliki domet, potrebna je znatna koncentracija talasa u smeru prepreke. Princip rada radara zasnovan je na slanju kratkih impulsa ili povorke talasa sa trajanjem od nekoliko mikrosekundi u određenim vremenskim intervalima, i na prijemu istih signala posle odbija-

Fot. C.S.F., C.S.F.-Gilbert Warin, C.S.F.-René Bouillot, C.S.F.-Roger- Viollet.

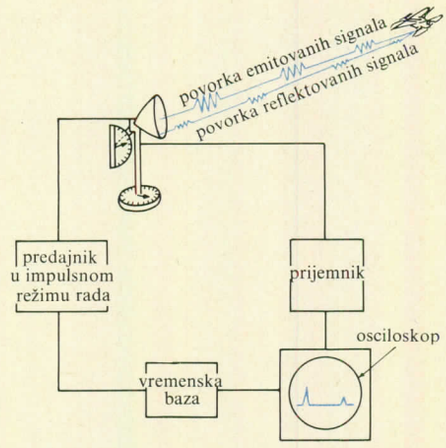
nja od prepreke. Merenje vremena koje protekne između emitovanja i prijema istog impulsa posle odbijanja od prepreke omogućuje da se sazna udaljenost objekta, koja se čita neposredno na ekranu osciloskopa (*sl.* 152). Vremenska baza, vrsta elektronskog merača vremena, određuje trenutak emitovanja impulsa i obezbeđuje sinhrono okidanje osciloskopa, tj. pomeranje svetle tačke (spota) na njegovom ekranu.

Od postanka radara, njegova talasna dužina ne prestaje da se smanjuje, prvo decimetarska, zatim centimetarska, ona se danas približava milimetarskom talasnom području. Ovi se talasi proizvode elektronskim cevima za hiperfrekvencije tipa klistron ili magnetron. Antene su napravljene od paraboličnih reflektora, koji su pokretljivi u horizontalnom i vertikalnom pravcu. Veza između oscilatora hiperfrekventnih impulsa i paraboličnog reflektora ostvaruje se pomoću talasovoda koji je izgrađen od metalne cevi kvadratnog, pravougaonog ili kružnog preseka. Talasi se, uz minimalno slabljenje, prostiru kroz talasovod tako što se višestruko odbijaju od njegovih zidova. Pravac ose parabole dozvoljava da se odredi mesto prepreke u prostoru, pošto neposredno daje podatke o njegovom azimutu i položaju, dok osciloskop određuje udaljenost prepreke.

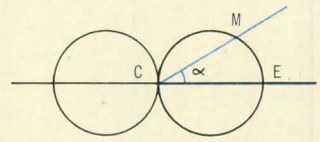
Razume se da je takav sistem za detekciju, koji radi noću i danju, pri lepom vremenu kao i u gustoj magli, i koji trenutno određuje koordinate aviona ili neprijateljskog broda, bio za vreme drugog svetskog rata brižljivo proučavan, što je imalo za posledicu njegova značajna usavršavanja.

• Jedno od vrlo značajnih usavršavanja bilo je ostvarenje radara čija se parabolična antena neprekidno okreće, što dozvoljava osmatranje punog horizonta (svih 360°). Sinhrono sa okretanjem antene ostvaruje se kružna vremenska baza osciloskopa tako da se impulsi, odbijeni od prepreke, pojavljuju na ekranu osciloskopa kao svetle tačke koje u polarnim koordinatama predstavljaju položaj prepreke. Ako ekran ima takve osobine da ove tačke ostaju svetle do dolaska impulsa odbijenih od iste prepreke prilikom sledećeg obrtanja antene, sačuvaće tragove svih prepreka od kojih se impulsi odbijaju u toku jednog obrtaja antene. Centar ekrana osciloskopa pri tom odgovara položaju antene. Ovaj sistem, skraćeno označen sa PPI (Plan Position Indication), omogućuje da osmatrač na ekranu sagleda vernu sliku – pravu kartu – oblasti, na kojoj se, usled različitog koeficijenta refleksije mogu razlikovati čak i objekti tako male visine kao što su obala mora, jezera, železničke šine, putevi, mostovi, brežuljci. Naravno, predmet koji se kreće relativno brzo, recimo avion, zapaža se na ekranu kao sveta pokretna tačka. Udaljenost pokretnog objekta srazmerna je rastojanju njegovog lika od centra ekrana. Za tačnije određivanje njegovog položaja dovoljno je prekinuti okretanje antene i usmeriti je ka ispitivanom objektu. Vertikalnim usmeravanjem antene određuje se visina pokretnog predmeta. Na usavršavanju sistema PPI i dalje se radilo, tako da se sada obrtne parabolične antene često zamenjuju velikim brojem elemenata malih dimenzija, koji se napajaju naponima čija se faza menja. Pogodnim podešavanjem fazne razlike između različitih elemenata ostvaruje se pomeranje električnog snopa u prostoru. Ovaj postupak omogućuje znatno veću brzinu osmatranja, pošto nije ograničen mehaničkom inercijom obrtne antene i naziva se *elektromagnetno osmatranje*.

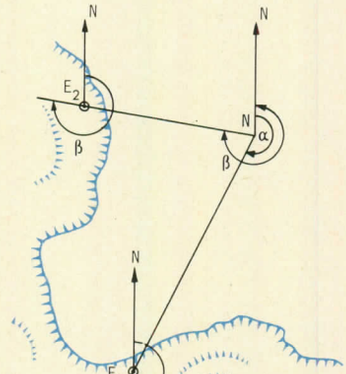
• Drugo značajno usavršavanje predstavlja radar sa *automatskim brisanjem lika nepokretnih predmeta*. Ovako usavršen radar registruje postojanje samo pokretnih predmeta, što predstavlja veliku prednost pošto likovi pokretnih predmeta često iščezavaju sa svetle osnove koja predstavlja kartu osmatrane oblasti i može se dogoditi da ih osmatrač ne primeti. Da bi se izbrisali likovi nepokretnih, a zadržali samo likovi pokretnih predmeta, koristi se Dopler-Fizoov efekat (Doppler-Fizeau), tj. pojava da je učestanost signala odbijenih od pokretnih i nepokretnih predmeta različita. Stoga se meri učestanost izbijanja emitovanih i odbijenih talasa. Ako je učestanost



Sl. 152. — Princip rada radara. Vremenska baza upravlja radom predajnika, pojavom svetle tačke i njenim horizontalnim kretanjem na ekranu indikatorske cevi. Posredstvom prijemnika registruje se odlazni i povratni signal na ekranu indikatorske cevi.



Sl. 153. Dijagram prijema okvirne radio-gonio-metrijske antene.



Sl. 154. Princip radio-goniometrije.

izbijanja jednaka nuli, što odgovara refleksiji sa nepokretnih predmeta, ne pojavljuje se svetla tačka na ekranu osciloskopa. U suprotnom slučaju, koji nastaje pri odbijanju talasa od pokretnih predmeta, učestanost izbijanja se razlikuje od nule, pa se na ekranu osciloskopa pojavljuje svetla tačka. Merenje učestanosti izbijanja obavlja se automatski i omogućava da se odredi brzina pokretnog predmeta, koja se neposredno čita na brojčaniku. Ovakav uređaj se koristi za kontrolu brzina motornih vozila. Primena Dopler-Fizoovog principa u izgradnji malih prenosnih uređaja koje nosi samo jedan čovek vrlo je značajna za kopnene trupe, jer su u stanju da otkriju prisustvo čoveka koji puže po tlu na udaljenosti od nekoliko kilometara.

Radar nalazi mnogobrojne primene naročito u mornarici i vazduhoplovstvu, gde se koristi kao pomoćno sredstvo za navigaciju, za slepo sletanje i u teritorijalnoj protivavionskoj odbrani.

Obično, najveći domet savremenih radara iznosi do 5 000 km. Da bi se ostvario toliki domet, potrebna je velika trenutna snaga od više hiljada kilovata, što odgovara snazi lokomotive. Međutim, impulsna tehnika omogućuje upotrebu tako velike snage u vrlo kratkom vremenu, čak i uz korišćenje pokretnih generatora srednje snage.

PRIMENA RADIOKOMUNIKACIJA U POMORSKOM SAOBRAĆAJU. Moreplovci su čak i pre ere elektronike koristili kao sredstvo veze radio-talase, koji, po svojoj prirodi, ne zahtevaju izgradnju nikakvog materijalnog posrednika za prenos informacija. Prvi poziv za pomoć SOS poslat je 23. januara 1909, posle sudara dva parobroda na Atlantiku. Tom prilikom, zahvaljujući »bežičnoj telegrafiji«, sačuvani su životi 750 putnika. Ovaj događaj imao je veliki odjek u svetu i podstakao je vlade mnogih zemalja da donesu zakone o obaveznoj ugradnji bežičnih uređaja za brodove određene tonaže.

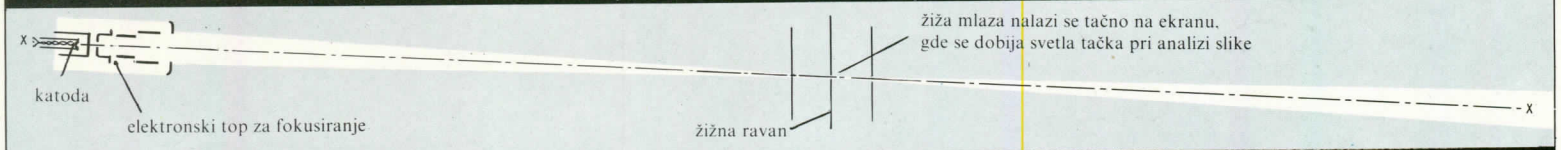
Zahvaljujući razvitku elektronike, uređaji za telekomunikacije postali su sve savršeniji i imali sve manju zapreminu, što je omogućilo njihovu upotrebu i na manjim brodovima bez stručnog osoblja. Elektronika je znatno doprinela sigurnijim uslovima plovidbe, koji se ogledaju ne samo u emitovanju meteoroloških izveštaja i poziva za pomoć već i u razvijanju metoda koji omogućuju da se odredi položaj sopstvenog ili nekog drugog broda. Najznačajnije od ovih metoda su radio-goniometrija i posebni sistemi navigacije tipa Loran. Ove različite metode predstavljaju ogromnu korist kad gusta magla sprečava orijentaciju prema zvezdama.

Radio-goniometrija. Radio-goniometrijsku antenu sačinjava kalem velikih dimenzija u obliku rama, podešen na učestanost predajnika čiji se pravac određuje. Ram C može da se pokreće oko svoje vertikalne osovine. Elektromagnetni fluks kroz ram C (*sl.* 153), menja se sa uglom α, koji ravan rama zaklapa sa pravcem predajnika E. Fluks je jednak nuli ako je ravan rama paralelna sa linijama sila polja, odnosno ako je normalna na pravac predajnika, a maksimalan kad je ravan rama usmerena u pravcu predajnika. Dakle, da bi se odredio pravac predajnika, dovoljno je prijemnik, povezan sa ramom, podesiti na učestanost predajnika i okretati ram oko njegove vertikalne osovine dok se ne dobije maksimalna amplituda prijemnog signala. Tada je ram usmeren ka predajniku. Prirodno, postoji neodređenost smera predajnika od 180°, ali kako je smer uvek približno poznat, praktično ne postoji nikakva neizvesnost. Uostalom, ako je potrebno, svaka sumnja može da se otkloni pomoću male antene povezane sa ramom, koja pojačava signal primljen iz jednog, a smanjuje onaj iz suprotnog smera.

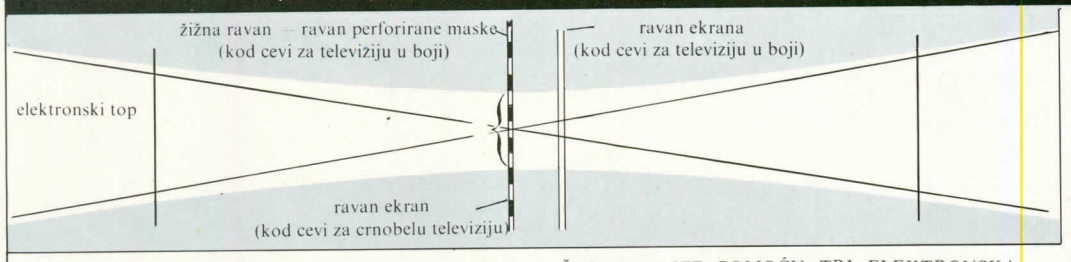
Da bi saznao svoj položaj, navigator određuje pravce u kojima se nalaze dve predajne stanice E_1 i E_2, koje su postavljene na dva različita mesta (*sl.* 154). Nađene pravce ucrtava u kartu, čiji presek određuje položaj broda B. Teorijski, za goniometrijsko određivanje mesta može da se upotrebi ma kakav predajnik. Obično se koriste posebni predajnici, poznati kao *radio-farovi*. Položaj, talasne dužine i signalni kodovi radio-fara izabrani su tako da određuju položaj broda sa maksimalnom tačnošću. Gustina radio-farova je vrlo velika u oblastima u kojima je živ pomorski saobraćaj. Brod koji nema radio-goniometar može da traži da mu kopnene stanice odrede položaj. U tom slučaju dve kopnene stanice primaju signale njegovog predajnika i određuju njihove pravce. Presek dobijenih pravaca određuje geografski položaj broda. Organizacija usluga i obučenost osoblja stanica su takvi da se za nekoliko minuta određuje položaj broda i saopštava korisniku.

Hiperbolička navigacija. Zadatak sistema za hiperboličku navigaciju je da neprekidno i automatski snabdeva navigatora podacima o geografskom položaju broda. Postoji više postupaka, ali su svi zasnovani na određivanju fazne razlike prijemnih talasa, koje, pri sinhronom radu, emituju dve nepokretne stanice. Glavni sistemi su Loran, Deka i Dektra. Oni u međusobnom odnosu imaju prednosti i nedostatke, ali se svi mogu svesti na sledeći osnovni princip:

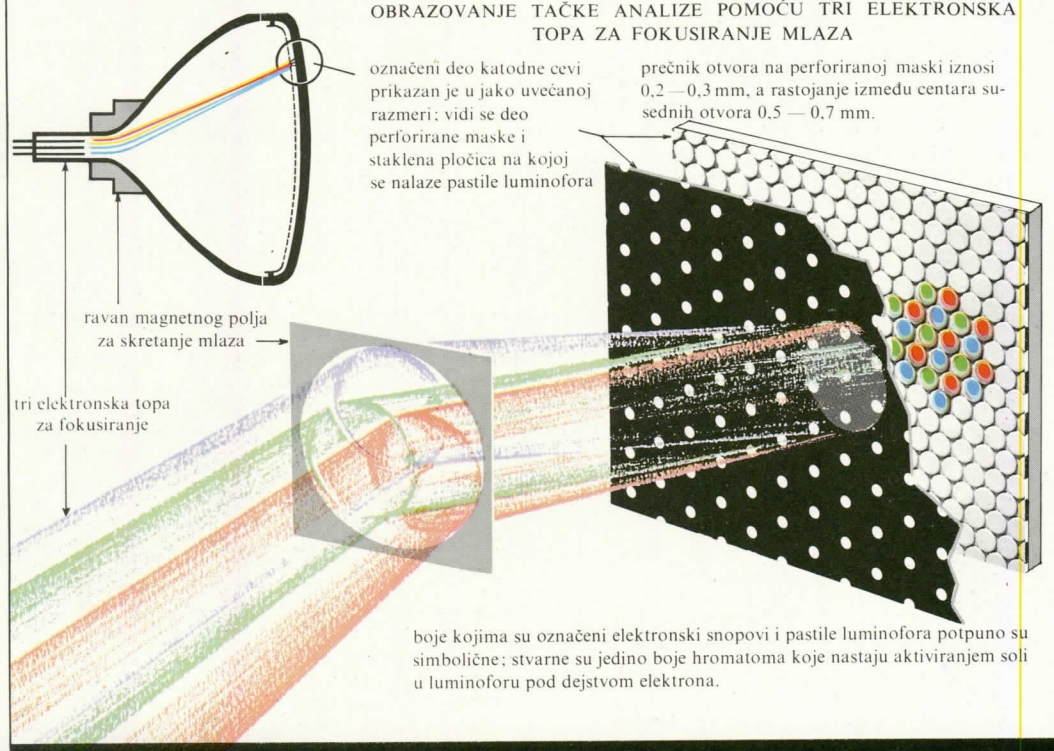
KATODNA CEV SA PERFORIRANOM MASKOM — FOKUSIRANJE ELEKTRONSKOG SNOPA — CRNOBELA TELEVIZIJA ILI TELEVIZIJA U BOJI



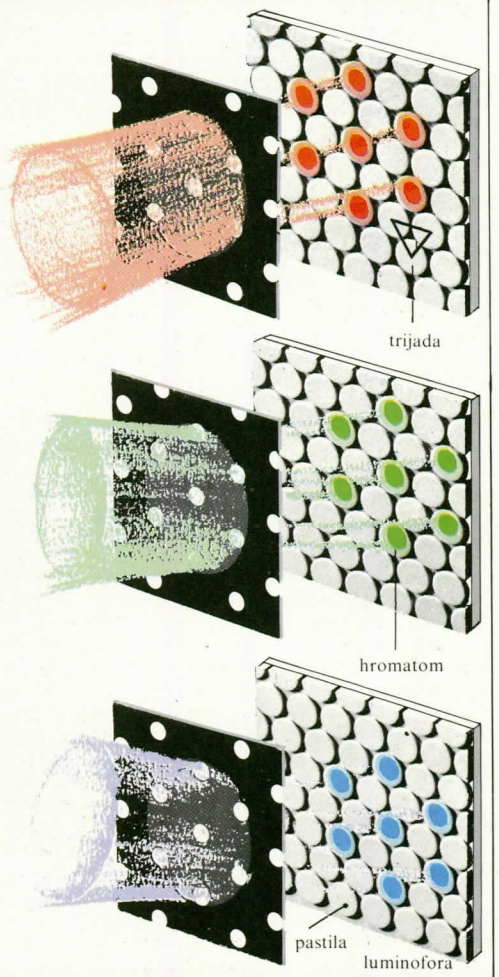
DETALJ IZMEĐU A I A` prikazan u povećanoj razmeri: tačka Z postaje oblast Z` usled pojave aberacije, koje su donekle analogne odgovarajućim pojavama u optičkim sistemima



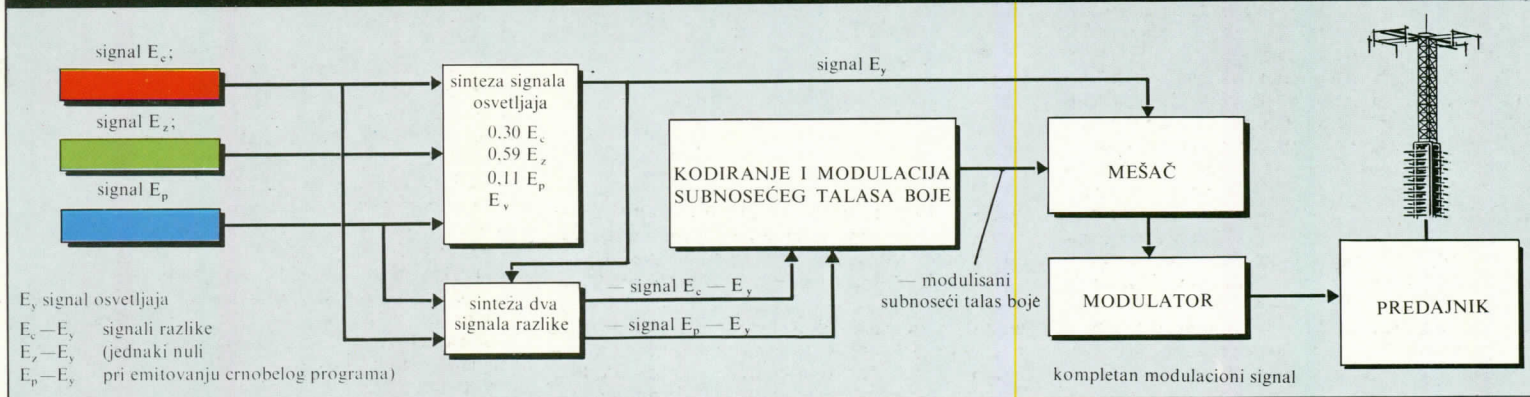
OBRAZOVANJE TAČKE ANALIZE POMOĆU TRI ELEKTRONSKA TOPA ZA FOKUSIRANJE MLAZA

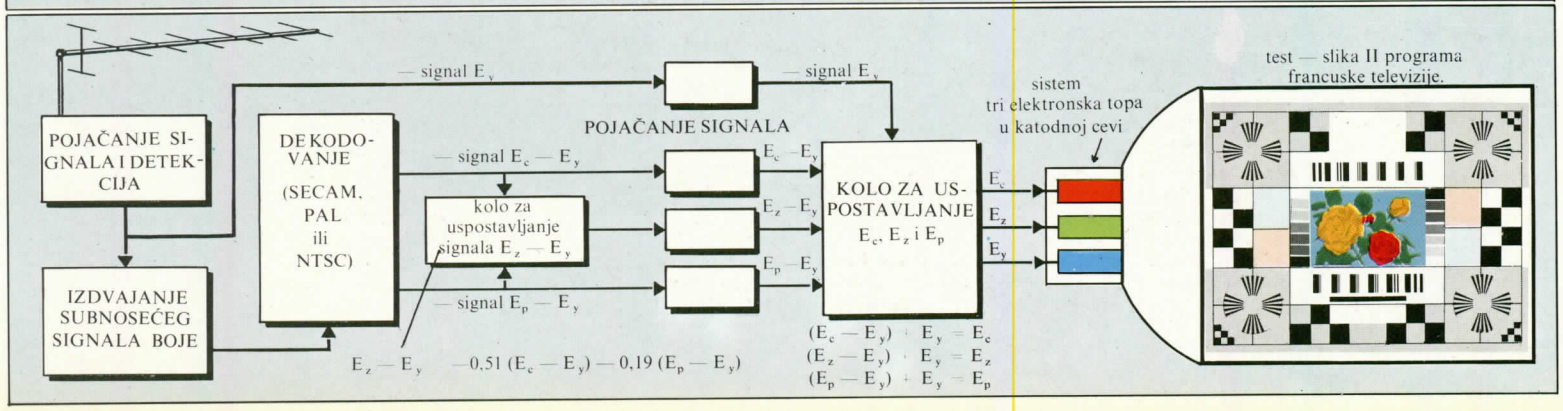


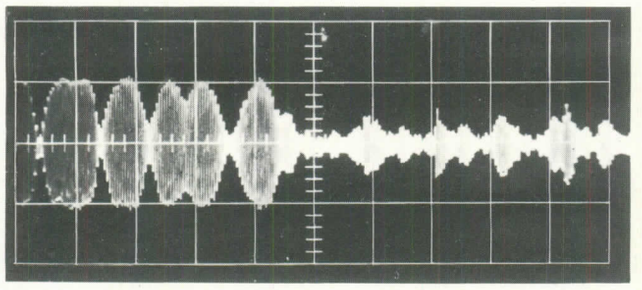
boje kojima su označeni elektronski snopovi i pastile luminofora potpuno su simbolične; stvarne su jedino boje hromatoma koje nastaju aktiviranjem soli u luminoforu pod dejstvom elektrona.



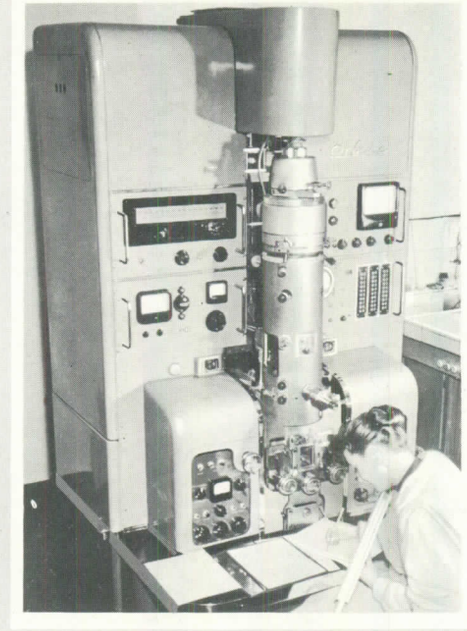
PRINCIP EMITOVANJA I PRIJEMA TELEVIZIJE U BOJI



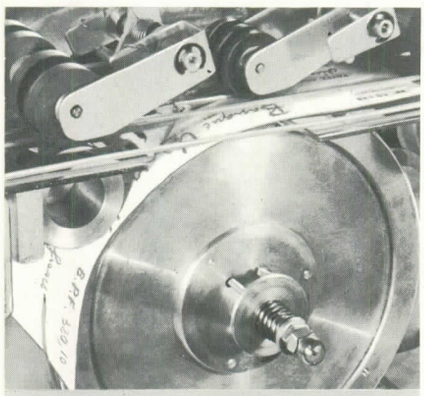


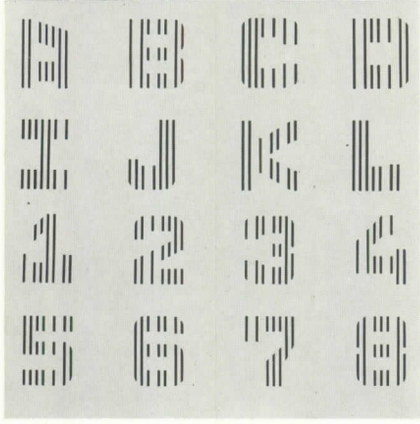


Osciloskopska analiza otkriva složenu prirodu jednoličnih »bip—bip« signala sa »Sputnjika«. Ovi signali služe, u stvari, za prenošenje informacija. *Fot. H. Piraux.*



Uvođenje elektronske optike dovelo je do ogromnog proširenja polja primene mikroskopije. Optička sočiva zamenjena su namotajima, a svetlost snopom elektrona. Na slici je prikazana mikrosonda profesora Kastenja. *Doc. C. S. F. — Bouillot.*

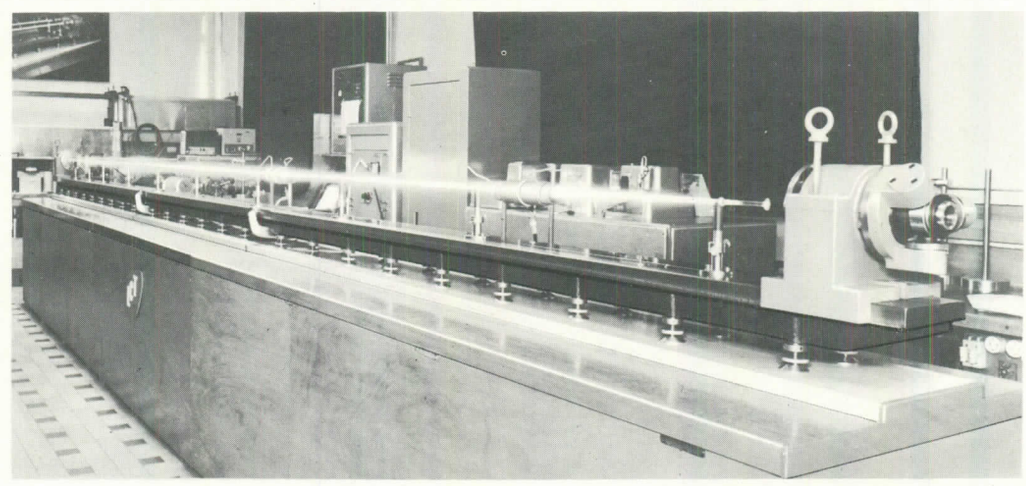




Mašina za čitanje čekova. Za ispisivanje slova i brojeva koristi se specijalno magnetno mastilo. Slova i cifre ispisuju se pomoću paralelnih crtica, kao što je prikazano na slici. *Fot. Bull.*



Mikrologički element sa 8 tranzistora i 12 otpornika. Radi dobijanja predstave o veličini kola, na slici je prikazan i mrav. *Fot. Fairchild.*



Uzan i intenzivan svetlosni snop lasera, koji je u stanju da probije čeličnu pločicu, ima široku primenu: mikrozavarivanje, hirurgija, kosmičke veze, radar itd. *Fot. L. C. I.*



Opšti izgled računara. U prvom planu nalazi se štampač sa čitačem bušenih kartica. U sredini je komandna jedinica računara. U pozadini, sa leve strane, nalazi se jedinica sa magnetnim trakama. *Fot. I. B. M.*

Neka dva predajnika E_1 i E_2 jednovremeno rade sa nemodulisanim talasima iste talasne dužine (*sl.* 155). Oba talasa biće u fazi u svim tačkama, koje se nalaze bilo na simetrali duži E_1 i E_2, bilo na hiperbolama, geometrijskom mestu tačaka P, čija je razlika udaljenosti d_1 i d_2 od stanica E_1 i E_2 jednaka celom umnošku talasne dužine;

$$d_1 - d_2 = k\lambda.$$

Ove hiperbole obrazuju mrežu koja se može unapred ucrtati na kartu. Druga dva predajnika E_3 i E_4 rade na drugoj talasnoj dužini λ' i stvaraju drugu mrežu. Dva prijemnika, snabdevena fazmetrom respektivno primaju talasne dužine λ i λ'. Svaki fazmetar ima i pomoćni brojač, koji omogućuje da se u svakom momentu zna koliko je hiperbola pređeno, a time i da se odredi položaj broda, koji se približno nalazi u preseku jedne hiperbole prve, i jedne hiperbole druge mreže. Preciznim očitavanjem fazmetra može se sa velikom tačnošću odrediti položaj broda interpolacijom između hiperbola svake mreže.

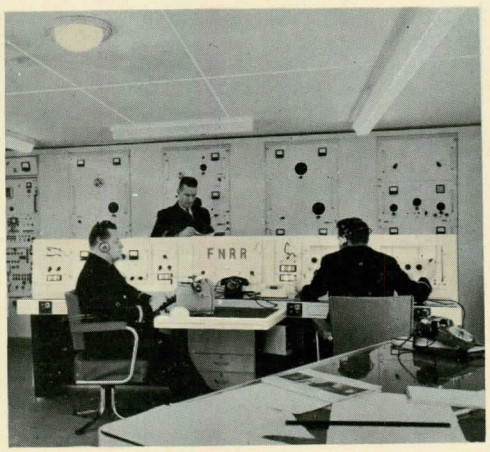
U praksi, predajnici svakog para ne rade na istoj već na različitim učestanostima koje imaju zajednički umnožak. Superheterodini prijemnici ispituju dva signala iste učestanosti, čija se faza meri fazmetrom. Stanice svakog para su raspoređene na udaljenosti oko 400 km. Pri ovim uslovima položaj broda dobija se sa tačnošću od 200 do 2 000 metara. Na manjim rastojanjima tačnost je još veća.

Radar, radio-goniometrija i sistemi za hipeboličku navigaciju upotrebljavaju posebne uređaje. Ostale službe koriste uobičajeni tip prijemnika i predajnika, koji su samo prilagođeni za ovu posebnu primenu. Primopredajni uređaji radio-telefonskog tipa obezbeđuju ribarskim brodovima prijem meteoroloških izveštaja, veze sa radio-farovima, usluge medicinske službe i pomoć u slučaju nesreće.

Naravno da linijski putnički brodovi raspolažu znatno snažnijim uređajima koji im obezbeđuju stalnu vezu sa kopnom a koji i putnicima pružaju široke mogućnosti u telegrafsko-telefonskom saobraćaju. U tu svrhu koristi se više predajnika koji obezbeđuju potrebnu vezu u svim uslovima (*sl.* 156).

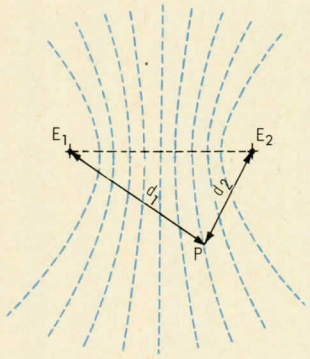
PRIMENA RADIO-KOMUNIKACIJA U VAZDUHOPLOVSTVU. Po svojoj prirodi, problem vazduhoplovne i pomorske navigacije u suštini je isti i odnosi se na određivanje tačnog geografskog položaja pokretnog objekta. Međutim, dok se brodovi kreću po površini mora te je za poznavanje njihovog položaja potrebno odrediti dve koordinate, u vazduhoplovstvu je potrebno poznavati i treću koordinatu, odnosno visinu.

U vazduhoplovstvu, za određivanje položaja objekta u prostoru, koriste se iste metode kao u pomorstvu; radio-goniometrija i hiperbolička navigacija. U ovom drugom postupku posebni predajnici određuju hiperbole u prostoru, kojima mogu da se koriste i brodovi i avioni.



Sl. 156. — Centar za radio-vezu na prekookeanskom putničkom brodu »Frans«.

Fot. Bouillot-C.S.F.



Sl. 155. — Sistem hiperboličke navigacije. Razlika rastojanja tačke P od predajnika E_1 i E_2 ravna je celom umnošku talasnih dužina. Jednovremeno emitovani signali iz predajnika E_1 i E_2 biće u fazi u tački P.

Mada se uslovi korišćenja uređaja u vazduhoplovnoj i pomorskoj navigaciji znatno razlikuju, ipak se oseća sličnost u njihovoj osnovnoj koncepciji. Uređaji namenjeni aeronautici su maksimalno automatizovani.

Pitanje težine je vrlo značajno za sve materijale koji se koriste u vazduhoplovstvu. Za svako povećanje težine opreme aviona za jedan kilogram mora se povećati ukupna njegova težina za devet kilograma da bi avion sačuvao istu čvrstinu i iste osobine. Stoga je razumljivo vrlo brižljivo proučavanje u oblasti smanjivanja elektronskih uređaja namenjenih aeronautici, pri čemu se još više pooštravaju zahtevi u pogledu pouzdanosti njihovog rada. Ova istraživanja, izbor prvorazrednih sirovina, usavršavanje metoda proizvodnje koji zahteva vrlo tačne alate, višestruka kontrola u toku proizvodnje i sklapanja, imaju za rezultat vrlo visoku cenu ovih uređaja. Na primer, vrednost elektronskih uređaja borbenog aviona predstavlja polovinu ukupne cene aparata (*sl.* 157).

Uređaj za navigaciju. Radio-kompasi rade na istom principu kao i radio-goniometri, ali oni bez učešća operatora određuju položaj nekog predajnika u odnosu na osu aviona. Oni omogućuju posebnu vrstu navigacije tzv. *homing*, koja nepogrešivo usmerava avion prema radio faru aerodroma, pri čemu navigator ne treba ni da određuje položaj aviona, pa čak nije potrebno da zna snagu i pravac vetra. Osim ovih postupaka, koji su zasnovani na orijentaciji rama antene prijemnika, postoje i drugi postupci, koji navigatoru omogućuju da odredi pravac aviona (ili azimut) i njegovo rastojanje u odnosu na radio far. U međunarodnom saobraćaju za određivanje azimuta i odstojanja usvojen je sistem Tacan (TACtical Air Navigation).

Sistem Takan (Tacan). Ovaj sistem koristi samo jedan radio far, koji neprekidno emituje signale učestanosti oko 1 000 MHz. Dijagram emitovanog zračenja je sličan kardioidi i okreće se 15 puta u sekundi. Osim toga, šalje se i referentni signal uvek kad je osa kardioide upravljena prema južnom magnetnom polju. Merenje faznog pomeraja između primljenog talasa i referentnog signala obavlja se automatski pomoću indikatora, koji daje azimut radio-fara u odnosu na avion.

Za određivanje rastojanja koristi se impulsna tehnika. Predajnik na avionu, koji se naziva *ispitivačem*, šalje impulse koje na tlu prima odzivni putokazni uređaj i vraća ih na nekoj drugoj učestanosti. Poseban uređaj na avionu meri vreme koje protekne između predaje impulsa i njihovog povratka, i iz njega određuje rastojanje. Emitovani impulsi su kodirani za svaki avion, tako da uređaji na avionu mogu da raspoznaju odgovor, koji se na njih odnosi. Jedan odzivni radio-far sistema Tacan, može jednovremeno da odgovori potrebama stotinak aviona koji ga koriste.

Greška sistema Tacan u određivanju azimuta nesumnjivo je manja od jednog stepena, dok se rastojanje meri sa greškom od nekoliko stotina metara za udaljenost od 300 km.

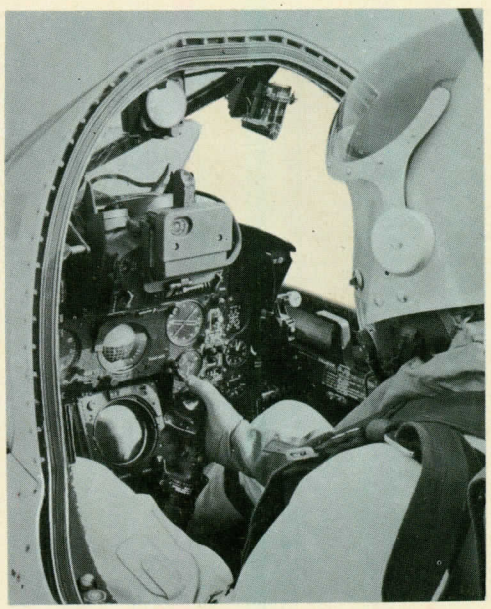
Merenje visine. Da bi izbegao sve prepreke, pilotu je neophodno da zna nadmorsku visinu aviona, odnosno njegovu visinu iznad oblasti koju nadleće.

Ranije korišćeni barometarski visinomeri pokazivali su nadmorsku visinu aviona. Pilot je izračunavao visinu aviona iznad tla iz barometarskog merenja visine i visine predela koje je nadletao, uostalom i visine koja je bila nedovoljno poznata u slučaju loše vidljivosti i koja se brzo menjala u planinskim predelima. Osim toga, barometarsko merenje visine trebalo je korigovati usled promene atmosferskog pritiska na nivou mora, kao i potpuno nepoznate promene pritiska, zavisne od lokalne raspodele temperature. Iz ovoga je, u uslovima loše vidljivosti, proizlazila znatna opasnost od grešaka pri procenjivanju visine aviona. Uostalom, ovakve greške su u prošlosti prouzrokovale mnoge udese.

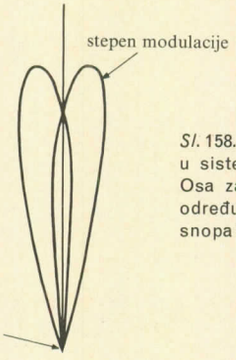
Radio-električni merači visine predstavljaju ogroman napredak jer dozvoljavaju automatsko određivanje visine aviona iznad tla, nezavisno od meteoroloških uslova na bilo kom mestu iznad kopna ili mora.

Radio-električni visinomeri. Postoje dva tipa ovih aparata, koji su zasnovani na različitim principima. Visinomer sa frekventnom modulacijom sadrži predajnik male snage (od 0,5 do 1 W), koji radi u opsegu učestanosti od 420 do 460 MHz. Frekventno modulisan signal emituje antena postavljena u krilu aviona. Druga antena na avionu prima signal posle njegovog odbijanja od tla. Za vreme prostiranja signala, u odlasku i povratku, učestanost predajnika se promeni za vrednost Δf proporcionalno proteklom vremenu. Metodom izbijanja učestanosti emitovanog i reflektovanog talasa dobija se signal učestanosti Δf, koji se, posle detekcije i pojačanja meri pomoću frekvencmetra, čiji je indikator baždaren neposredno u jedinicama visine. Ovaj tip aparata posebno je pogodan za merenje visine manje od 1 500 m. Njegova tačnost je oko 7 m za visinu od 100 m i 90 m za visinu od 1 500 metara.

Drugi tip merača visine zasnovan je na principu radara. Predajnik šalje kratke impulse koji se odbijaju od zemljinog tla. Uprošćeni radarski prijemnik sa kružnim indikatorom meri vreme prostiranja direktnog i reflektovanog talasa. Visina se određuje na osnovu merenja luka između tragova emitovanog i primljenog signala. Upotrebljavajući različite uče-



Sl. 157. — Komandna tabla aviona »Miraž III C« na kojoj se nalazi i radar »Sirano«.



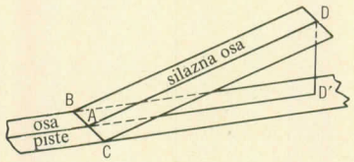
Sl. 158. Princip vođenja po pravcu u sistemu sletanja I.L.S.
Osa zajedničkog dela oba snopa određuje pravac. Duž ove ose oba snopa imaju isti stepen modulacije.

Sl. 160. — Indikatorski instrument sa ukrštenim kazaljkama na komandnoj tabli aviona;


a

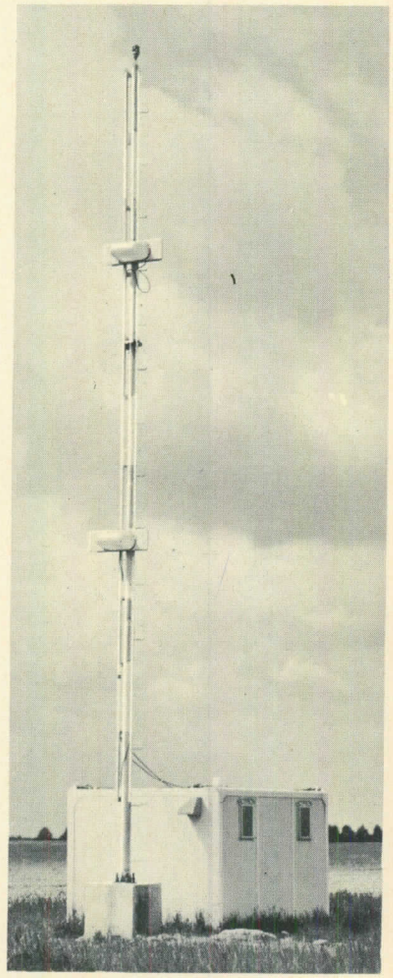

b

a — avion se nalazi na ispravnoj putanji;
b — avion leti suviše visoko i desno od ispravne putanje.

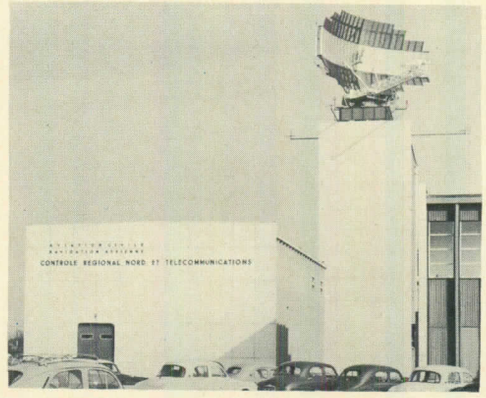


Sl. 161. — Princip sletanja po sistemu I.L.S.

Osa sletanja AD određena je presekom vertikalne ravni ADD', koju određuje sistem za vođenje po pravcu, i kose ravni BCD, koju određuje sistem za vođenje po visini.



Sl. 159. — Predajnik i antenski sistem za vođenje po visini u sistemu sletanja I.L.S.



Sl. 162. — Radar u kontrolnom centru aerodroma Orli.



Sl. 163. — Centar za kontrolu letenja na aerodromu Orli.

stanosti za okidanje baze kružnog indikatora, može se realizovati aparat za merenje visine sa više mernih područja.

Ovaj tip aparata je posebno pogodan za merenje visine od 1 500 do 10 000 m. Njegova tačnost je otprilike 45 m pri visini od 10 000 m.

Sletanje u odsustvu vidljivosti. Sletanje »naslepo« predstavlja osnovni problem u vazduhoplovnoj navigaciji. Magla, koja gotovo ne smeta avionu za vreme leta, u trenutku sletanja često postaje smrtni neprijatelj. Gusta magla se suprotstavlja prostiranju svetlosti, pa je, za vođenje aviona u slučaju loše vidljivosti, bilo logično iskoristiti talase sa većom talasnom dužinom od one koju ima svetlost. U ovu svrhu su bili predloženi i ispitani različiti sistemi, od kojih su, u današnje vreme, samo dva našla praktičnu primenu: sistem I. L. S. i sistem G. C. A.

• *Sistem I. L. S.* (Instrument Landing System). U ovom sistemu, putanja sletanja određuje se neprekidno još u prostoru ; sastoji se od sistema za vođenje po pravcu i sastema za vođenje po visini (ili silaženje).

• *Sistem za vođenje po pravcu.* Sistem za horizontalno vođenje postavljen je na kraju piste za sletanje prema pravcu dolaska aviona. Jedan radio-far sa dve ose emituje dva usmerena snopa na učestanosti oko 110 MHz. Ovi snopovi su modulisani različitim učestanostima (obično 90 i 150 Hz) i blago se prekrivaju u prostoru (*sl.* 158). Na avionu se nalazi prijemnik osetljiv na razliku detektovanih napona u opsegu učestanosti od 90 do 150 Hz, koji napaja merni instrument sa nulom u sredini. Ako je avion u osi zajedničkog dela oba snopa, primljeni signali su podjednaki i kazaljka instrumenta ostaje na nuli. Levo ili desno od ose sletanja postoji neravnoteža između signala modulisanih sa 90 Hz i onih sa 150 Hz, te kazaljka mernog instrumenta skreće ulevo odnosno udesno.

• *Sistem za vođenje silaska* (sistem za vertikalno vođenje) radi na učestanosti oko 330 MHz. On sadrži dve antene, postavljene na različitim visinama istog nosača, i to tako da se jedan od talasa reflektuje od Zemljinog tla (*sl.* 159). Osim toga, oba talasa su modulisana različitim učestanostima. Silazna putanja koju treba da sledi avion, određena je presekom usmerenog dijagrama zračenja direktnog talasa i talasa odbijenog od tla. Duž ove putanje postoji jednakost stepena modulacije oba talasa. Prijemnik na avionu obaveštava pilota o jednakosti ili nejednakosti stepena modulacije prijemnih talasa, i pilot teži da upravljanjem aviona održi ovu jednakost. Indikatori za horizontalno i vertikalno vođenje smešteni su u zajedničko kućište tako da im se kazaljke ukrštaju (*sl.* 160), pri čemu njihov međusobni položaj u pokaznom polju instrumenta obaveštava pilota da li se avion nalazi na predviđenoj putanji.

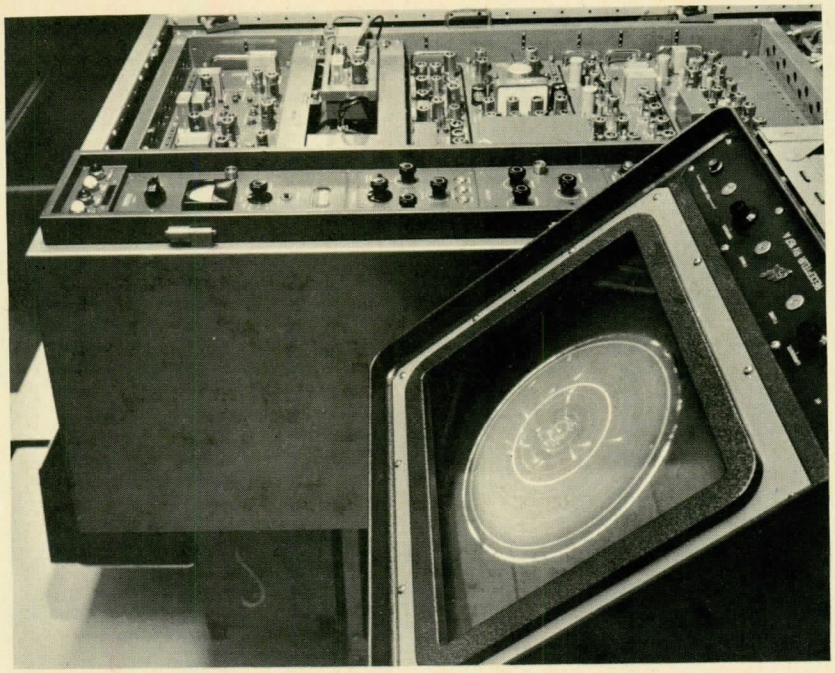
Sistem sadrži tri kontrolne stanice za približavanje, koje se nalaze u osi pravca horizontalnog vođenja i koje avion mora da nadleti na tačno određenoj visini. Posle nadletanja poslednje od ovih stanica, avion »ulazi« u predviđenu putanju u prostoru koju je odredio predajnik za vertikalno vođenje, putanju koja će ga odvesti do dodira sa pistom za sletanje (*sl.* 161).

• *Sistem G. C. A.* (Ground Control Approach). U ovom sistemu, radar kontroliše stanice na zemlji, određuje položaj aviona i njegovoj posadi dostavlja potrebna uputstva za ispravno sletanje. Prvo, radar za izviđanje, koji radi na talasnoj dužini od 10 m, otkriva avion. Zatim, operator sa zemlje uspostavlja radiofonsku vezu sa pilotom aviona i dovodi avion u oblast u kojoj vođenje aviona preuzima tačniji radar, koji radi na centimetarskim talasima. Ovaj radar ispituje mali prostorni ugao (20° u azimutu i 70° po položaju). Unutar granica ovog ugla, položaj aviona određen je sa tačnošću dela ugaonog stepena i sa tačnošću rastojanja boljom od desetak metara. Najzad, kontrolor, pomoću radio-telefona, daje pilotu uputstva za ispravno sletanje aviona.

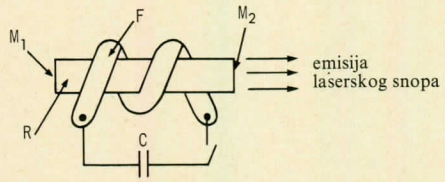
Regulisanje vazdušnog saobraćaja. Problem regulisanja saobraćaja je od prvorazrednog značaja u korišćenju vazdušnih linija. I zaista, u slučaju dugog čekanja dozvole za sletanje, reaktivni avioni bi potrošili ogromne količine goriva u nekorisnom kruženju oko aerodroma. Stoga plan sletanja mora da se brižljivo pripremi čim avion uđe u oblast aerodromske kontrole. Radar vrlo tačno određuje položaje aviona koji se pojavljuju, pri čemu se uspostavlja telefonska veza između svakog aviona i kontrole letenja, koja pilotu saopštava potrebna uputstva za bezbedno sletanje (*sl.* 162 i 163). Rad kontrole letenja umnogome je olakšan upotrebom cevi za pretvaranje situacije na ekranu radara u mnogo svetliju televizijsku sliku koja je pogodna za rad i pri uobičajenoj svetlosti. Osim toga, ova cev je sposobna da određeno vreme prikazuje prethodne putanje aviona, što omogućava predviđanje situacije u prostoru u neposrednoj budućnosti (*sl.* 164). Očigledno je da upotreba ovakvih cevi znatno doprinosi povećanju bezbednosti letenja.

Neprekidan porast vazdušnog saobraćaja preti da dovede u zasićenje savremene sisteme kontrole letenja. Naime, stručnjaci predviđaju da će već oko 1980. hiljade aviona leteti u oblasti kontrole velikih aerodroma. U tim uslovima više neće biti moguće da se ostvari radiofonska veza između kontrolora saobraćaja i aviona. Rešenje treba tražiti kakc u automatskom slanju i u prenosu informacija o letu (položaju i identitetu) sa aviona na zemlju, tako i u automatskom odašiljanju kodiranih uputstava sa zemlje avionu. Ovo upućuje na upotrebu sistema za automatsko upravljanje tipa elektronskih računara, koji, posle prijema informacija sa aviona, određuju

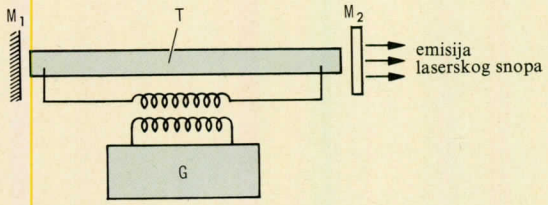
Fot. C.S.F. (3)



Sl. 164. — Uređaj za pretvaranje radarske u televizijsku sliku.



Sl. 165. — Laser sa kristalom:
R — rubin; M_1 — posrebrena osnova; M_2 — poluposrebrena osnova; F — ksenonska lampa; C — kondenzator za paljenje ksenonske lampe.



Sl. 166. Gasni laser:
T — cev sa gasom; M_1 — posrebreno ogledalo; M_2 — poluposrebreno ogledalo; G — generator visoke učestanosti za održavanje pražnjenja.

njihove putanje, koje će u prostoru biti određene veoma usmerenim snopovima talasa.

MASER I LASER. Plank (Planck) je dao kvantnu hipotezu da bi objasnio osnovne zakone zračenja crnog tela. Kasnije je ova hipoteza proširena i na mnoge druge fenomene i može se dokazati da uvek kad postoji izmena energije između materije i nekog elektromagnetnog zračenja učestanosti *f*, izmenjena energija jednaka je celom umnošku kvanta energije *hf*. Ova teorija dozvoljava da se poveže i grupiše veliki broj međusobno vrlo različitih fenomena, na primer: fotoelektricitet, emisija jonizujućeg zračenja, nastajanje x-zraka itd. Međutim, ova hipoteza nije iskorišćena u primeni sve do pronalaska masera i lasera. Ova dva uređaja zasnovana su na mogućnosti izmene energije između materije i elektromagnetnog talasa, pri čemu se materija razmatra sa stanovišta njenih kvantiziranih energetskih nivoa, a elektromagnetni talas sa stanovišta korpuskularne prirode fotona.

Maser i laser zasnovani su na istom principu i razlikuju se samo po učestanosti na kojoj rade. Maseri se nalaze u domenu milimetarskih talasa, a laseri u domenu vidljivog infracrvenog svetlosnog spektra.

Maser. Proučavajući posledice Plankove kvantne teorije, Ajnštajn (Einstein) je 1916. izložio ravnotežu spontane i stimulisane emisije u zračenju crnih tela. Poznato je da, kada kvantni sistem prelazi iz pobuđenog stanja energije W_1 u neko drugo stanje niže energije W_0, on *spontano emituje* foton čija je energija $W_1 - W_0$. Ova energija je jednaka proizvodu učestanosti zračenja *f* i konstante *h*, koja je nazvana *Plankovom konstantom*. I obrnuto, ako kvantni sistem apsorbuje foton, on prelazi iz osnovnog energetskog stanja W_0 u pobuđeno stanje energije W_1. Pod posebnim uslovima, upadni foton učestanosti *f* može da prouzrokuje emisiju fotona iste učestanosti; u tom slučaju radi se o *stimulisanoj emisiji*; oslobođeni foton dodaje se u fazi upadnom talasu, što znači da postoji pojačanje.

Ajnštajnovo teorijsko razmatranje nalazi praktičnu primenu tek 1954, kad je američki fizičar Tavnes (Townes) napravio prvi pojačavač sa *stimulisanom emisijom*, koji je nazvao *maser* (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Kao aktivna sredina poslužio je amonijak.

Veliki značaj masera zasniva se na činjenici da on ima vrlo mali osnovni šum, što mu pruža značajnu prednost u telekomunikacijama na mikrotalasima.

Danas se prave kristalni maseri čiji je nivo šuma neznatan. U ovom trenutku, oni su nenadmašivi u oblasti milimetarskih talasa, a naročito za prijem vrlo slabih signala koji potiču iz vasione, zbog čega su iskorišćeni u naučnim primenama, u radio-astronomiji i radiometriji, kao i za međukontinentalne veze pomoću satelita.

Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) zasnovan je na istom principu kao i maser, ali, umesto milimetarskih i centimetarskih talasa, on proizvodi zračenje mnogo manje talasne dužine, koja se približava vidljivom spektru. Laser predstavlja nov izvor svetlosti, koji je veoma koristan pošto ima koherentnu emisiju, što znači da se ona može predstaviti sinusoidom, isto kao i učestanost radio-predajnika. Obični izvori svetlosti emituju talase koji nisu koherentni, što znači da između njih postoji fazna razlika te može doći do pojave interferencije talasa.

Prvi laseri pravljeni su sa rubinom. Na slici 165. shematski je prikazan uređaj ovog tipa. Njegov bitan elemenat predstavlja savršeno homogen rubinski štapić, prečnika nekoliko milimetara i dužine nekoliko centimetara (rubin je kristal alumina koji u vrlo malom odnosu sadrži atome hroma). Savršeno izglačane i idealno paralelne baze rubinskog štapića su posrebrene, a jedna od njih je poluprovidna. Ksenonska lampa, u vidu zavojnice, okružuje rubin. Usled pražnjenja električnog tovara kroz ksenonsku lampu, stvara se kratkotrajna jaka svetlost, usled koje periferni elektroni prelaze na viši energetski nivo. Ovaj postupak je nazvan »*optičkim pumpanjem*« Sa ovog, višeg nivoa, elektroni se naglo vraćaju na najniži energetski nivo, proizvodeći blesak crvene svetlosti, čija je talasna dužina 6 943 Å i koja izlazi sa poluposrebrene strane rubina. Trajanje bleska iznosi samo nekoliko stotina mikrosekundi. Emitovana svetlost je strogo koherentna. Svetlosni snop je jako koncentrisan i njegov otvor ne prelazi 10 ugaonih minuta. Emitovana energija je reda džula po kubnom centimetru rubina, što odgovara najvećoj trenutnoj snazi od 10 kW. Impulsi se ponavljaju pri svakom paljenju ksenonske lampe, ali učestanost njegovog ponavljanja ne može preći tri paljenja u minutu u slučaju hlađenja vazduhom.

Značajno usavršavanje predstavljao je pronalazak *oksidnog lasera* sa povećanim trajanjem optičkog pumpanja, što omogućava da se dobiju znatno snažniji svetlosni impulsi. Tako se može ostvariti laser sa energijom od 50 džula, koja, oslobođena u nekoliko desetina mikrosekundi, odgovara trenutnoj vrednosti snage od nekoliko megavata. Dakle, potrebno je pribeći hlađenju pomoću tečnog gasa. Upotrebom kristala sa različitom koncentracijom primesa, može se dobiti zračenje različitih talasnih dužina, koje su raspoređene od 6 943 Å do 26 000 Å.

Gasni laseri. Kristalni laseri rade u impulsnom režimu. Da bi se dobila neprekidna emisija, pribegava se gasnim laserima, čiji je prvi model ostvario Javan 1961. godine.

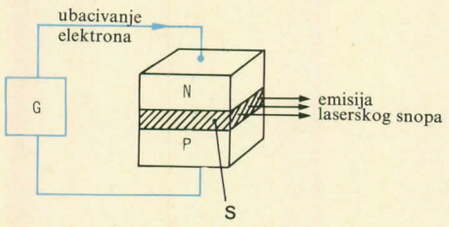
Gasni laser se sastoji od staklene cevi (*sl.* 166) koja sadrži mešavinu dva gasa npr. helijuma i neona pod niskim pritiskom. Atomi helijuma pobuđuju se električnim poljem visoke učestanosti, što znači da su elektroni ovih atoma dignuti na viši energetski nivo. Ovaj postupak odgovara optičkom pumpanju kristalnih lasera, pa se u ovom slučaju iz istih razloga helijum naziva gasom za pumpanje. Pobuđeni atomi helijuma sudaraju se sa atomima neona, pri čemu ih pobuđuju tako da ovi u većoj ili manjoj meri prelaze na više energetske nivoe, sa kojih se zatim vraćaju na niži energetski nivo. Svaki energetski prelaz, odnosno svako vraćanje atoma sa višeg na niži energetski nivo, izaziva stvaranje koherentnog zračenja odgovarajuće talsne dužine. Atomi neona pobuđeni na više energetske nivoe u sudaru sa atomima helijuma izazivaju tri prelaza kojima odgovaraju emisije zračenja talasne dužine 33 920, 11 523 i 6 328 Å.

Prve dve talasne dužine pripadaju infracrvenom a poslednja vidljivom području. Druga mešavina gasa omogućuje da se dobiju različite talasne dužine, bilo u vidljivom bilo u infracrvenom području. U početku, snaga gasnih lasera je bila vrlo mala, reda veličine nekoliko stotina milivata, dok danas ova snaga dostiže do 500 W.

Poluprovodnički laser. Francuski fizičar P. Egren (P. Aigrain) je 1957. predložio upotrebu poluprovodnika za stvaranje laserskog efekta. Prva ovakva realizacija potiče iz 1962. Njegov princip je jednostavan i sastoji se u ubacivanje elektrona u PN spoj poluprovodnika. Oblast spoja ima pojačavačka svojstva i u njoj se stvara zračenje *(sl.* 167). Ako je ubačena struja intenzivna, zračenje je veliko, npr., 1 W za površinu spoja znatno manju od kvadratnog milimetra. Stepen korisnog dejstva je vrlo visok, oko $90^0/_0$. Dobijeni svetlosni snop nalazi se u blizini infracrvenog područja i atmosfera ga praktično ne apsorbuje. Ovaj snop može lako da se moduliše.

Poluprovodnički laseri nalaze se još u eksperimentalnom stepenu razvoja, ali stručnjaci za telekomu-

Phot. Bouillot - C.S.F.



Sl. 167. — Poluprovodnički laser: G — generator struje; S — PN spoj.

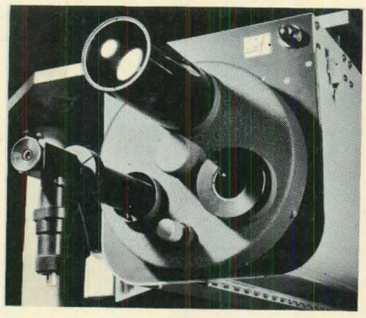
nikacije polažu u njih velike nade, s obzirom na mogućnost primene vrlo širokog opsega učestanosti koji do sada nije bio korišćen.

Primena lasera. Velika koncentracija energije i koherentnost laserskog snopa omogućuje njegove mnogobrojne primene, između kojih se mogu navesti; topljenje, zavarivanje i isparavanje metala i otpornih materijala.

Savremena tehnika koristi nove, vrlo otporne, teško topljive materijale čija obrada zahteva veliku koncentraciju energije u vrlo malom prostoru. Laseri posebno doprinose praktičnom rešavanju ovih problema. Pomoću laserskog snopa energije jednog džula mogu se napraviti sićušni otvori, prečnika 10—30 μm u vremenu od 10 milisekundi, pri čemu se dostiže temperatura do 10 000°K. Laserski impuls energije 4 džula u trajanju od 10 ms, vari aluminijumske pločice debljine 0,6 mm, a tačke varenja imaju prečnika 0,6 mm. U ovom slučaju ostvaruje se koncentracija snage od 1 400 W/mm². Laserski snop omogućuje da se reše neki problemi koji postoje u medicini, hirurgiji i biologiji.

Za primenu u vojne svrhe moguće je zamisliti laserski snop vrlo visoke energije, koji bi predstavljao oružje sa velikim efektom razaranja. U raznim zemljama, istraživanja u ovoj oblasti obavljaju se u tajnosti, ali izgleda da se još nisu približila realnoj primeni. U oblasti telekomunikacije laserima je obezbeđena budućnost za ostvarenje veza pomoću svetlosnih i infracrvenih talasa. Prijem bi se obavljao pomoću fotomultiplikatora iza koga bi sledio odgovarajući pojačavač. Reč je o oblasti u kojoj se još samo eksperimentiše, ali koja može dati rezultate značajne za ostvarenje kosmičkih veza. Već danas se ispituje mogućnost da se na taj način uspostavi telefonska veza sa astonautima koji putuju između Zemlje i Meseca.

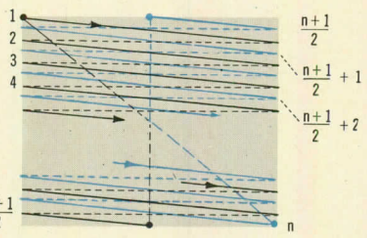
Laser omogućava pravljenje merača daljine *(sl.* 168) koji obezbeđuje tačnost od jednog metra na rastojanju od 10 km. Najzad, posredstvom lasera, moguće je meriti brzinu pomoću Dopler-Fizoovog efekta. Tačnost merenja je izvanredna zahvaljujući monohromatskom izvoru svetlosti. Mogu se meriti brzine u opsegu od 10 cm do 1 800 km na čas. Najzad, zahvaljujući laserskom izvoru svetlosti, otvaraju se nove mogućnosti u oblasti naučnog istraživanja.



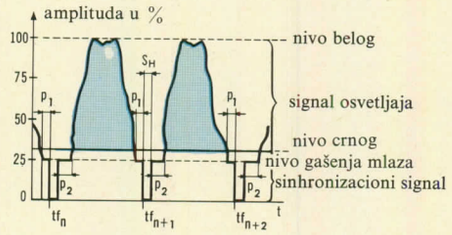
Sl. 168. Laserski merač daljine.

Televizija

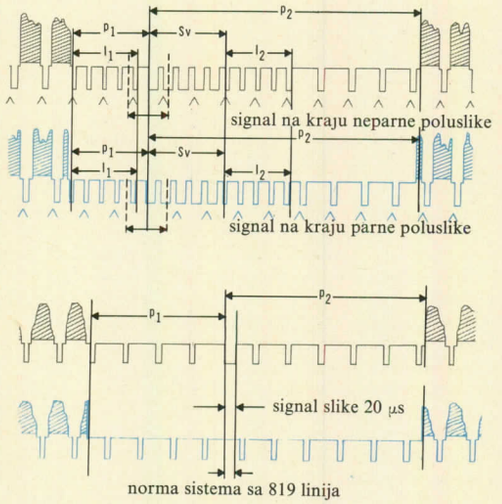
PRINCIP. Zadatak televizije je da prenosi na daljinu slike pokretnih i nepokretnih prizora. Utisak kretanja posmatranog prizora postiže se smenjivanjem pojedinačnih slika — scena u kratkim vremenskim intervalima. Sama slika se razlaže u niz tačaka po tačno određenom redosledu. Pri razlaganju slike pretvara se osvetljaj svake tačke u neku električnu veličinu, tzv. *signal osvetljaja (luminentni signal)*, koji, posle pojačanja, moduliše talas predajnika upravo na isti način kao i pri radio-emisiji, sa jedinom razlikom da je u slučaju televizije frekventni spektar luminentnog ili video-signala znatno širi. Postupak razlaganja slike u tačke naziva se *analizom slike*, a posebna elektronska cev, kojom se ovo postiže, *analizatorska cev*.



Sl. 169. Analiza slike sa proredom.



Sl. 170. — Amplitudna raspodela luminentnog i sinhronizacionih signala. Prikazani su signali za horizontalnu sinhronizaciju; tf_n — trenutak koji odgovara kraju *n*-te linije jedne slike; P_1 — mali prag crnog koji prethodi povratku mlaza; P_2 — prag za brisanje ili horizontalno gašenje (na engleskom: *horizontal blanking)*, kojim se obezbeđuje nevidljivi povratak mlaza na ekranu katodne cevi u krajnji levi položaj; S_H — signal (impuls) za horizontalnu sinhronizaciju. Njegova prednja ivica (u smeru vremenske ose) određuje tačan trenutak započinjanja povratka mlaza.



Sl. 171. — Signali za horizontalnu i vertikalnu sinhronizaciju.

BROJ TAČAKA SLIKE. Slika se razlaže odozgo nadole na niz horizontalnih linija, pri čemu se svaka linija razlaže sleva nadesno u niz uzastopnih tačaka. Oštrina slike je utoliko veća, ukoliko je veći broj linija slike i broj tačaka svake linije. Međutim, nije potrebno posebno analizirati sve tačke koje su tako bliske da ih oko ne razlikuje. Dakle, potreban kvalitet slike konačno je određen analizom broja tačaka ograničenog moći razlaganja oka. Za moć razlaganja od 1′ (oko 0,5 mm na rastojanju od 2 m), pri optimalnom rastojanju posmatranja pravougaone slike odnosa širine i visine 4/3, nalazi se da je broj linija na slici između 400 i 800, a broj tačaka svake linije od 500 do 1 000, tako da ukupan broj tačaka slike leži između 200 000 i 800 000.

Da bi se iskoristila tromost oka (inercija mrežnjače oka), za reprodukciju slika promenljivog sadržaja potrebno je analizirati najmanje 25 slika, odnosno 5 do 20 miliona tačaka u sekundi.

Pošto se dve uzastopne tačke, jedna crna i jedna bela, mogu predstaviti sa dve poluperiode naizmeničnog signala, luminentni signal mora da ima učestanost 2,5 MHz za 5 miliona tačaka u sekundi i 10 MHz za 20 miliona tačaka u sekundi.

Pri analizi 25 slika u sekundi, dolazi, međutim, do pojave neprijatnog treperenja koje se može sprečiti analizom sa proredom, pri kojoj analiza svake od 50 poluslika traje 1/50 sekunde *(sl.* 169). Svaka poluslika sadrži, pored određenog broja celih linija, i jednu polovinu linije, tako da kompletna slika sadrži neparan broj linija.

Ovaj raspored, zasnovan na određenim tehničkim zahtevima, ne dozvoljava proizvoljno biranje broja linija, a izbor *normi*, gde je broj linija samo jedan od elemenata, razlikuje se zavisno od zemlje i epohe kada je izvršen:

— 625 linija: evropska norma CCIR (Međunarodni savetodavni komitet za radio-difuziju — Comité consultatif international de radiodiffusion) i norma za drugi kanal francuske televizije;
— 819 linija: francuska norma za prvi kanal;
— 405 linija: britanska norma;
— 525 linija: norma SAD, sa brzinom horizontalne analize bliskom evropskoj normi od 625 linija, ali proračunato na učestanost američke električne mreže od 60 Hz (60 poluslika ili 30 slika u sekundi).

SPEKTAR UČESTANOSTI TELEVIZIJSKOG PREDAJNIKA. Ovaj opseg učestanosti bitno zavisi od predviđene maksimalne učestanosti modulacije. Prethodno nađena, potrebna učestanost od 2,5 do 10 MHz zahteva znatno veći opseg učestanosti od onog koji koriste predajnici radio-difuzije, što nameće upotrebu nosećih talasa u opsegu učestanosti od desetina i stotina megaherca.

SIGNAL ZA SINHRONIZACIJU. Pri prijemu, svetla tačka u katodnoj cevi mora da se pomera isto kao elektronski mlaz analizatorske cevi. Potrebno je, dakle, da se signalu osvetljaja dodaju posebni signali koji određuju:

— kraj svake linije (signal za horizontalnu sinhronizaciju);
— kraj svake poluslike (signal za vertikalnu sinhronizaciju).

U tako formiranom *kompletnom signalu (sl.* 170) signali za sinhronizaciju su skoro pravougaoni impulsi i predstavljaju, prema normama, 25 ili 30% maksimalne ukupne amplitude (nivo belog). Od nivoa crnog (25 ili 30%) do nivoa belog (100%) nalazi se signal osvetljaja, dok signali za sinhronizaciju leže u domenu »crnje od crnog«. Najzad, da bi bilo nevidljivo vraćanje svetle tačke na početak ekrana, koje sledi za sinhronizacionim impulsima, njih prate *impulsi za gašenje mlaza*, na nivou neznatno ispod nivoa crnog.

Signali za vertikalnu sinhronizaciju razlikuju se od signala za horizontalnu sinhronizaciju, bilo većim trajanjem (kod sistema sa 819 linija) bilo različitom strukturom (kod sistema sa 625, 525 i 405 linija) *(sl.* 171).

Pri prijemu, signali za sinhronizaciju odvajaju se od signala osvetljaja i međusobno razdvajaju pomoću jednostavnih elektronskih kola.

Fot. Pierro-C.S.F.

KOMPLETAN TELEVIZIJSKI SIGNAL. Na slici 171. prikazan je za različite norme izgled kompletnog signala u trenutku kada se završava prenos jedne i počinje prenos druge poluslike.

TELEVIZIJSKI PREDAJNIK *(sl.* 172) sadrži sledeće elemente:

1. kameru, čiji je bitni element analizatorska cev;
2. generator signala koji su saglasni normama;
3. kola za horizontalno i vertikalno skretanje elektronskog mlaza, koja obezbeđuju njegovo pomeranje pri analizi;
4. mešač signala za sinhronizaciju i signala osvetljaja, kao i pojačavač kompletnog signala, koji, najzad, moduliše noseći talas »video« signala;
5. kanal »tona«, koji posle pojačanja moduliše drugi noseći talas;
6. antenski sistem.

Različiti predajnici koji prenose isti program, međusobno su povezani kablom ili bežičnom vezom. Pri jednovremenoj emisiji različitih programa predajnici sadrže posebne uređaje za svaki program. Svaki uređaj je povezan sa posebnom antenom, ali su ove antene ponekad postavljene na istom nosaču *(sl.* 173).

Evrovizija. U okviru Udruženja evropske radio-difuzije (U. E. R.), čije je sedište u Ženevi, televizijske službe zapadne Evrope međusobno razmenjuju programe (*Eurovision*). Problemi koji proističu iz različitih normi nameću potrebu za konverzijom sistema. Pretvarač može da se sastoji od televizijskog prijemnika koji radi u uslovima normi početnog sistema, čiju sliku zatim snima kamera koja radi sa mesnim normama. U zapadnoj Evropi koriste se šest tačaka za konverziju: London, Keln, Zand (Nemačka), Pariz, Milano i Dol (Švajcarska). U Londonu je postavljen sistem za konverziju 405/625 linija, koji je čisto elektronski, dakle bez posredstva optike. U Evroviziji učestvuje šesnaest evropskih nacionalnih televizija. Dužina kablova i bežičnih kanala prelazi 100 000 kilometara, sa 2 382 emisione stanice i 45 000 000 prijemnika.

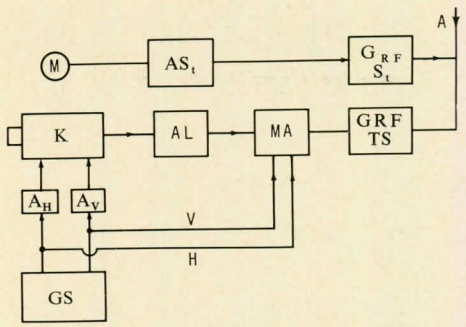
Intervizija, Mondovizija. Zemlje istočne Evrope (O. I. R. T.) izgradile su *Interviziju*, organizaciju koja pod određenim uslovima sarađuje sa Evrovizijom u razmeni programa kroz celu Evropu. Ove razmene otežane su mnogim pravnim teškoćama, različitim zakonskim propisima u pogledu autorskih prava i raznolikošću međudržavnih ugovora. Nekoliko razmena programa između SAD i Evrope, ostvarenih posredstvom satelita Telstar Relay i Early Bird, nazvano je Mondovizija.

TELEVIZIJSKI PRIJEMNICI. Televizijski prijemnik treba da primi i pojača željeni modulisani talas, da iz njega izdvoji i pojača kompletan signal i da signal osvetljaja dovede na katodnu cev. Prijemnik takođe mora iz kompletnog signala da izdvoji signale za horizontalnu i vertikalnu sinhronizaciju, da ih dovede sistemima za skretanje elektronskog mlaza, da bi se sinhronizovao rad prijemnika i kamere. Oscilatori za skretanje mlaza proizvode napone ili struje testerastog oblika *(sl.* 174). Nagli pad signala za horizontalno skretanje na kraju svake periode vraća mlaz na početak linije na ekranu, a na kraju periode signala za vertikalno skretanje vraća mlaz na početak gornje linije.

Blok shema televizijskog prijemnika *(sl.* 175). Televizijski prijemnik radi na principu *promene učestanosti*. Pojačavači su predviđeni za širok opseg učestanosti (više megaherca). Po francuskim normama, signal tona je odvojen od video-signala na izlazu iz mešača učestanosti.

Napon za ubrzanje elektrona u katodnoj cevi (oko 20 kV) proizvodi se pomoću transformatora, kroz čiji primar protiče struja signala za horizontalno skretanje mlaza.

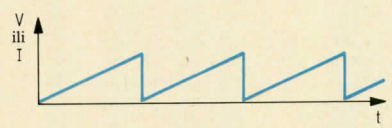
TELEVIZIJA U BOJI. Čim je počelo korišćenje crno-bele televizije, odmah se pristupilo proučavanju televizije u boji. Nešto posle završetka drugog svetskog rata bili su uglavnom određeni potrebni uslovi i principi za nastavak rada. Boja će se reprodukovati sintezom tri boje (primarne boje: crvena, zelena i plava), pošto će se raditi sa obojenim izvorima svetlosti. Sistem treba da bude *kompatibilan*, što znači da postojeći prijemnici predviđeni za crno-belu televiziju mogu bez njihove naknadne izmene primati program emitovan u boji, i da prijemnici predviđeni za rad u boji mogu primati program u crno-beloj tehnici. Za prenošenje kompletnog signala koristili bi se već postojeći lanci.



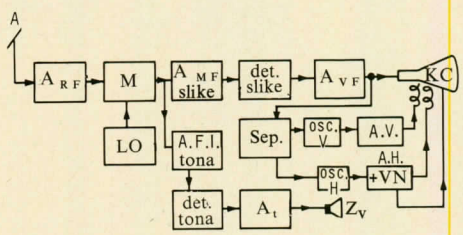
Sl. 172. — Shema principa rada televizijskog predajnika. K — kamera; GS — sinhronizacioni generator za stvaranje signala u skladu sa usvojenim normama; A_H — pojačavač za horizontalno skretanje mlaza; A_V — pojačavač za vertikalno skretanje mlaza; AL — pojačavač luminentnog signala; H — signal za horizontalnu sinhronizaciju; V — signal za vertikalnu sinhronizaciju; MA — mešač i pojačavač kompletnog televizijskog signala; G_{VF} TS — generator (predajnik) visoke učestanosti nosećeg talasa kompletnog televizijskog signala; M — mikrofon; AS_t, pojačavač zvučnih učestanosti; G_{RF} S_t, generator (predajnik) radio-učestanosti nosećeg talasa signala tona koji prati sliku; A — antenski sistem.



Sl. 173. — Televizijski predajnik u Marseju.



Sl. 174. — »Testerasti« napon za skretanje mlaza katodne cevi.



Sl. 175. — Shema principa rada televizijskog prijemnika. A — antena; A_{RF} — pojačavač radio-učestanosti; M — mešač; LO — lokalni oscilator; A_{MF} — međufrekventni pojačavač; Det. — detektor; A_{VF} — pojačavač video učestanosti; A_t — pojačavač zvučnih učestanosti; Sep. — separator sinhronizacionih signala; OSC. V. — oscilator koji daje signale za vertikalno skretanje; AV — pojačavač signala za vertikalno skretanje; OSC.H, — oscilator koji daje signale za horizontalno skretanje; AH + VN — pojačavač signala za horizontalno skretanje i izvor visokog napona za napajanje katodne cevi; KC — katodna cev (kineskop).

Konvertibilnost, suprotno kompatibilnosti, predviđa manje-više postepenu transformaciju crno-belih prijemnika. Mada je imao svojih pristalica (Columbia Broadcasting System, CBS, korišćenje obrtnog diska sa obojenim filtrima) ovaj postupak nije prihvaćen. Kompatibilan sistem podrazumeva da se prvo treba uspostaviti ahromatski signal osvetljaja (luminentni signal) E_y, koji potiče iz trihromatske kamere, odnosno iz tri kamere u istom kućištu od kojih svaka daje signal E srazmeran sadržaju energije primarne boje koju ona prenosi, pri čemu se E_c odnosi na sadržaj crvene, E_z na sadržaj zelene i E_p na sadržaj plave boje. Luminentni signal E_y se obrazuje sabiranjem ova tri signala u sledećoj razmeri, koja vodi računa o relativnoj osetljivosti oka na primarne boje:

$$E_v = 0{,}3\ E_c + 0{,}59\ E_z + 0{,}11\ E_p.$$

Ako se zajedno sa luminentnim signalom E_y emituju i signali za sinhronizaciju, kompletan signal se ne razlikuje od klasičnog signala i obezbeđuje normalnu ahromatsku (crno-belu) televizijsku emisiju.

Ostaje samo da se signalu E_y dodaju takozvani *hrominentni* signali (signali obojenosti) koji su posebno namenjeni prijemnicima u boji, vodeći računa da oni što je moguće manje smetaju slici koja je namenjena prijemnicima crno-bele televizije. Opšte usvojena metoda sastoji se u tome da se modulacionom signalu E_y doda talas pogodne učestanosti (oko 4,5 MHz), koji se naziva *subnoseći talas*, pošto je i sam modulisan hrominentnim signalom.

Hrominentni signali. Princip kompatibilnosti uslovljava da prijemnik u boji prima luminentni signal E_y koji se ni po čemu ne razlikuje od luminentnog signala crno-bele televizije pri čemu je dovoljno da se prijemniku u boji obezbedi i informacija o obojenosti koja omogućuje da se uspostavi prvobitni trobojni signal E_y.

Ove informacije sastoje se od dva signala koji predstavljaju razlike između dva izlazna signala trihromatske kamere i luminentnog signala E_y. Usvojeno je da se prenose signali razlike $(E_c - E_y)$ i $(E_p - E_y)$. Na nivou prijemnika lako je da se ponovo pronađu E_c i E_p uz pomoć zbirova:

$$(E_c - E_y) + E_y \text{ i } (E_p - E_y) + E_y.$$

Treći signal razlike $(E_z - E_y)$ može da se izvede iz izabranih signala razlike:

$$E_z - E_y = -0{,}51\ (E_c - E_y) - 0{,}19\ (E_p - E_y).$$

Prema tome, operacijom $(E_z - E_y) + E_y$ može ponovo da se nađe E_z.

Tri signala E_c, E_z i E_p upravljaju trihromatskom katodnom cevi i tako ponovo uspostavljaju sliku u boji.

Obrada i upotreba *signala razlike* kao *hrominentnog signala* ima prednost da se ograničava na prenos videofrekventnog spektra koji obuhvata samo luminentni signal (hrominentni signali ne zahtevaju tako veliki spektar) i da se sprečava pojava parazita u obliku promene osvetljaja, koji bi mogli da stvore hrominentne signale u toku prenosa. Ovo je *princip konstantnog osvetljaja*.

Fot. Bru-C.S.F.

Modulacija subnosećeg talasa. Zemlje koje su već usvojile norme za televiziju u boji jedino se razlikuju u postupku modulacije subnosećeg talasa.

Hrominentni signali modulišu subnoseći talas. U američkom sistemu NTSC i u nemačkom sistemu PAL koristi se postupak fazne modulacije, dok se u francuskom sistemu SECAM koristi frekventna modulacija.

Druge osobenosti ove modulacije sastoje se u različitom tipu *kodiranja* zavisno od usvojenih postupaka. Iz ovog razloga se u pretvarače televizijskih normi pri međunarodnoj razmeni programa postavljaju uređaji za boju koji se nazivaju *transkoderi.*

Sistem NTSC. Ovaj sistem je stvoren u SAD (National Television System Committee) i od tada se koristi u toj zemlji, kao i u Kanadi i Japanu. Dva hrominentna signala fazno modulišu dva subnoseća talasa iste učestanosti, ali fazno pomerena za 90°. Prijemnik sadrži referentni oscilator koji se dovodi u fazu sa svakom linijom za sinhronizaciju pomoću posebnog signala, koji se pojavljuje u toku povratka mlaza pri horizontalnom skretanju. Hrominentni signali se izdvajaju postupkom upoređivanja modulisanih subnosećih talasa sa referentnim talasom. Međutim, ovaj sistem, koji daje vanredne rezultate, osetljiv je u izvesnoj meri na nepoželjne promene faza što ima za posledicu promenu boja.

Sistem PAL (Phase Alternation Line). Ovaj sistem je poboljšana varijanta sistema NTSC a predložili su ga nemački stručnjaci. On ima uređaj koji periodično obrće referentni talas i vektorski slaže dva rezultata upoređivanja ovog i subnosećeg talasa. Vektorsko slaganje ima cilj da poništi greške u prenosu faze. Obrtanje faze se događa na kraju svake linije za sinhronizaciju, odakle i potiče ime sistema.

Sistem SECAM (SEquential Couleur A Mémoire). Sistemi NTSC i PAL zahtevaju jednovremeni prenos luminentnog i dva hrominentna signala, što predstavlja izvesnu teškoću u radu. Sistem SECAM izbegava ove nepovoljnosti tako što jednovremeno prenosi samo jedan hrominentni signal, s obzirom da je različit za svaku liniju. Jedan od ovih signala koristi se neposredno, a istovremeno se vodi na ulaz linije za kašnjenje, na čijem će se izlazu pojaviti tek za vreme ispitivanja sledeće linije. Postupak se primenjuje naizmenično, tako da kolo za upravljanje katodnom cevi u svakom momentu ipak prima tri informacije: luminentni signal, direktni hrominentni signal i hrominentni signal koji je stavljen u liniju za kašnjenje za vreme prenosa prethodne linije *(sl.* 176).

Sistem SECAM, iako jednostavniji od dva prethodna sistema, ima sledeće prednosti:

— ne postoji nikakav međusobni uticaj između dve uzastopno prenesene informacije o obojenosti;

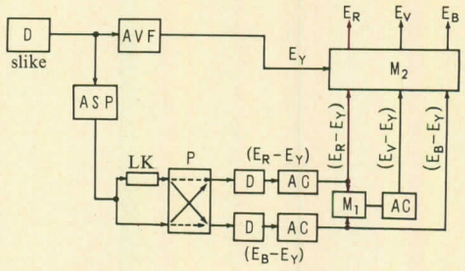
— dobra zaštita hrominentnog signala od smetnji;

— jednostavnost podešavanja prijemnika, i

— od korisnika se ne zahteva nikakvo podešavanje boje.

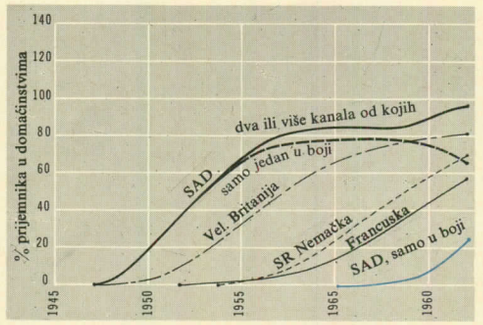
Trihromatska (trobojna) katodna cev. Uspostavljeni signali E_c, E_z i E_p upravljaju intenzitetom katodnog elektronskog mlaza, koji, pomoću zajedničkog sistema za skretanje, slično kao kod ahromatskih cevi, stvara tri slike: crvenu, zelenu i plavu, čija se vizuelna (aditivna) sinteza približava reprodukciji prizora u boji. Poznato je više tipova trihromatskih katodnih cevi, kao i povezivanja sistema monohromatskih cevi ili ahromatskih cevi sa filtrima. Međutim, za sada se serijski proizvodi samo jedan model: trihromatska katodna cev sa *perforiranom maskom*, američkog porekla (RCA, Radio Corporation of America). Ova cev ima ekran u vidu mozaika napravljenog od pastila *luminofora*, materijala koji ima osobinu da udar elektrona pretvara u vidljivu svetlost.

Koriste se tri vrste luminofora, prema tome da li emitiju crvenu, zelenu ili plavu svetlost. *Trijade*

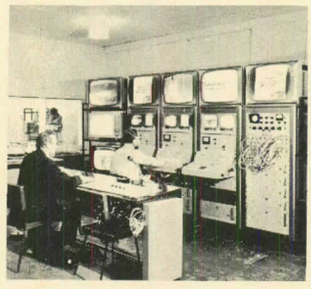


Sl. 176. — Shema principa rada prijemnika za televiziju u boji prema postupku SECAM (I).
D — detektor slike; A_S — pojačavač subnoseće učestanosti; LK — linija za kašnjenje; P — prebacivač linija; AHr — pojačavač hrominentnog signala; M_1 — mešač (matrica) za uspostavljanje signala razlike (E_z—E_y); M_2 — mešač (matrica) za uspostavljanje signala boje E_c, E_z, i E_p. (Ovo mešanje se ponekad obavlja u samoj televizijskoj cevi.)

(I) *Na shemi su prikazana samo kola iza video-detektora. Ostali VF, MF i NF kola, kao i kola za izdvajanje sinhronizacionih signala i skretanje mlaza u principu se ne razlikuju od odgovarajućih kola u prijemniku za crno — — belu televiziju (sl. 175.).*



Sl. 178. — Uporedni dijagram porasta broja televizijskih prijemnika za razne zemlje u periodu od 1945. do 1965. Porast broja prijemnika u boji uočljiv je samo za SAD.



Sl. 179. — Centar televizijske režije na fakultetu za književnost i društvene nauke u Parizu.

(grupe od tri pastile različitih luminofora) primaju elektrona iz tri posebna elektronska *topa*, i to tako da elektronski mlaz iz svakog od njih može da stigne samo do pastila odgovarajuće boje.

Ovo razdvajanje postiže se pomoću otvora na maski, koja se nalazi iza ekrana, tako da svakoj trijadi odgovara jedan otvor (*v.* prilog u boji u ovom odeljku).

Broj otvora ili trijada mora da bude takav da svetlosna mrlja, koju formiraju tri konvergentna elektronska mlaza, pokriva najmanje dve trijade, kako se u toku analize nikad ne bi dogodilo da se potpuno prekinu elektronski mlazevi. Srednji broj otvora je nešto manji od 500 000 na celoj površini ekrana.

Od podešenosti *hromatoma* (udar elektrona na pastile luminofora) zavisi čistoća boja slike.

Od *konvergentnosti* tri elektronska mlaza zavisi vernost reprodukcije slike (odsustvo obojenih kontura).

TELEVIZIJA U SVETU. U svim razvijenim zemljama broj televizijskih prijemnika raste prema opštem zakonu pribavljanja većine uređaja za domaćinstva, zakonu u kome se razlikuju: početni period, period razvoja i period zasićenja. Kriva koja predstavlja ovu zakonitost *(sl.* 178) počinje u trenutku koji zavisi od usvajanja nacionalnog programa televizije i od razvoja elektronske industrije. U stvari, ova zakonitost zavisi i od drugih uslova koji proizlaze iz tehničkog razvitka, kao što je uvođenje drugog prijemnika u nekim domaćinstvima, što je podstaknuto pojavom malih prenosnih prijemnika i pojavom televizije u boji.

PRIMENA TELEVIZIJE U ZATVORENIM KOLIMA. Nezavisno od svoje namene, javne i opširne raspodele informativnih, dokumentarnih i zabavno kulturnih programa, televizija čini značajne usluge svojom osnovnom osobinom da omogućuje trenutno posmatranje slika na daljinu i svojom sposobnošću da znatno poveća broj predmeta koji se mogu jednovremeno posmatrati sa istog mesta, kao i da poveća broj mesta na kojima se može posmatrati isti predmet.

I tako, uz korišćenje samo žičnih veza, a ne i bežičnih, televizija se sve češće nameće kao pomoćno sredstvo ljudske delatnosti i kao uspešno rešenje problema koji svakim danom postaju sve različitiji i sve brojniji:

— posmatranje izvršavanja radnji opasnih po čoveka kojima se upravlja na daljinu ili, nadgledanje svih radnji koje se obavljaju na nekom mestu gde čovek ne može da boravi ili kome ne može da se približi;

— nadgledanje saobraćaja na železnicama, putevima, aerodromima, u stanicama, rada na gradilištima, u fabrikama i uopšte svuda gde dobar pregled olakšava kontrolisanje.

Neki posebni slučajevi primene televizije u industriji pružaju mogućnost da se proceni njena višestruka korisnost. Televizija u priličnoj meri olakšava rad administrativnih službi jer omogućava čitanje na daljinu različitih dokumenata. Na primer, televizijski uređaji u bankama omogućuju da se sa udaljenosti proveri stanje računa nekog korisnika, kao i potpis na čeku. Televizija u zatvorenim kolima nalazi korisnu primenu u obrazovanju u tehničkim i ostalim visokim školama. Zahvaljujući televizijskom prenosu, nastava, tok nekog eksperimenta, operacije ili ispitivanja može se jednovremeno posmatrati u više prostorija, tako da program nastave može da prati veliki broj slušalaca *(sl.* 179). Metod olakšava rad profesoru, a slušaocima omogućuje bolju vidljivost.

Raspored prijemnika u amfiteatru ili slušaonicama predstavlja poseban problem. Jedno od dobrih rešenja je postavljanje prijemnika na tavanicu, pri čemu je ekran usmeren nadole i nalazi se u horizontalnom položaju; ogledalo čiji položaj može da se podešava pruža svakom slušaocu optimalnu vidljivost.

Televizija u boji u zatvorenim kolima. Uprkos svojoj jednostavnosti i spretnosti u radu, crno-bela televizija u zatvorenim kolima postepeno se povlači pred televizijom u boji. Na primer, to je slučaj u livnicama, u nadgledanju peći pri topljenju gvožđa, a naročito u oblasti medicinskog i hirurškog obrazovanja, gde je obilje informacija koje pruža televizijski prenos u boji posebno dragoceno. Uopšte, uređaji televizije u boji primenjeni u industriji nemaju potrebe za sistemom za kodiranje, koji je radio-televiziji nametnut usled principa kompatibilnosti (v. ranije objašnjenje), i mogu biti;

— uređaji za simultanu analizu, gde se direktno prenose bilo primarni signali o crvenom, zelenom i plavom sadržaju slike i signal sinhronizacije (trihromatska kamera sa tri cevi za analizu i četiri prenosne linije), bilo dva potrebna signala razlike i kompletan luminentni signal (trihromatska kamera sa tri ili četiri cevi za analizu i tri prenosne linije);

— uređaji za sekvencijalnu analizu slike, gde se disk sa tri sektora za filtriranje, crvenim, zelenim i plavim, okreće između objektiva kamere i jedne cevi

Phot. Thomson-Houston, Bru-C.S.F.

za analizu. Ritam prenosa ima takvu vrednost da njegovo trajanje koincidira sa prolazom kroz jedan sektor za filtriranje. Pri prijemu, trihromatske klasične katodne cevi lako se prilagođavaju na posebne uređaje, kao što je npr., ejdofor, koji omogućuju prikazivanje na velikom ekranu.

Reprodukcija zvuka

Princip. Odmah po pojavljivanju elektronskih pojačavača razmatrana je njihova upotreba za pojačanje struje iz mikrofona da bi se ostvarila reprodukcija zvuka u zvučniku. Zatim su napravljeni pretvarači, nazvani »pik-ap«, koji su omogućili reprodukciju zvuka snimljenog na ploči.

Tehnika snimanja i reprodukcije zvuka intenzivno se usavršava, tako da visokokvalitetni aparati dostižu stepen savršenstva, koji zadovoljava i najstrože ljubitelje muzike. I zaista, obično je nemoguće razlikovati gramofonsku reprodukciju muzičkog dela od njegovog neposrednog izvođenja.

Uređaj za reprodukciju zvuka (*sl.* 180) sadrži sledeće elemente:

1. motor M za okretanje ploče zajedno sa pretvaračem P — glavom za reprodukciju *piezo*-električnog ili elektromagnetnog tipa;
2. pretpojačavač — korektor PA, koji skoro linearno pojačava napon sa izlaza pretvarača i sadrži *regulator boje tona* RT, koji korisniku omogućuje da bira frekventni odgovor uređaja prema sopstvenom ukusu;
3. pojačavač snage AS, koji je, takođe, što je moguće više linearan; stepen izobličenja kvalitetnih pojačavača manji je od 0,2%;
4. jedan ili više zvučnika Z_v, koji pokrivaju čitavo zvučno područje i koji su postavljeni na ploču, ili na zastor, ili u antirezonantnu kutiju.

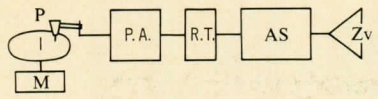
Savremeni gramofoni mogu da koriste četiri tipa ploča, koje se razlikuju prema brzini okretanja:

1. ploče sa 78 obrtaja u minuti, nekadašnje ploče sa 34 brazde po centimetru, čija je reprodukcija trajala četiri minuta za prečnik oko 30 cm;
2. ploče sa mikrobrazdama, 45 o/min., koje imaju prosečno 100 brazdi po centimetru i koriste se posebno za zabavnu muziku;
3. ploče sa mikrobrazdama, 33 1/2 o/min., koje se posebno koriste za snimanje dela klasične muzike i čija reprodukcija traje 25 do 30 minuta;
4. ploče sa mikrobrazdama, od 16 2/3 o/min., posebno pravljene za reprodukciju govornih dela namenjenih slepima, ali ih magnetofoni, zbog svojih osobina, sve više potiskuju.

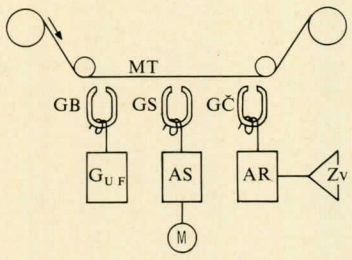
Kvalitet tona ploča sa mikrobrazdama pobudio je opštu zainteresovanost da se snimljena muzika reprodukuje pomoću kvalitetnijih gramofona. To je bio početak istraživanja u oblasti »visoke vernosti« reprodukcije zvuka, izraza, koji se često, iz komercijalnih razloga koristi za aparate srednjih kvaliteta.

STEREOFONIJA. Pojavom stereofonije oko 1955. učinjen je sledeći korak u razvitku reprodukcije zvuka, koji je imao za cilj da stvori utisak zvuka u prostoru. Da bi se ovo ostvarilo, bio bi potreban vrlo veliki broj zvučnih izvora. Međutim, iskustvo pokazuje da tri izvora, a, u najgorem slučaju dva, već daju zadovoljavajuće rezultate. Postoje ploče sa posebnim urezivanjem brazde, čije su dve bočne strane nagnute pod uglom od 45° prema horizontali, od kojih svaka, prema dubini, preuzima snimanje po jednog stereofonskog kanala, i koje su zbog primenjenog postupka nazvane 45 – 45.

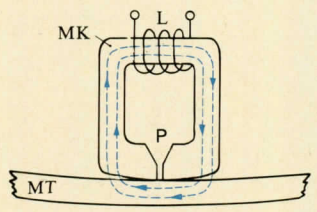
Piezoelektrični ili magnetni pretvarači zvuka gramofonske glave daju dva signala, koji se dovode na dva nezavisna kanala za reprodukciju zvuka i svaki napaja po jedan zvučnik (ili grupu zvučnika) koji su postavljeni levo i desno od slušaoca, na rastojanju koje zavisi od veličine prostorije u kojoj se snimak reprodukuje.



Sl. 180. — Shema principa rada gramofona: M — obrtni disk za obrtanje ploče; PA — predpojačavač; RT — regulator boje tona; AS — pojačavač snage; Zv — zvučnik.



Sl. 181. — Shema principa rada magnetofona: MT — magnetna traka; GB — glava za brisanje; GS — glava za snimanje; GČ — glava za čitanje; G_{UF} — generator struje ultrazvučne učestanosti; AS — pojačavač snimanja; AR — pojačavač reprodukcije; Zv — zvučnik; M — mikrofon.



Sl. 182. — Glava za snimanje: MT — magnetna traka; MK — zatvoreno magnetno kolo za snimanje; P — procep magnetnog jezgra; L — indukcioni namotaj u kolu pojačavača za snimanje.

MAGNETOFON. Magnetofonsko snimanje zvuka prvi je ostvario 1900. Pulsen (Poulsen), i to pod imenom *telegrafon*. Snimanje je vršeno na čeličnoj žici, koja se kretala u procepu između polova elektromagneta čiji je namotaj napajan telefonskom strujom koja se snima. Pulsenov pronalazak nije usavršavan sve do drugog svetskog rata, kada je uglavnom u Nemačkoj postignut značajan napredak, upotrebom celulozne ili plastične trake koja je bila prekrivena oksidom gvožđa. Magnetni aparati za snimanje (*sl.* 181) sadrže sledeće bitne elemente:

1. magnetnu traku MT, koja se kreće stalnom brzinom ispred glave za snimanje GS;
2. glavu za snimanje, koja u jednostavnijim aparatima obavlja i funkciju glave za čitanje;
3. glavu za čitanje — reprodukciju GČ;
4. glavu za brisanje GB;
5. dva pojačavača koji služe za snimanje i reprodukciju i koji se mogu zameniti samo jednim pojačavačem i odgovarajućim prekidačem.

Aparati sa više kanala za snimanje povećavaju kapacitet snimanja magnetofonske trake. Različiti kanali se snimaju jedan za drugim, a zatim se na isti način čitaju. Kanali se mogu jednovremeno i snimati (u kom slučaju je potrebno više glava za snimanje) i jednovremeno reprodukovati. Ova mogućnost je naročito dragocena za stereofonsko snimanje.

Magnetofonska traka. Najčešće korišćena magnetofonska traka ima širinu 6,25 mm i debljinu 38 mikrona. Postoje i tanje trake, od 25 mikrona, i posebno tanke trake od 18 mikrona. Vrlo fine čestice oksida gvožđa Fe_2O_3 (manje od 1 mikrona) mešaju se sa vezivnom materijom i tada nanose na traku tako da se posle sušenja dobije sloj debljine oko 15 mikrona. Sistem za kretanje trake treba da obezbedi konstantnu brzinu kretanja trake u granicama od 2%, da bi se sačuvao kvalitet reprodukovanog zvuka. Korišćene brzine kretanja su 38, 19, 9,5 i 4,75 centimetara u sekundi. Frekventni opseg reprodukovanog zvuka opada ako se smanjuje brzina kretanja trake, zbog čega se kvalitetno snimanje obavlja sa velikim brzinama. Fluktuacije brzine moraju biti krajnje smanjene da bi se sprečila neujednačenost zvuka. Ova konstantna brzina ostvaruje se upotrebom vrlo preciznih mehaničkih sistema vučenja trake. Brzo premotavanje trake u profesionalnim aparatima obezbeđuje se pomoću posebnih motora za oba smera kretanja trake. Amaterski aparati najčešće sadrže samo jedan motor, sa umnožačem brzine za brzo premotavanje trake.

Glava za snimanje i čitanje. Glavu za snimanje čini magnetno kolo sa procepom ispred koga se kreće magnetna traka (*sl.* 182). Struja kroz namotaj magnetiše kolo, pri čemu magnetiše i čestice oksida gvožđa koje se kreću ispred procepa. Ako je struja magnetisanja promenljiva, feromagnetne čestice na pokretnoj magnetnoj traci namagnetisaće se u istom ritmu, srazmerno jačini struje magnetisanja.

Pri reprodukciji, feromagnetne čestice na pokretnoj magnetofonskoj traci indukovaće u namotaju glave za čitanje napone koji su srazmerni njihovom namagnetisanju. Teško je ostvariti samo u jednoj glavi, koja naizmenično služi za snimanje i čitanje, srazmernost između struje u namotaju za snimanje i indukovanog napona u glavi za čitanje. Stoga profesionalni aparati imaju uvek posebne glave za svaku od ovih funkcija.

Glava za brisanje. Zadatak glave za brisanje je da sa trake ranije snimljeni sadržaj izbriše pre nego što ova prođe ispred glave za snimanje. Brisanje se ostvaruje propuštanjem intenzivne naizmenične struje kroz namotaj glave za brisanje. Naravno, upotrebljena učestanost mora da leži izvan čujnog područja i obično se nalazi između 45 i 90 kHz.

Snimanje zvuka na magnetnom principu u odnosu na snimanje na gramofonsku ploču ima sledeće značajne prednosti:

— duže trajanje reprodukcije (više časova);
— širi spektar učestanosti (50 do 45 000 Hz);
— mogućnost paralelnog snimanja više zvučnih kanala;
— bolji odnos signal/šum;
— duži vek trajanja snimka (500 reprodukcija iste trake bez značajnijeg opadanja kvaliteta);
— mogućnost reprodukcije neposredno posle snimanja;
— lako pravljenje zvučnog snimka, zahvaljujući mogućnosti brisanja upotrebom nečujnih učestanosti spajanja i lakog korigovanja.

Navedene prednosti su takve da industrija gramofonskih ploča koristi danas magnetno snimanje pri pravljenju prvobitnog zvučnog snimka.

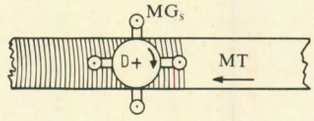
Odsustvo brzog postupka za umnožavanje magnetofonskih snimaka predstavlja jedini ozbiljan nedostatak snimanja u odnosu na snimanje ploča, koje se proizvode brzim i jeftinim postupkom industrijskog presovanja.

MAGNETOSKOPSKO SNIMANJE. Snimanje televizijskih programa mnogo doprinosi elastičnosti i eksploataciji televizijskih mreža. Snimanje filma, koji se zatim emituje preko televizije, predstavlja prednost zbog jednostavnosti uređaja, ali jako smanjuje kvalitet slika.

Polazeći od tehnike korišćene kod magnetofona, snimanje slika na magnetnu traku u početku je izgledalo potpuno neizvodljivo. Zaista, zbog širine propusnog opsega snimanih signala (više megaherca), linearno snimanje duž trake, kao pri snimanju zvuka, zahtevalo bi brzinu kretanja magnetne trake

od više metara u sekundi, što je nedopustivo. Američki sistem Ampex (*sl.* 183) rešava ovaj problem upotrebom transverzalnog snimanja.

Magnetna traka primenjena u ovom sistemu ima širinu 5 cm. Četiri glave za snimanje postavljene su na disk koji se okreće sa 240 obrtaja u sekundi. Snimanje se obavlja po uzastopnim kružnim lukovima dužine 0,25 mm. U ovim uslovima, brzina kretanja magnetne trake kreće se između 20 i 30 cm u sekundi. Program snimljen na magnetnu traku namotanu na kotur prečnika 30 cm traje duže od jednog časa.



Sl. 183. — Princip rada magnetoskopa Ampex: MT — magnetna traka; D — obrtni disk sa magnetnom glavom za snimanje MG$_S$.

Uređaji za magnetno snimanje slika, ili magnetoskopi, napravljeni za potrebe televizijske emisije, počeli su da nalaze i druge primene: npr., u nastavi, pravljenju rentgenskih snimaka i u hirurškim operacijama. Početkom 1966, jednostavniji modeli magnetoskopa, namenjeni širokom krugu televizijskih gledalaca, pojavili su se na tržištu, ali njihova visoka cena je za sada ozbiljna prepreka širokoj upotrebi.

Mogućnost reprodukcije slike neposredno posle snimanja ima takve prednosti da se može predvideti da će u budućnosti magnetno snimanje biti iskorišćeno i u kinematografiji, bilo kao sredstvo kontrole, bilo čak kao potpuna zamena postojećeg foto-postupka.

Primena elektronike u oblasti merenja

PRINCIP. Elektronika zauzima vodeće mesto u oblasti merenja zbog izvanrednih mogućnosti elektronskih uređaja sa stanovišta pojačanja, tačnosti i brzine odgovora.

Elektronika omogućava da se mere sve fizičke veličine, čak i one koje se ne mogu meriti drugim metodima. Zahvaljujući pojačanju, ona dozvoljava da se radi sa vrlo malim veličinama. Odsustvo inercije omogućava joj da prati i najbrže pojave. Raznovrsnost merenih fizičkih veličina je velika te su i ostvareni nebrojeni tipovi uređaja za merenje. Međutim, većina uređaja za merenje može se svesti na opštu shemu prikazana na *sl.* 184. Pretvarač P pretvara merenu veličinu u neku električnu veličinu. Dobijena električna veličina, napon ili struja, pojačava se elektronski i, najzad, pobuđuje merni instrument M (galvanometar, osciloskop) ili registrator, bilo grafički bilo numerički.

Pretvarači

Postoji vrlo veliki broj pretvarača koji omogućuju konverziju fizičke veličine u neku električnu veličinu. Često, za svaku fizičku veličinu postoji veći broj električnih pretvarača. Na primer, linearni pomeraj koji izražava meru dužine, može prouzrokovati promenu:

— nekog kapaciteta (kapacitivni pretvarač);
— fotoelektrične struje (fotoelektrična ćelija);
— električnog napona (potenciometar);
— koeficijenta uzajamne indukcije;
— električnog tovara (kristal, piezoelektrični);
— otpornosti (merač promene dimenzija);
— nekog zračenja, X, β ili γ.

Izbor pretvarača zavisi od posebnih uslova u kojima se obavlja merenje. Ovaj izbor je od prvorazrednog značaja, jer uslovljava osetljivost, tačnost i stabilnost uređaja za merenje.

UPOTREBA PRETVARAČA

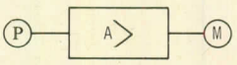
Pretvarači se postavljaju na ulaz pojačavača, ponekad posredstvom mosta za merenje. Pojačavač se pravi tako da njegovo pojačanje bude što je moguće konstantnije; zbog toga se često pribegava jakoj negativnoj reakciji.

MERENJE DUŽINE. Postoji veliki broj elektronskih metoda za merenje dužine. Oni se mogu podeliti u dve osnovne kategorije: metodi po kojima materijalni organ, ili ispitivač, dodiruje mereni komad, i metodi po kojima se merenje obavlja bez dodira. Prve metode naročito se koriste za merenje mehaničkih delova, a druge, za kontrolu proizvoda u toku procesa proizvodnje (prečnika žice, debljine materijala itd.). Prvoj kategoriji pripadaju elektronski komparatori, u kojima jedna ili više elektronskih cevi obrazuju pojačavače ekvivalentne polugama mehaničkog komparatora. Pojačanje signala može da dostigne i vrednost od 100 000, mada i to ne predstavlja krajnju granicu, i to bez kretanja, bez habanja materijala, može da prouzrokuje smanjivanje osetljivosti ili tačnosti.

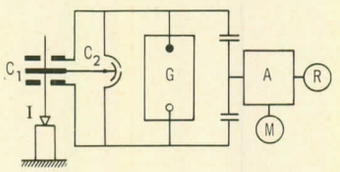
Velika je prednost elektronskih komparatora da oni, koristeći spoljašni izvor energije, mogu na svom izlazu da imaju znatno veću energiju od one koja se predaje ispitivaču. Ova energija je dovoljna da direktno pokrene galvanometre, releje, električne ventile ili motore.

Mogu se zamisliti elektronski komparatori koji koriste promene kapacitivnosti, induktivnosti ili otpornosti, izazvane pomeranjem ispitivača. Promena izabrane električne veličine može se odrediti pomoću više postupaka. Ukratko, merenjem kapacitivnosti, induktivnosti i otpornosti nalazi se tražena promena. Primera radi, na *sl.* 185. prikazana je osnovna shema elektronskog komparatora koji je nazvan, »zaustaviti, dostignuta vrednost«.

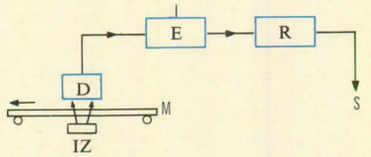
Ispitivač I pomera zajedničku pokretnu oblogu dva kondenzatora C_1. Kondenzatori su vezani na red i nalaze se u jednoj grani mosta. Kada se kapacitet jednog kondenzatora povećava, kapacitet drugog se smanjuje, i obrnuto. Druga grana mosta sadrži dva jednaka kondenzatora. Most se napaja strujom visoke učestanosti (450 kHz). Kompenzacioni kondenzator C_2 nalazi se u paraleli sa kondenzatorima C_1 i služi da se most uravnoteži za uzorak-etalon.



Sl. 184. — Princip rada mernog elektronskog uređaja: P — pretvarač; A — pojačavač; M — merni instrument.



Sl. 185. — Princip rada elektronskog komparatora: I — ispitivač; C_1 — promenljiva kapacitivnost; C_2 — kompenzaciona kapacitivnost; G — galvanometar; A — pojačavač; M — miliampermetar; R — relej.



Sl. 186. — Beskontaktno merenje debljine: M — mereni materijal; IZ — izvor radio-aktivnog zračenja; D — detektorska glava; E — elektronski deo uređaja; R — registrator; S — signalizacija ili signal za upravljanje.

Miliampermetar M meri visinu u odnosu na izabrani uzorak-etalon. Cevni ili tranzistorski elektronski uređaj pojačava napon neravnoteže mosta i galvanometar G meri visinu u odnosu na uzorak-etalon. Merenje može da se obavlja i za vreme obrade merenog komada. Kad se postigne ravnoteža mosta, aktivira se relej R i zaustavlja mašinu za obradu elementa. Uređaj je vrlo osetljiv i lako meri vrednost desetine mikrona.

Upotreba ultrazvuka. Poseban metod merenja debljine pomoću ultrazvuka sastoji se u emitovanju frekventno modulisanih, ultrazvučnih talasa visoke učestanosti u komad čija se debljina meri. U ovu svrhu, ultrazvučni pretvarač postavlja se na površinu merenog uzorka. Talasi se odbijaju od unutrašnje površine uzoraka, što izaziva stvaranje stojećih talasa. Uvek, kada je učestanost oscilacija jednaka rezonantnoj učestanosti uzoraka (osnovnoj učestanosti ili harmoniku), ovaj počinje da vibrira i da apsorbuje energiju, što ima za posledicu naglu promenu napona na krajevima oscilatora. Ova promena, posle pojačanja i prolaska kroz »diskriminator vrha«, dovodi se na vertikalne ploče osciloskopa. Horizontalno skretanje mlaza osciloskopa sinhronizovano je sa frekventnom modulacijom a ujedno joj je i proporcionalno. Prema tome, svetla tačka katodne cevi neprestano zauzima horizontalni položaj, koji odgovara određenoj učestanosti. Vertikalno skretanje zavisi od snage dobijene iz generatora. Kad je pretvarač postavljen uz uzorak, na ekranu cevi pojavljuje se jedna ili više vertikalnih crta, čiji položaj precizno određuje rezonantnu učestanost uzorka, odnosno njegovu debljinu, ako se zna brzina prostiranja zvuka u ispitivanom materijalu ili ako je uređaj baždaren prema uzorku poznate debljine. Ovaj postupak služi za brzo i tačno određivanje debljine nekog materijala čija je samo jedna površina pristupačna, npr., pri merenju trupa broda ili debljine metalnih cevi. Ovim metodom mogu se meriti debljine metalnih materijala od 1 do 120 mm.

Beskontaktni metodi merenja debljine. Proizvodi dobijeni postupkom »neprekidne« proizvodnje, npr., istezanjem, valjanjem i izvlačenjem, nisu podesni za merenje komparatorskom metodom. I zaista, bilo bi potrebno zaustaviti kretanje proizvoda da bi se izmerila njegova debljina, što je u određenim uslovima apsolutno nemoguće (npr., izvlačenje i valjanje u vrućem stanju). Osim toga, tačnije merenje debljine materijala koji su izloženi visokoj temperaturi mahom je nemoguće i zbog širenja ispitivača i oslonca komparatora.

Dakle, merenja debljine bez dodira vrlo su korisna. Ona su zasnovana na upotrebi zračenja koje prolazi kroz merenu materiju, s obzirom da je slabljenje zračenja srazmerno težini po jedinici površine materije kroz koju prolazi. Ovaj metod predstavlja naročito pogodno sredstvo za merenje težine po jedinici površine datog materijala, i to bez dodira materijala i uređaja za merenje (*sl.* 186). Za dati materijal konstantne gustine meri se, dakle, debljina materijala. Ovo merenje je trenutno i nezavisno od brzine kretanja proizvoda. Takvi uređaji omogućuju mere-

Tipovi najčešće korišćenih pretvarača

Veličina koja se meri	Princip korišćen u pretvaraču
Dužina, debljina ili pomeraj	Promenljiva otpornost, promenljiva kapacitivnost, promenljiva induktivnost, reluktansa, međuindukcija, fotoelektrična ćelija, izvor zračenja i detektor radijacija, ultrazvuk
Brzina: ugaona, linearna, periodična	Dinamo, dinamo, stroboskopija, fotoelektrična ćelija
Sila, moment, ubrzanje	Piezoelektricitet, promenljiva otpornost, dinamometar i pretvarač pomeraja
Temperatura, količina toplote.	Termoparovi, otpornosti, termičke otpornosti, ćelije za detekciju zračenja
pH	Elektrode (elektrometrija)
Gustina	Izvor X, β ili γ zračenja i detektor zračenja
Svetlosno zračenje i zračenje energije	Fotoelektrična ćelija, termopar
Pritisak	Piezoelektricitet, merač naprezanja, promenljiva kapacitivnost promenljiva otpornost, fotoelektrična ćelija
Vakuum	Merenje jonizacije
Nivo	Visina tečnosti (v. *pritisak*), kontaktna sonda, promenljiva kapacitivnost, fotoelektrična ćelija, pritisak (v. *sila*), izvor zračenja i detektor radijacija
Viskozitet	Ultrazvuk
Protok gasa	Anemometar sa toplom žicom
Protok tečnosti	Propeler i broj obrta, elektromagnetni (provodna tečnost koja protiče kroz magnetno polje), termometarska sonda
Doziranje i analiza gasa	Provodljivost, spektrografija + fotoelektrična ćelija, fotoelektrične ćelije, indeks prelamanja, brzina zvuka, apsorpcija infracrvenih zrakova, magnetna merenja
Vlažnost	Otporna ćelija (litijum-hlorid), psihrometar sa fotoelektričnom ćelijom.

nje debljine čelične trake, čija je temperatura manje ili više povišena i pri brzini kretanja do 600 m u minuti. Ovaj metod najčešće koristi X, beta i gama-zračenje. Vrlo prodorni X-zraci koriste se pri merenju velikih debljina. Njihova upotreba zahteva posebne predostrožnosti zbog opasnosti koju oni predstavljaju. Za merenje debljine čeličnih traka do 7,5 mm koriste se gama-čestice, pri čemu kao detektor služi scintilacioni brojač, koji se sastoji od kristala natrijum-jodida i fotomultiplikatora. Indikator pokazuje odstupanje od normalne debljine proizvođene trake. Tačnost uređaja je reda veličine 3% za debljinu od 4,5 mm.

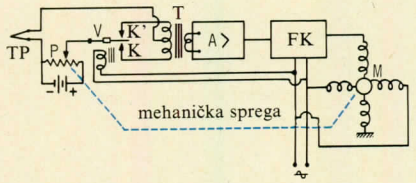
MERENJE TEMPERATURE. Merenje temperature predstavlja bitan parametar za veliki broj industrijskih procesa proizvodnje. Ono se može izvršiti upotrebom odgovarajućih pretvarača, koji napajaju galvanometar. Zavisno od opsega merene temperature, koriste se vrlo različiti tipovi pretvarača.

Sonde sa metalnim vlaknima i termoparovima omogućavaju merenja temperature do 1 700°C. Preko ove granice pribegava se pretvaračima sa fotoelektričnim ćelijama koje su osetljive na infracrveno zračenje i koje omogućuju merenje temperature do 3 000°C. Ovi različiti pretvarači su dovoljno osetljivi da pokrenu galvanometar, na kome su označeni neposredno stepeni temperature. Međutim, ovaj aparata je lomljiv, osetljiv na udarce i vibracije. Značajan je doprinos elektronike, koja omogućuje da se naprave merni uređaji manje osetljivi na potrese.

Primera radi, na *sl.* 187. prikazan je princip rada potenciometarskog pirometra. Kao pretvarač koristi se sonda sa termoparovima TP, koji sa potenciometrom za kompenzaciju čine merno kolo. Jednosmerni napon na potenciometru P je u opoziciji jednosmernom naponu koji se stvara na termoparu TP. Klizač ovog potenciometra povezan je sa pokretnim izvodom elektromagnetnog vibratora V, koji sadrži permanentni magnet i pobudni namotaj napajan naizmeničnim naponom. Pokretni izvod osciluje između kontakta K i K′, koji su vezani za krajeve primara transformatora T, čija se srednja tačka nalazi u mernom kolu. Sekundar transformatora T vezan je na ulaz cevnog ili tranzistorskog pojačavača A, čiji diferencijalni izlaz pokreće motor M. Smer okretanja motora određen je pomoću faznog komparatora FK, koji upoređuje faze ulaznog signala i naizmeničnog napajanja. Motor pokreće potenciometar P čijim se pomeranjem menja napon za kompenzaciju, koji je u opoziciji naponu koji se dobija od termopara TP. Motor se kreće sve dok se ne uspostavi ravnoteža. Merni instrument povezan u potenciometarskom kolu pokazuje temperaturu okoline u kojoj se nalazi termopar TP. Za merenje viših temperatura koriste se pirometri sa fotoelektričnim ćelijama (*sl.* 188).
Svetlosni fluks, koji potiče od tela čija se temperatura meri, prima se pomoću foto-ćelije. Da bi se olakšalo njegovo pojačanje, ovaj fluks je modulisan niskom učestanošću (oko 400 Hz) pomoću diska sa otvorima D, koga pokreće mali motor M. Posle pojačanja, naizmenična komponenta na izlazu ispravlja se pomoću mosta sa četiri selenska ili germanijumska elementa, i napaja galvanometar G. Jaka negativna reakcija dovodi se na ulaz pojačavača, usled čega je izlazna struja uveliko nezavisna od neposredne vrednosti otpornosti ispravljačkih elemenata. Ovim se takođe odstranjuje uticaj uvek mogućih promena karakteristika ispravljača. Osetljivost ovog tipa pirometra je, pri najvišim radnim područjima, reda 0,5°C.

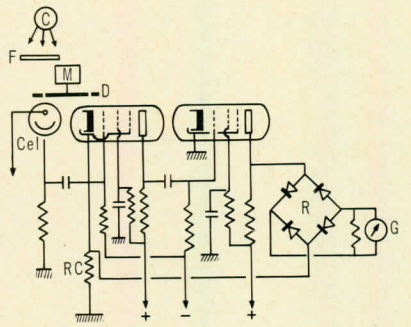
MERENJA U OBLASTI SVETLOSTI. Proučavanje svetlosnih izvora i njihovog zračenja znatno je olakšano korišćenjem elektronskih uređaja visoke osetljivosti i velike tačnosti. Zahvaljujući elektronskom pojačanju, moguće je meriti fluks reda 10^{-8} lumena.

Integrator svetlosti. Za merenje osetljivosti fotografskih emulzija koriste se elektronski uređaji, koji



Sl. 187. — Princip rada potenciometarskog pirometra:

TP — termoelektrični par;
P — potenciometar;
V — elektromagnetni vibrator;
K, K' — nepokretni kontakti vibratora;
T — ulazni transformator pojačavača;
A — pojačavač;
M — motor;
FK — fazni komparator.



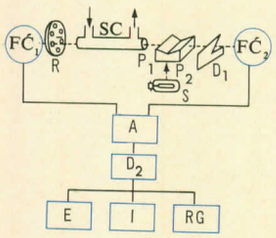
Sl. 188. — Princip rada fotoelektričnog pirometra:

C — telo čija se temperatura meri;
F — filtar;
D — disk sa otvorima;
M — motor za pokretanje diska;
Cel — fotoelektrična ćelija;
R — ispravljački most;
G — galvanometar;
RC — otpornost povratne sprege.

omogućuju da se integrali primljena količina svetlosti na određenoj površini u datom vremenskom intervalu. Ovi integratori sadrže fotoelektričnu ćeliju čija struja prazni (neki) prethodno napunjen kondenzator. Brojač radi sve dok pražnjenje ne dostigne određenu vrednost. Količina primljene svetlosti može se meriti sa tačnošću od skoro 1% za elemente koji se menjaju od 0 do 50 000 lx.

Fotoelektrične analize i doziranja. Merenjem intenziteta obojenosti, koja odgovara pojedinim materijalima, može se izvršiti kvantitativna analiza tela, čak i u slučaju vrlo slabe koncentracije boje.

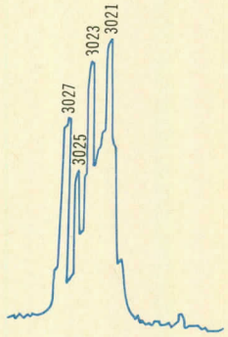
Ova merenja su zasnovana na primeni Lambert-Berovog (Lambert-Bear) zakona, prema kome apsorpcija svetlosti koja prolazi kroz neki rastvor, predstavlja eksponencijalnu funkciju koncentracije i debljine sloja rastvora. Fotoelektrični metodi sa elektronskim pojačanjem toliko su osetljivi da se podjednako dobro mogu primeniti i na tečnosti i na gasove. Na slici 189, prikazan je princip uređaja za fotoelektrično doziranje gasa. Modulisani svetlosni snop, dobijen iz svetlosnog izvora S, podeljen je u dva snopa pomoću dve prizme sa totalnom refleksijom P_1 i P_2. Jedan deo svetlosti prolazi kroz staklenu cev SC, kroz koju teče ispitivani gas ili tečnost i pada na fotoelektričnu ćeliju $FĆ_1$, dok drugi dolazi na fotoelektričnu ćeliju za upoređivanje $FĆ_2$. Između izlaza cevi SC i ćelije $FĆ_1$ nalazi se nosač objektiva sa revolverom R, koji dozvoljava da se na putu svetlosti nađu bilo otvor bilo različiti zastori koji odgovaraju određenoj koncentraciji analiziranog fluida. Drugi snop se manje ili više smanjuje pomoću pokretne dijafragme D_1, koja reguliše količinu svetlosti koja pogađa ćeliju $FĆ_2$. Kao svetlosni izvor koristi se lampa sa živinom parom pod visokim pritiskom. Ona se napaja naizmeničnom strujom. Dakle, svetlosni fluks je modulisan dvostrukom učestanošću mreže. Pogodni filtri, raspoređeni na



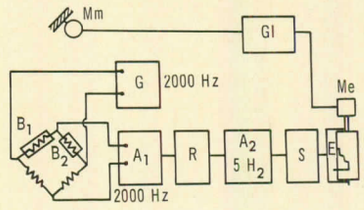
Sl. 189. Princip rada fotoelektričnog uređaja za doziranje:

SC — staklena cev kroz koju prolazi gas za analizu;
P_1, P_2 — prizme sa totalnom refleksijom;
$FĆ_1$ — analizatorska fotoelektrična ćelija;
$FĆ_2$ — fotoelektrična ćelija za upoređivanje;
D_1 — dijafragma za podešavanje količine svetlosti koju prima ćelija $FĆ_2$;
A — elektronski pojačavač;
D_2 — detektor;
R — revolver;
E — pisač;
I — indikator;
RG — regulator.

putu snopa, određuju oblast talasnih dužina koje odgovaraju spektru apsorpcije gasa čije se doziranje određuje. Već prema slučaju, koriste se vidljivi spektar ili, nasuprot, ultraljubičasti spektar. Tako je moguće optički odvojiti ispitivani fluid od drugih sastavnih delova smeše. Fotoelektrična ćelija $FĆ_2$ obezbeđuje kompenzaciju neizbežne fluktuacije svetlosnog izvora, s obzirom da se dve ćelije nalaze u mostu. Pojačavač A sa velikim pojačanjem pojačava električnu struju fotoćelije. Detektorski stepen D_2, koji se nalazi iza pojačavača, napaja izlazni voltmetar koji je baždaren u koncentraciji ispitivanog gasa. Paralelno sa voltmetrom može da se poveže pisač E. Opseg mernog aparata ili pisača moguće je podesiti prema odgovarajućem opsegu merene koncentracije pomoću optičkog pomeranja njegove nule (podešavanjem dijafragme i nosača objektiva sa revolverom) i pomoću povećanja osetljivosti. Ovaj tip aparata dozvoljava da se ispituju gasovi kao hlor, azot-peroksid, azot-dioksid i sumpor-dioksid. Podesan je takođe za određivanje vlažnosti gasa doziranjem aerosola koji nastaje u dodiru vlažnosti gasa sa rastvorom oleuma. On omogućuje da se odredi sadržaj vlažnosti od 20 mg/m³. Drugi metodi određivanja količine gasa zasnovani su na posmatranju njihovih određenih fizičkih osobina, uglavnom termičkih ili magnetnih. Prave se i analizatori koji rade na principu termičke provodljivosti, pomoću merenja pri sagorevanju ili pomoću apsorpcije infracrvenog zračenja.



Sl. 190. Dijagram spektralnih linija žive talasne dužine 3024 Å, dobijen pomoću mikrofotometra.



Sl. 191. Princip rada spektrofotometra sa infracrvenim zračenjem:

B_1, B_2 — bolometri; G — generator 2000 Hz; A_1 — pojačavač podešen na 2000 Hz; R — ispravljač i filtar; A_2 — pojačavač podešen na 5 Hz; S — separator signala; E — pisač; M_m — motor koji pokreće ogledalo spektrofotometra; M_e — motor koji pokreće valjak pisača; GI — generator impulsa za sinhronizaciju motora M_m i M_e.

Spektrometrija i spektrofotometrija. Za spektralnu analizu svetlosnih izvora ili spektrofotometriju danas se raspolaže posebnim aparatima koji imaju veoma veliku moć razlaganja spektra. Mikrofotometri omogućuju razlikovanje spektralnih linija koje su odvojene samo delom angstrema.

Elektronski spektrofotometar ima sledeće osnovne delove:

1. svetlošni izvor (lampa sa lukom u vodoniku ili lampa sa vlaknom tungstena);
2. monohromator;
3. vakuumska fotoelektrična ćelija ili ćelija sa umnožavanjem elektrona;
4. elektronski pojačavač;
5. sistem mrežnog napajanja;
6. galvanometar ili uređaj za registrovanje koji omogućuje zapisivanje na hartiji.

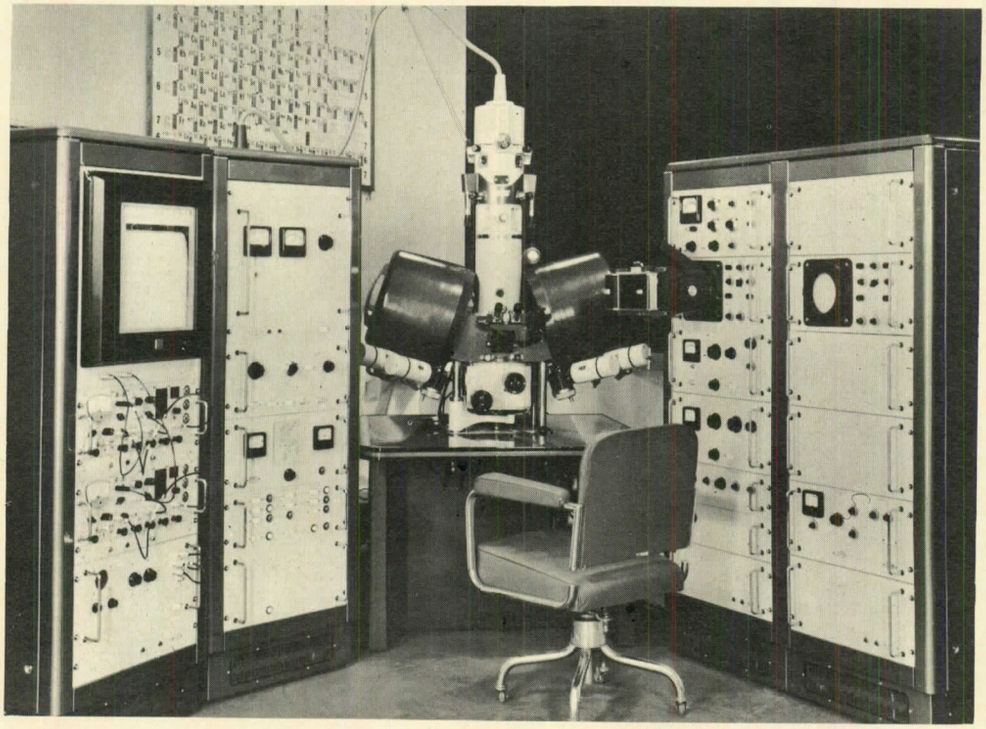
Kao primer rezultata dobijenih pomoću industrijskog fotospektrometra, na *sl.* 190. prikazan je snimak spektralne linije žive od 3 024 Å, koji je dobijen pomoću mikrofotometra tipa Vasi (Vassy). Zapaža se izvanredna moć razlaganja uređaja.

Infracrvena spektrofotometrija. Ovom metodu treba posvetiti posebnu pažnju, pošto hemičarima pruža dragoceno sredstvo analize, koje se vrlo često koristi, naročito u oblasti organske hemije. Metod je zasnovan na činjenici da izvesna elektromagnetna zračenja mogu da izazovu vibracije molekula koji obrazuju neko hemijsko jedinjenje. Za dobro određene učestanosti pobudnog zračenja nastaje rezonanca različitih hemijskih molekula. Vrednosti rezonantne učestanosti i apsorbovane energije tačno određuju prirodu molekula, pošto ne postoje dve različite materije koje imaju isti infracrveni spektar.

Pri upotrebi ovog metoda danas se koriste automatski aparati za snimanje, koji daju krivu apsorbovane energije zavisno od različitih talasnih dužina infracrvenog spektra. Ispitivanje dobijene krive omogućuje identifikaciju različitih komponenata nekog tela i nečistoća koje ono ponekad može da sadrži.

Infracrvena spektrofotometrija sve više se koristi u industriji nafte, plastičnih materija, mirisa i lakova. Metod je posebno dragocen za ispitivanje stepena nečistoća nekog proizvoda u slučaju kad je hemijska analiza nemoćna. I zaista, tako se mogu odrediti tragovi hloroforma reda nekoliko milionitih delova u tetrahlor-ugljeniku.

Uređaj tipa O. N. E. R. A (*sl.* 191) koristi izvor svetlosti sa obilnim zračenjem u infracrvenoj oblasti (Nernstovo vlakno). Sistem, sa pokretnim diskom sukcesivno usmerava svetlost u svaki sud, koji sadrži materije koje se upotrebljavaju. Neki od njih sadrže referentne uzorke, a drugi ispitivani proizvod. Preneseno zračenje pada pet puta u sekundi na otvor ulaza monohromatora. Optički uređaj monohromatora koristi postupak Litrova (Littrov), tj. okretanje ravnog ogledala koje obezbeđuje ispitivanje infracrvenog spektra. Slika na otvoru izlaza monohromatora obrazuje se na dvostrukom bolometru od nikla, čiji svaki elemenat sadrži po jedan otpornik. Vremenska konstanta bolometra je reda 0,02 sekunde. Oba elementa se nalaze u uravnoteženom mostu koji se napaja generatorom učestanosti 2 000 Hz. Napon na izlazu mosta pojačava se pomoću pojačavača podešenog na učestanost od 2 000 Hz, a zatim, posle ispravljanja i filtriranja i pomoću pojačavača prilagođenog na učestanost od 5 Hz. Napon na izlazu iz ovog pojačavača šalje se separatoru signala, usled čega se pojavljuju dve uzastopne komponente, od kojih jedna odgovara merenom, a druga referentnom snopu. Osnovni deo separatora predstavlja obrtni prekidač koji je povezan sa osovinom diska. Najzad napon jednak odnosu dveju komponenata pokreće sistem za pisanje na dobošu. Motor za pokretanje doboša sinhronizovan je sa sistemom za okretanje ravnog ogledala, čime obezbeđuje da se promena dužine talasa kreće po strmoj strani izlaza monohromatora.



Sl. 192. — Elektronska mikrosonda.

Spektrografska mikroanaliza pomoću X-zračenja. Francuski istraživač R. Kasten (R. Castaing) pronašao je 1951. elektronsku mikrosondu (*sl.* 192) koja je doprinela značajnom napretku u analizi vrlo malih količina materije u oblasti mineralogije

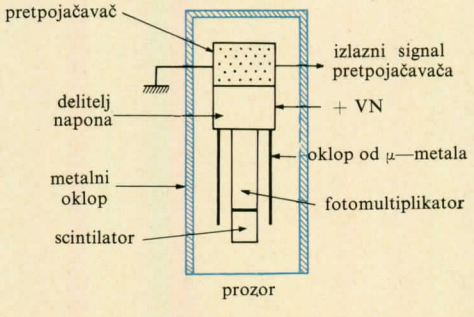
Phot. Roger- Viollet-C.S.F.

i metalografije. Analiza je vrlo brza, nije destruktivna i može da se izvrši na zapremini materije reda kubnog mikrona.

Ovaj uređaj (*sl.* 193) zasnovan je na sledećem principu: sudar brzog elektronskog snopa sa anodom (ili antikatodom) proizvodi X-zračenje čiji spektar obuhvata karakteristične radijacije različitih elemenata koje se nalaze u antikatodi. Prema tome, spektralnom analizom nastalog X-zračenja moguće je odrediti hemijski sastav i najmanjih količina materije koja obrazuje antikatodu. Analiza je kvalitativna. Spektrograf sadrži kristal koji služi za refleksiju. Gajger-Milerovim brojačem ispituje se spektar difraktovanog X-zračenja, čiji intenzitet određuje različite sastojke sa tačnošću reda 1%. Pomeranjem elektronskog snopa mogu se ispitati pojedine tačke uzorka na isti način kao što se ispituje televizijska slika. Dakle, na ekranu katodnog osciloskopa posmatra se slika koja odgovara emitovanju X-zračenja karakterističnog za element koji sadrži bombardovana tačka. Slika se takođe može dobiti modulisanjem elektronskog mlaza promenama apsorbovane struje različitih tačaka uzorka, a ne samo emitovanim X-zračenjem bombardovanih tačaka. Dakle, koristi se osobina bombardovanih elemenata da manje ili više absorbuju struju zavisno od svoje atomske težine. Pojačavač kontrasta omogućuje razlaganje tačaka uzorka koje se razlikuju za samo jedan atomski broj. Elektronska slika, prikazana na slici 194, dobijena pri ispitivanju nekog mineraloškog uzorka, odgovara veličini ispitivanja 200/μ.

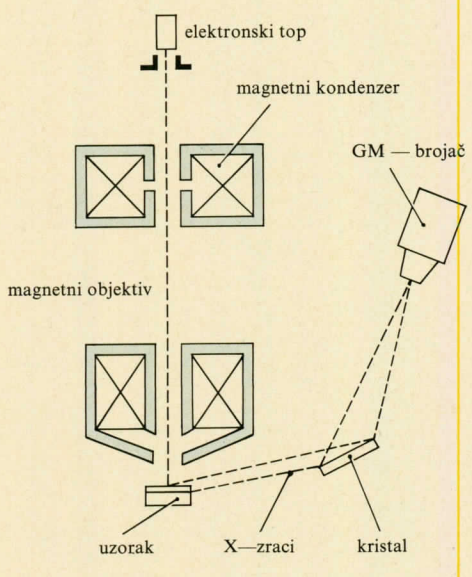
MERENJA U NUKLEARNOJ OBLASTI. Kao što je rekao F. Peren (Francis Perrin), visoki komesar za nuklearnu energiju, u atomistici je sve uslovljeno elektronikom, počevši od otkrivanja ruda do kontrolisanja reaktora i njegovog upravljanja na daljinu. Prema tome, u nuklearnoj oblasti detektori i uređaji za merenje zračenja imaju prvorazredan značaj. Upotrebljeni pretvarači zasnovani su bilo na fenomenu jonizacije, bilo na fenomenu luminiscencije, koju prouzrokuje sudaranje čestica sa atomima gasa ili fluorescentne materije (scintilacioni brojač).

Detektori sa jonizacijom. Postoje različiti tipovi detektora zračenja koji koriste jonizaciju gasa i koji se prema svojoj konstrukciji i nameni mogu podeliti na jonizacione komore i Gajger-Milerove brojače. **Jonizaciona komora.** U ovom detektoru (*sl.* 195) komora, u užem smislu reči, sadrži gas ili neku paru pod malim pritiskom i u nju su postavljene dve elektrode na koje se dovodi napon od nekoliko stotina volti. Čestice, emitovane iz radioaktivnog izvora, u sudaru sa atomima gasa u komori izazivaju njegovu jonizaciju. Pod dejstvom električnog polja u komori uspostavlja se struja koja na krajevima otpornika velike vrednosti R (10^2 MΩ do 10^6 MΩ) stvara pad napona. Ovaj napon se pojačava pomoću elektrometarske cevi, zatim pomoću klasičnog cevnog ili tranzistorskog pojačavača, da bi, najzad, pokrenuo elektronski brojač sa brojnim pokazivanjem vrednosti. Postoje različiti tipovi jonizacionih komora koji su prilagođeni merenom zračenju ili vrsti čestica.

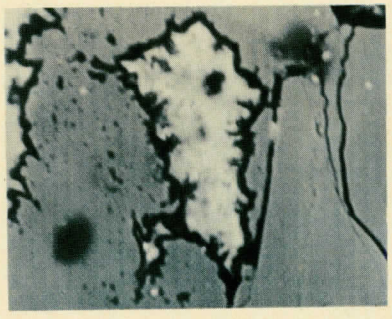


Sl. 196. — Scintilacioni brojač.

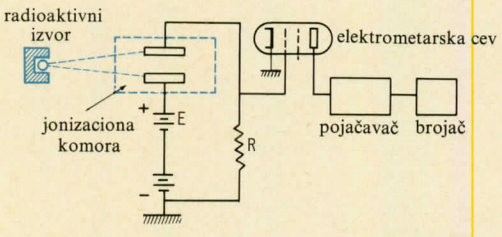
Scintilacioni brojač. Pod scintilacijom se podrazumeva skoro tačkasta svetlost kratkog trajanja (oko 10^{-6} sekunde), koja nastaje pri sudaru čestice velike energije i fluorescentne materije. Upotrebljena fluorescentna materija zavisi od tipa čestica koja se detektuje. Za X-zračenje koristi se cinksulfid aktiviran tragovima bakra ili srebra; za beta-čestice koriste se aromatične materije sa više jezgara (naftalin, antracen), a za gama-zračenje halogene alkalije, kao natrijumjodid aktiviran talijumom. Svaki foton koji proizađe iz ovakvog sudara pobuđuje fotoosetljivu katodu fotomultiplikatora (*sl.* 196)*[1]. Velika prednost scintilacionog brojača u odnosu na jonizacionu komoru je da može ispitati znatno veći broj čestica u jedinici vremena. Osim toga, izlazni impulsi su proporcionalni energiji čestice, što omogućuje energetsku analizu čestica.



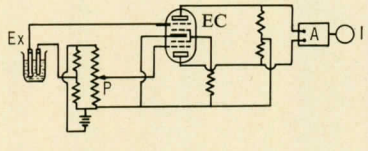
Sl. 193. — Princip rada elektronske mikrosonde.



Sl. 194. — Slika mineraloškog uzorka dobijena pomoću elektronske mikrosonde



Sl. 195. — Princip merenja zračenja pomoću jonizacione komore: E — izvor jednosmernog napona; R — visokoomski otpor.



Sl. 197. — Principska shema pH—metra koji koristi dvostruku elektrometarsku cev: EC — elektrometarska cev; E_X — rastvor čiji se pH meri; P — potenciometar za podešavanje polarizacije neizolovane rešetke; A — pojačavač; I — indikatorski instrument.

MERENJE pH. Elektronika je omogućila pravljenje *p*H-metra velike tačnosti koji daje direktno traženu vrednost *p*H jednostavnim očitavanjem na indikatorskom instrumentu. Ova vrednost će biti dovoljno tačna samo ako se anodna struja cevi menja u celom opsegu galvanometra savršeno linearno sa naponom upravljačke rešetke, na koju se dovodi razlika potencijala elektroda zaronjenih u rastvor. U opštem slučaju, elementi se vezuju u most da bi se eliminisao uticaj slučajne promene napona napajanja. Međutim, upotrebom dve geometrijski slične cevi u mostu ne mogu se kompenzirati uzroci perturbacija koje potiču od samih cevi, a posebno izotermske promene elektronske emisije vlakna. Rešenje se nalazi u upotrebi dvostruke elektronske cevi, u kojoj su elementi identično postavljeni u isti balon i simetrično raspoređeni u odnosu na izvor elektrona, grejno vlakno ili katodu. Ova cev, koja je napravljena sa vrlo visokim vakuumom, pri čemu su preduzete sve mere predostrožnosti u pogledu izolovanja, naziva se *elektrometarskom cevi*.

Na slici 197. prikazan je princip rada elektronskog *p*H-metra koji kao ulazni stepen koristi dvostruku elektrometarsku cev. Iza elektrometarske cevi nalazi se pojačavač jednosmernih struja, koji je, najčešće, tranzistorizovan.

Napredak u pravljenju tranzistora sa efektom polja omogućuje zamenu elektrometarskih cevi ovim tranzistorima. Postoje precizni *p*H-metri, koji omogućuju merenje stotih, čak i hiljaditih jedinica *p*H.

Korišćenjem obične pojačavačke umesto elektrometarske cevi prave se industrijski uređaji sa tačnošću desetih jedinica *p*H, i prenosni modeli, sa sličnom osetljivošću koji rade na baterije (*sl.* 198).

ODREĐIVANJE KOLIČINE JONA U RASTVORU POMOĆU POLAROGRAFIJE. Polarografija je zasnovana na merenju vrlo malih električnih struja koje su prouzrokovane jonizacijom različitih atoma ili molekula pod uticajem porasta razlike potencijala između dve elektrode postavljene u rastvor.

Atomi i molekuli svakog tela koje podleže oksidaciji i redukciji imaju određeni potencijal jonizacije za svaki pojedini rastvor. Jedna od upotrebljenih elektroda ne može se polarizovati, dok je druga obrazovana od žive koja kap po kap ističe iz kapi-



Sl. 198. — Elektronski pH—metar sa direktnim očitavanjem.

Phot. C.S.F., EIL.

larne cevi. Kontra elektromotorna sila svake kapi žive menja se za potencijale elektroredukcije ili elektrooksidacije koje se pri tome proizvode. Ovo ima za posledicu nagli porast jačine struje, koji se grafički zapisuje. Ako napon doveden na elektrode ravnomerno raste, dobijena kriva napon-struja imaće oblik stepenika poređanih prema elementima koji obrazuju rastvor. Ilković je pokazao da je intenzitet struje svakog elementa, što znači dužina stepenika na grafiku, srazmerna koncentraciji elementa (*sl.* 199) Dakle, polarografska analiza je kvalitativna i kvantitativna. Polje njene primene je praktično neograničeno u oblasti organske analize. Zapremina ispitivanog rastvora je manja od jednog kubnog centimetra. Dobar polarograf omogućuje da se otkriju metalne nečistoće u tako malom odnosu kao dva prema sto miliona, što znači da je moguće izvršiti kvantitativnu analizu rastvora, koji sadrži nečistoće u ispitivanoj materiji u odnosu jedan prema milion, sa tačnošću jedan do dva procenta.

MASENI SPEKTROGRAF. Tomson i Aston (Thomson, Aston) 1913. prvi su primenili ovu metodu za određivanje izotopa, koristeći malu razliku masa njihovih atoma. Potom je Aston poboljšao prvobitni uređaj, koji je postao savremeni maseni spektrograf. Ovaj spektrograf je vrlo koristan u oblasti brze kvantitativne analize kompleksne mešavine gasova i u separaciji izotopa gasa. On podjednako omogućava analizu tečnih i čvrstih uzoraka.

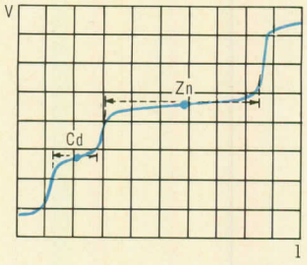
Uređaj je zasnovan na sledećem principu (*sl.* 200): elektronski snop jonizuje atome gasa i saopštava im određenu brzinu. Putanje jona su pravolinijske u električnom polju, ali se savijaju pod uticajem upravnog magnetnog polja. Savijanje je utoliko veće ukoliko je masa jona manja. Neprekidnom promenom jednog od ovih polja moguće je uzastopno prikupiti raznorodne jonizovane molekule koji čine mešavinu gasova. Za sakupljanje jona koristi se elektrometarska cev čija se jonska struja, posle pojačanja, beleži. Kriva predstavlja niz uzanih vrhova sa strmim stranama. Svaki od ovih vrhova označava prisustvo tela određene atomske mase u mešavini. Visina vrha je srazmerna jonskoj struji, dakle, sadržaju elementa ili izotopa koji se ispituje.

Na slici 201. prikazan je spektrogram uzorka ksenona, smeše više izotopa.

Maseni spektrometar omogućuje analizu vrlo malih količina materije, reda miligrama za gas i mikrograma za čvrste materije. Tačnost merenja je reda 0,5%.

ANALIZA POMOĆU RADIOAKTIVNIH IZOTOPA. Razvijene su različite metode analize zasnovane na primeni radioaktivnih izotopa. Ove metode su vrlo osetljive, i često se koriste kad nijedna druga klasična hemijska analiza nije moguća.

Analiza pomoću izotopskog razblaživanja. Ova metoda se sastoji u dodavanju radioaktivnih izotopa, poznate aktivnosti, preparatu koji sadrži element



Sl. 199. — Polarogram rastvora koji sadrži soli kadmijuma i cinka. Elementi kadmijuma i cinka se identifikuju pomoću odgovarajućih napona njihovih pragova na dijagramu. Koncentracija pojedinih elemenata je srazmerna dužini njihovih pragova.

čija se količina meri. Upoređivanjem početne i krajnje aktivnosti rastvora, koja se meri pomoću radioaktivnog detektora, veoma tačno se određuje količina mernog elementa. Na taj način, u izvesnim slučajevima, može da se dobije veća tačnost merenja od one koja je ostvarena spektralnom analizom.

Analiza pomoću apsorpcije zračenja. Ako su izvor gama-zračenja ili neutrona i detektor postavljeni na suprotnim stranama ispitivanog rastvora, apsorpcija čestica je srazmerna gustini ovog rastvora. Na taj način moguće je utvrditi vrlo male promene gustine i, prema tome, odrediti količinu sastojaka rastvora. Međutim, apsorpcija je podjednako funkcija prirode i energije fluksa upadnih čestica. Dakle, moguće je napraviti spektar apsorpcije za posmatrani rastvor u zavisnosti od energije čestica. Krive koje daju spektre apsorpcije neutrona napravljene su, uostalom, za veliki broj materijala.

Analiza pomoću dodavanja izotopa. Ova metoda sastoji se u dodavanju poznate količine radioaktivnih izotopa sistemu u kome je ukupna količina stabilnih izotopa istog elementa određena pomoću hemijske analize. S obzirom da radioaktivni izotopi i stabilni izotopi imaju identične hemijske osobine, dobija se homogena smeša određene specifične aktivnosti (broj dezintegracije po jedinici vremena i težine). Posle podvrgavanja hemijskoj reakciji tako dobijenih preparata, dovoljno je da se uzme alikvotan deo dobijenog jedinjenja i da se iz njega odredi aktivnost da bi se dobila količina elementa koji je reagovao.

Aktivaciona analiza. Kao što svaki element ima sopstveni optički spektar emisije, tako postoji i spektar gama-zračenja koji omogućuje da se on identifikuje. I zaista, neutronskim bombardovanjem neke materije u određenom vremenu, materija postaje radioaktivna i spektar emitovanog gama-zračenja omogućuje da se identifikuje i odredi priroda i relativan odnos hemijskih elemenata koji se nalaze u uzorku. Ova metoda se primenjuje na veliki broj elemenata i ima veliku osetljivost, nekoliko desetina delova po milionu (p. p. m) za gvožđe i kalcijum i 10^{-4} p. p. m. za retke zemlje.

MERENJE NIVOA TEČNOSTI. Uređaj za merenje nivoa tečnosti sadrži kapacitivni pretvarač postavljen u jednu granu kapacitivnog mosta. Promena nivoa tečnosti, odnosno promena kapacitivnosti pretvarača, prouzrokuje neravnotežu mosta.

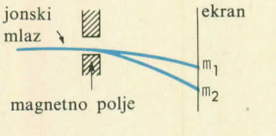
Kapacitivni pretvarač sastoji se od dve elektrode potopljene u merenu tečnost. Ako je tečnost izolator, ona se ponaša kao dielektrik između dve elektrode, i kapacitivnost pretvarača se menja sa nivoom tečnosti. Ako je tečnost provodnik, ona sama predstavlja jednu oblogu kondenzatora u dodiru sa metalnim rezervoarom. Drugu oblogu predstavlja vertikalna metalna elektroda koja je izolovana od tečnosti. Most za merenje je uravnotežen za najmanji nivo tečnosti. Porast nivoa izaziva povećanje kapacitivnosti pretvarača (*sl.* 202). Struja, koja u slučaju neravnoteže nastaje u dijagonali mosta, pojačava se i pokreće merni instrument M. Da bi se povećala osetljivost uređaja, most se napaja strujom učestanosti reda 100 kHz.

Ova metoda merenja nivoa tečnosti ima prednost jer nema nijedan pokretni deo, ni membranu ni električni kontakt, u unutrašnjosti rezervoara. Tačnost merenja je veća nego kod svih ostalih korišćenih principa.

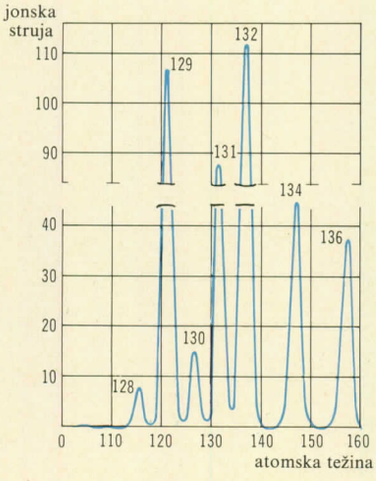
MERENJE PRITISKA. Prave se manometarski pretvarači sa membranom, čija se deformacija meri posredstvom ekstenzometrijskog merača. Isto tako postoje induktivni pretvarači, koji mereni pritisak pretvaraju u promenu dužine procepa elektromagneta, dakle u induktivnost. Ako se takav pretvarač postavi u most za merenje impedanse iza koga se nalazi pojačavač mogu se izvršit vrlo tačna merenja pritiska.

Najzad, postoje i piezoelektrični pretvarači pritiska, u kojima mereni pritisak deformiše pogodno obrađen kristal kvarca ili Rošetovu (Rochette) so. Ovi kristali imaju osobinu da na svojim krajevima stvaraju napon koji je srazmeran primenjenom pritisku. Takvi pretvarači su posebno korisni za merenje i beleženje dinamičkih pritisaka, na primer onih koji nastaju u cilindrima termičkih mašina.

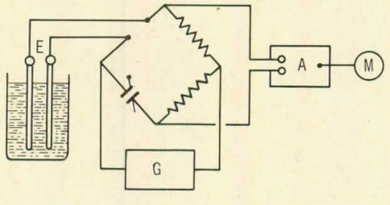
MERENJE PROTOKA. Za elektronsko merenje trenutne vrednosti protoka tečnosti može se upotrebiti pretvarač sa magnetnom indukcijom, koji je sastavljen od cilindričnog tela sa slobodnim rotorom i helikoidalnim lopaticama, čija je brzina rotacije srazmerna brzini proticanja tečnosti. Ovaj rotor sadrži mali magnet, koji u namotaj indukuje periodičan napon, čija je učestanost jednaka brzini okretanja rotora izraženoj u obrtima po sekundi. Namotaj se nalazi van nemagnetnog metalnog tela. Indukovani napon se dovodi elektronskom uređaju (*sl.* 203)



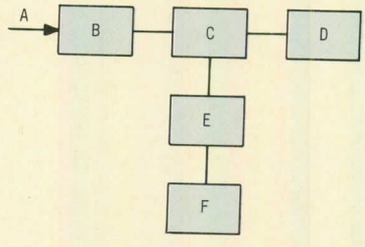
Sl. 200. — Princip masenog spektrometra. Joni mase m_1 su manje skrenuli od jona mase m_2, iz čega se može zaključiti da je masa m_1 veća od mase m_2.



Sl. 201. — Spektar mase uzorka ksenona. Visina vrhova je srazmerna relativnom sadržaju različitih izotopa. Apscise vrhova daju njihovu atomsku težinu.



Sl. 202. — Princip rada kapacitivnog nivomera: E — potopljene elektrode; G — generator učestanosti 100 kHz; A — pojačavač; M — merni instrument.



Sl. 203. — Princip rada elektronskog protokomera: A — indukovani impulsi; B — uobličavač impulsa; C — frekvencmetar; D — indikator protoka; E — aperiodični delitelj; F — indikatorski brojač.

čiji je zadatak da prikaže količinu protoka neposredno u željenim jedinicama (dm^3, dm^3/s, dm^3/h). Druga metoda za merenje protoka sastoji se u postavljanju grejnog tela unutar protočne cevi, koje zagreva tečnost. Temperatura tečnosti zavisi od njenog protoka, te se merenjem temperature može dobiti podatak o protoku. Da bi se izbegao uticaj slučajne promene temperature fluida koristi se diferencijalna metoda (*sl.* 204), što znači da se upoređuju temperature fluida pre i posle prolaska kroz zagrevan deo. U odsustvu protoka fluida oba pretvarača su na istoj temperaturi. Čim tečnost počne da teče pojavljuje se nesimetrija u raspodeli temperature. Nesimetričnost zavisi od toplotnog kapaciteta tečnosti, odnosno od njenog protoka i njene specifične toplote.

Za pretvarače se obično koriste termistori čije brze promene otpornosti u zavisnosti od temperature omogućuju trenutna i tačna merenja protoka.

MERENJE VISKOZITETA. Amplituda vibriranja štapića u tečnosti je utoliko prigušenija ukoliko je viskozitet tečnosti veći. Ma kakav bio viskozitet tečnosti, amplituda vibriranja može da se održi konstantnom podešavanjem snage uložene za održavanje vibracija. Dakle, merenjem utrošene snage za održavanje vibracija može se odrediti traženi viskozitet.

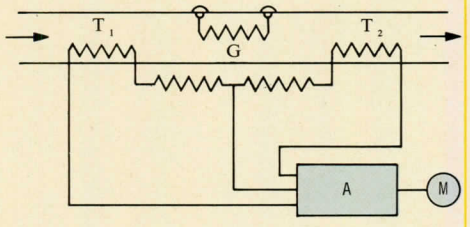
Na ovom principu se prave elektronski merači viskoziteta. Da bi se dobila dovoljna osetljivost potrebno je koristiti visoku učestanost vibriranja, u području ultrazvuka. Elektronski merač viskoziteta sadrži tri osnovna elementa. Sonda (*sl.* 205) je sastavljena od jednog magnetostriktivnog štapića koji se pobuđuje pomoću namotaja postavljenog u telu sonde. Vibriranje štapića je prigušeno pomoću tečnosti u kojoj se nalazi sonda. Elektronsko merenje prigušenja vrši se određivanjem električne snage potrebne da se amplituda vibrirajućeg štapića održi konstantnom. Uređaj (*sl.* 206) sadrži pojačavač naizmeničnog napona, detektorski stepen, pojačavač jednosmernog napona koji napaja generator impulsa i galvanometar koji se nalazi u anodnom kolu ovog generatora. Viskozitet se menja sa temperaturom, zbog čega se u kolo pojačavača automatski uvodi napon za korekciju.

Elektronski merač viskoziteta ima prednost direktnog i neprekidnog očitavanja merene veličine što omogućuje automatsku regulaciju viskoziteta dodavanjem primesa potrebnih za korekciju.

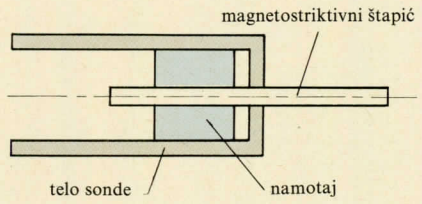
EKSTENZIOMETRIJA. U eri tehnike, merenje unutrašnjih sila u materijalima ima veliki značaj u mehaničkoj konstrukciji (delovi mašina) i u javnim radovima (mostogradnja, građevinarstvo). U stvari, mere se dimenzionalne deformacije materijala koji je podvrgnut dejstvu spoljašnjih sila, a ne same unutrašnje sile. Pod imenom *ekstenziometrija* podrazumeva se skup merenja deformacija predmeta ili različitih materijala. Prednost ekstenziometra sastoji se u brzom, tačnom i neprekidnom merenju. Upotrebom odgovarajućih pretvarača ekstenziometri omogućuju precizna merenja pritiska, temperature itd. u uslovima u kojima bi druge metode bile manje tačne ili neprimenljive.

Merenje mehaničkih naprezanja. Ekstenziometrijski pretvarač najčešće je sastavljen od otpornog davača, napravljenog od vrlo tanke žice od konstantana, i čvrsto priljubljenog na ispitivani komad posredstvom izolujućeg tankog nosača. Kada se predmet podvrgne dejstvu sila, on se deformiše proporcionalno ovoj sili. Kako se dužina i presek otporne žice menjaju, električna otpornost davača se menja proporcionalno sa promenom dužine, sa koeficijentom proporcionalnosti čija vrednost približno iznosi 2. Merenje električne otpornosti davača vrši se pomoću mosta za merenje (*sl.* 207); iza koga se nalazi pojačavač koji omogućuje da se očitaju relativne promene otpornosti reda milionitog dela.

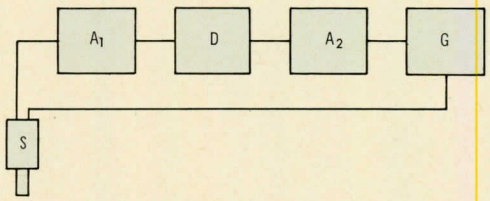
Uređaji za ekstenziometriju omogućuju da se sa tačnošću hiljaditog dela mere sile od nekoliko grama do više stotina tona, zavisno od upotrebljenog pretvarača.



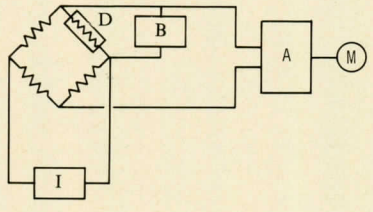
Sl. 204. — Princip rada elektronskog protokomera metodom zagrevanja tečnosti: T_1, T_2 — termistori; G — grejno telo; A — pojačavač; M — merni instrument.



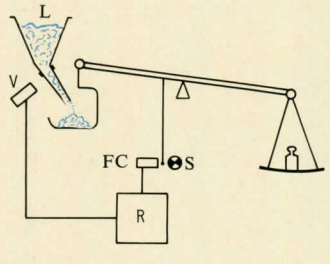
Sl. 205. — Presek sonde sa magnetostriktivnim štapićem.



Sl. 206. — Princip rada ultrazvučnog viskozimetra: S — magnetostriktivna sonda; A_1 — pojačavač naizmeničnog napona; D — detektor; A_2 — pojačavač jednosmernog napona; G — generator impulsa ultrazvučnih učestanosti.



Sl. 207. — Princip merenja otpornosti davača za određivanje deformacije materijala: I — izvor napajanja mosta; D — otporni davač; B — kolo za baždarenje davača; A — pojačavač; M — merni instrument.



Sl. 208. — Princip vage sa elektronskom kontrolom ravnoteže:
FC — fotoelektrična ćelija; S — svetlosni izvor; R — elektronski relej; V — vibrator; L — levak.

Ekstenziometar sa vibrirajućom žicom. Ekstenziometrija pomoću vibrirajuće žice zasnovana je na sledećem principu: vibrirajuća žica je zategnuta između dva oslonca koji su pričvršćeni na ispitivani komad. Učestanost vibriranja žice zavisi od njenog unutrašnjeg naprezanja i rastojanja oslonca. Ako se žica izdužuje, ona se zateže, usled čega se povišava visina tona. Dakle, promena dužine uzorka može se izvesti iz promene učestanosti zvuka.

Merni uređaj sadrži sledeće elemente:

1. ekstenziometre sa vibrirajućom žicom i njihove elektromagnetne uređaje za slušanje i eventualno pobuđivanje vibriranja;

2. »stanicu za slušanje«, koja u istoj kutiji sadrži pojačavač, žicu koja se može podešavati ili komparator, i zvučnu viljušku za baždarenje (etaloniranje).

Preklopnik omogućuje da se čuju odvojeno ili u paru, vibrirajuća žica ekstenziometra, komparator, zvučna viljuška.

Stanica za slušanje omogućuje da se ostvare merenja na daljinu. Otpornost i izolacija kablova veze između ekstenziometra i stanica za slušanje nemaju nikakav uticaj na tačnost merenja pošto se radi samo o prenošenju visine zvuka, čija je učestanost, a ne amplituda, karakteristika merenog istezanja. Žice se pobuđuju pomoću elektromagneta čiji se polovi nalaze naporedo sa žicom. Kratak strujni impuls u namotaju elektromagneta izaziva vibriranje žice, i, obrnuto, vibriranje žice izaziva u elektromagnetu pojavu elektromotorne sile, čija je učestanost jednaka učestanosti vibriranja žice. Obično, dobijena tačnost u očitavanju deformacija iznosi 2,5 do 5 mikrona po metru, zavisno od dužine korišćenih ekstenziometara (140 do 200 mm).

Ekstenziometri sa vibrirajućom žicom posebno su pogodni za ispitivanje betona ili armiranog betona. Oni se prave u obliku zatvorene cevi snabdevene na svojim krajevima alkama za čvrsto povezivanje sa betonom. Vibrirajuća žica zategnuta je unutar cevi između ovih alki. Elektromagnetni uređaj postavljen je u unutrašnjost cevi: hermetički zaptiven izlazni kabl, može se nastaviti pomoću obične telefonske linije, vazdušnog voda ili olovnog kabla.

Nezavisno od ekstenziometrijskih merenja, o kojima je upravo bilo govora, moguće je istim uređajima ostvariti merenje pritiska, temperature ili sile. U tu svrhu se koriste specijalno prilagođeni pretvarači. Na taj način se mogu »pratiti« promene unutrašnje temperature hidrauličnih brana, kao i njihov zamor.

MERENJE TEŽINE. Elektronika poboljšava klasično merenje težine, omogućavajući da se sa većom tačnošću odredi prolaz indikatorske strelice ili jezička kroz ravnotežni položaj. U ovu svrhu se koristi fotoelektrični ili elektromagnetni pretvarač. Nadalje, pomoću elektronike mogu se lako napraviti automatske vage za lako protočne proizvode, kao što je prašak, zrnevlje, zrnaste materije, mali mehanički komadi itd. Elektromehanički vibrator V pokreće levak iz koga ističu mereni proizvodi. Kolo vibratora se prekida čim indikatorski jezičak vage dođe u ravnotežni položaj (*sl.* 208).

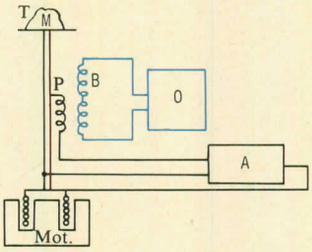
Postupci za merenje istezanja omogućuju da se naprave uređaji za merenje težine koji uvek poseduju dinamometar sa otpornim davačem, merni most sa pojačavačem i indikatorski instrument. Ovi različiti elementi povezani su uobičajenim električnim kablovima, čija dužina može da dostigne desetine metara, što omogućuje merenje težine na daljinu. Još jedna korist aparata ovog tipa je da omogućava lako zapisivanje težine ili prikazivanje rezultata merenja na nekoj udaljenosti od mesta merenja. Uređaj za merenje može jednostavno da se postavi ispod korpe ma kakve dizalice (čekrka, trake za prenošenje), omogućavajući trenutno merenje težine čak u toku tovarenja.

Moguće je napraviti platforme za dinamometarsko merenje težine za velika opterećenja i vrlo malu zapreminu. Jednostavnim povezivanjem prenosnih elektronskih uređaja sa ovom platformom omogućava se brzo i tačno merenje težine.

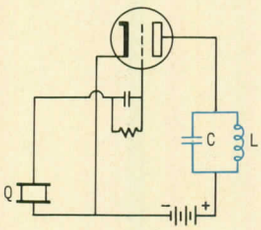
Isti princip merenja težine pomoću merenja istezanja omogućuje određivanje težine pokretnih vozila, npr., kamiona koji se kreće po drumu normalnom brzinom ili vagona po železničkim šinama.

Značajna primena elektronskih dinamometara sa otpornim davačem je merenje težine rezervoara, koševa ili silosa. Dinamometri su u ovom slučaju ugrađeni u noseću konstrukciju rezervoara. Prednosti ovoga postupka su mnogobrojne: količina sadržanog materijala je stalno poznata i ova vrednost može da se prenese na veći broj željenih mesta. S druge strane, sistem je naročito pogodan za neprekidno registrovanje rezultata.

Merenje težine bez tegova. Elektronika omogućuje da se ostvari nova metoda merenja težine po kojoj se merenoj masi ne suprotstavlja označena materijalna masa, već elektromagnetno dejstvo. Dakle, u ovom slučaju, merenje težine se svodi na merenje struje. U opštem slučaju, uređaj za merenje (*sl.* 209) sadrži tas T na kome se nalazi merena masa M. Pod uticajem opterećenja mase M tas teži da se spusti, ali on prima suprotnu silu iz elektrodinamičkog motora Mot., čije pokretne namotaje pobuđuje jednosmerna struja iz pojačavača A. Elektromagnetni pretvarač P, mehanički povezan sa tasom T, pomera se između dva namotaja B, koji su namotani u opoziciji i napajaju se iz oscilatora O. U namotaju pretvarača P ne indukuje se nikakav napon sve dok se on nalazi tačno u sredini između dva namotaja B. Čim tas T počne da se spušta, u pretvaraču P indukuje se napon koji, posle pojačanja u pojačavaču A, stvara jednosmernu struju čija vrednost raste sve do trenutka u kome se nastala suprotna sila tačno ne izjednači sa merenom težinom M. Sistem može da se posmatra kao pozicioni servomehanizam koji se suprotstavlja svakom pomeranju tasa T. Vrednost struje kroz motor Mot. određuje merenu masu M.



Sl. 209. — Princip vage bez tegova: T — tas na koji se stavlja masa M; B — induktorski namotaj; O — oscilator; P — elektromagnetni pretvarač; A — pojačavač; Mot. — elektrodinamički motor.



Sl. 210. — Princip kvarcnog oscilatora: Q — kristal kvarca; LC — oscilatorno kolo podešeno na rezonantnu učestanost kvarca.

MERENJE VREMENA. Tačnost časovnika i hronometara u suštini zavisi od preciznosti sa kojom su napravljeni njihovi sastavni delovi, uglavnom njihovi zupčanici. Pojava elektronskih cevi, a zatim i tranzistora, koji su sposobni da održe oscilacije struje bez pokretnih mehaničkih delova, omogućuje da se ostvare časovnici izvanredne tačnosti.

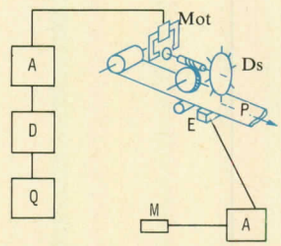
Kvarcni časovnik. Bitan deo kvarcnog časovnika je piezoelektrični kvarc. Zna se da se piezoelektrični efekat pojavljuje kod nekih pogodno obrađenih kristala kao, npr., kvarca, kad se oni podvrgnu izvlačenju ili pritisku. U ovim slučajevima pojavljuje se električno opterećenje na suprotnim stranama kristala. Efekat je reverzibilan: kristal će pod uticajem električnog polja da trpi mehaničke deformacije. Ako je električno polje naizmenično, kristal će vibrirati u istom ritmu. Kristal ima rezonantnu učestanost koja zavisi od njegove debljine. Održavanje mehaničkih oscilacija kvarca može se postići pomoću elektronske cevi (*sl.* 210). Promena potencijala na rešetki cevi izaziva mehaničke oscilacije kvarca. Električne oscilacije pojavljuju se na krajevima oscilatornog kola LC, koje je podešeno na rezonantnu učestanost kvarca. Oscilacije se potom održavaju sprezanjem anoda — rešetka preko njihove međuelektrodne kapacitivnosti.

S obzirom da se rezonantna učestanost kvarca menja sa temperaturom, on se postavlja u sredinu sa konstantnom temperaturom, koja se pomoću termostata održava u granicama desetih, a za izvesne modele i stotih delova Celzijusovog stepena.

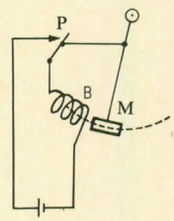
Kako je učestanost oscilatora sa kvarcom vrlo velika, npr., stotine kiloherca, ona se pomoću višestepenog delitelja učestanosti smanjuje na veličinu koja omogućuje praktičnu upotrebu, kao za pokretanje sinhronih motora, stvaranje zvučnih signala ili beleženje na papiru.

Stabilnost kvarcnog časovnika može dostići vrednost 10^{-9} prema trajanju jednog dana ili 0,000 01 sekunde na dan.

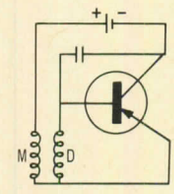
Primena u proizvodnji časovnika. Postoje uprošćeni modeli kvarcnih uređaja koji se u industriji satova koriste za brzu i tačnu kontrolu rada časovnika. Princip ovih aparata (*sl.* 211) je sledeći: kvarcni



Sl. 211. — Princip uređaja za kontrolu rada časovnika:
Q — kvarc učestanosti 76,8 kHz; D — delitelj učestanosti od 76,8 kHz na 100 Hz; A — pojačavač; Mot. — sinhroni motor napajan strujom od 100 Hz; Ds — disk sa šiljcima; E — nepokretna elektroda; P — papirna traka; M — mikrofon.



Sl. 212. — Princip električnog časovnika: M — stalni magnet; B — induktivni namotaj; P — prekidač.



Sl. 213. — Tranzistorski časovnik: M — pokretački namotaj; D — upravljački namotai.

časovnik obezbeđuje stabilnu učestanost oscilacija, koje, posle pojačanja i deljenja učestanosti napajaju sinhroni motor. Ovaj motor pokreće papirnu traku i disk po čijem su obimu raspoređeni šiljci. Papir se kreće između jedne nepomične elektrode i diska čiji šiljci predstavljaju pokretne elektrode. Naizmenični napon, dobijen iz mikrofona koji prima otkucaje časovnika ili pomoću posmatranja kretanja časovnika, pojačava se i izaziva pražnjenje visokog napona između šiljaka na disku i nepokretne elektrode. Na svako »tik« ili »tak« časovnika pražnjenje stvara varnicu koja buši i spaljuje papir stvarajući jasne određene otvore. Niz ovih otvora stvara liniju na papirnoj traci čiji položaj omogućuje da se mere razlike dva kretanja. Sa druge strane, sve nepravilnosti u radu časovnika prouzrokuju deformaciju u pisanju linije, a ispitivanje uzastopnih odstupanja ovih linija omogućava da se otkriju uzroci (oštećenost oslonca ankera ili balansera, greške u zupčanicima itd.) neispravnog rada časovnika. Tačnost takvog aparata je reda desetog dela sekunde na dan.

Atomski časovnik. Savremena nauka zahteva krajnje stabilne izvore učestanosti da bi rešila, na primer, problem kosmičke navigacije. Za potrebe koje se odnose na relativno kratke vremenske intervale problem se rešava pomoću elektronskog kvarcno stabilisanog oscilatora, koji bez sumnje, usled starenja kvarca, može i sam pogrešiti u radu. Stoga se razmišljalo da se kvarcu nametne stabilna učestanost atomskog prelaza. Ova učestanost ima prednosti da zavisi samo od karakteristika molekularnog sistema, dakle da je strogo nepromenljiva. Tako se ostvaruju časovnici koji su zajedničkim imenom nazvani »atomski časovnici«. Korišćeni su različiti prelazi kao: amonijak, para cezijuma, para rubidijuma.

Jedna od najnovijih realizacija koristi rezonancu atoma rubidijuma za stabilisanje učestanosti kvarca. Atom rubidijuma 87 poseduje tri energetska nivoa. Prelaz između nivoa 1 i 2 odgovara učestanosti od 6 800 MHz. Prelaz između nivoa 1 i 3 odgovara vidljivoj učestanosti (talasne dužine 8000 Å). Princip rada je sledeći. Kvarcni generator osciluje na učestanosti reda 5 MHz i za njega se nalazi lanac umnožavanja učestanosti do 6 800 MHz, koji je frekventno modulisan tako da izazove rezonantni prelaz 1—2. Ovim se prouzrokuje amplitudna modulacija vidljive učestanosti od 8000 Å prelaza 1—3. Ova modulacija se detektuje pomoću fotoelektrične ćelije. Fazna razlika između dovedene modulacije i uspostavljene modulacije je nula u centru rezonantne krive. Ona obrazuje signal greške koji upravlja direktno kvarcnom učestanošću.

Atomski časovnik sa parom rubidijuma predstavlja izvanredno stabilan etalon učestanosti, čija je kratkovremena stabilnost bolja od $2{,}5.10^{-11}$ po godini i dugovremena stabilnost bolja od 10^{-10} po godini. On je već omogućio da se otkriju lake anomalije u rotacionom kretanju Zemlje, koje je do tada smatrano strogo konstantnim, tako da je trajanje jedne rotacije Zemlje definisalo astronomsko vreme.

Tranzistorski časovnik. Elektronika omogućuje značajno poboljšanje električnih časovnika sa klatnom (*sl.* 212), čije se oscilacije podržavaju električnim putem. U ovu svrhu, klatno je snabdeveno magnetom koji pri kraju svoje putanje ulazi u namotaj koji mu dodaje energiju za održavanje oscilacija. Na svom putu klatno upravlja prekidačem koji u pravom trenutku zatvara kolo baterije za napajanje namotaja. Ovi električni časovnici predstavljaju prednost pošto ne zahtevaju navijanje, rade nezavisno od električne mreže i dovoljno su tačni. Njihova slaba tačka odnosi se na kontakt koji se otvara i zatvara više od šezdeset miliona puta godišnje, a radi samo pod malim pritiskom.

Tranzistorski časovnik je zasnovan na istom principu, ali je kontakt zamenjen tranzistorskim prekidačem koji održava oscilacije struje u namotaju. Kolo tranzistora (*sl.* 213) sadrži kalem M, namotaj motora u koji ulazi magnet i upravljački namotaj D koji je koncentričan sa M. Prirodno, kad je napon na bazi tranzistora nula, tranzistor je zakočen i kolektorska struja je zanemarljiva. Da bi sat počeo da radi, potrebno je pokrenuti klatno. Kad magnet prodre u namotaje, on u namotaju D indukuje strujni impuls, usled čega baza tranzistora postaje negativna i kroz tranzistor počinje da teče struja. Kolektorska struja protiče kroz namotaj M koji privlači magnet. Struja baterije prolazi kroz namotaj M samo u kratkom delu periode oscilacije klatna. Srednja struja je reda 0,12 mA, što obezbeđuje vrlo dug vek baterije.

MERENJE U OBLASTI AKUSTIKE. Prirodno da je akustika imala velike koristi od stvaranja elektronskih uređaja: kao pojačavača, uređaja za registrovanje i generisanje zvuka. Štaviše, napravljeni su i posebni aparati za merenje učestanosti, nivoa zvuka i za analizu akustičnog spektra.

Frekvencmetri. Merenje učestanosti upoređivanjem sa učestanošću generatora-etalona posebno je lako pomoću oscilografa. Međutim, direktno merenje, koje daje trenutnu i tačnu vrednost često je poželjnije, pošto dozvoljava da se prate promene merene učestanosti. Ovi aparati sa direktnim očitavanjem zasnovani su na sledećem principu: proučavana pojava pretvara se u električni napon pomoću odgovarajućeg pretvarača: merenje učestanosti sastoji se u brojanju naponskih impulsa pretvarača u datom vremenu: količnik broja impulsa i vremena predstavlja učestanost. Takav frekvencmetar (*sl.* 214) sadrži, dakle, vremensku bazu, brojač i pojačavač, koji prima ulazne impulse i dostavlja ih brojaču samo u trajanju koje je određeno vremenskom bazom. Vremenska baza sadrži kvarcni oscilator iza koga se nalazi serija delitelja učestanosti, npr., kvarcni oscilator radi na učestanosti 4 096 Hz, koja se pomoću 12 delitelja učestanosti sukcesivno deli sa 2. Na ovaj način se dobija učestanost od jednog herca sa tačnošću reda 1/20 000.

Vremenske baze na sličnom principu, ali sa kvarcom mnogo veće učestanosti i pri strogo konstantnom održavanju temperature okoline, omogućuju da se dobije preciznost reda 5. 10^{-6}. Učestanosti izlaznih impulsa iz decimalnih delitelja raspoređene su između 10 kHz i 1 Hz.

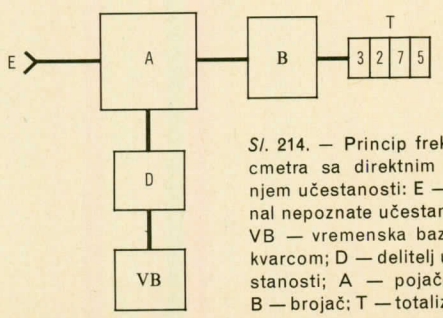
Elektronski brojač prikazuje dobijene rezultate merenja učestanosti bilo u binarnom bilo u decimalnom vidu, što je obično pogodnije pošto ne zahteva naknadno pretvaranje.

Nepermetar. Ovi aparati su namenjeni za merenje slabljenja ili pojačanja elektroakustičnih kola u zavisnosti od učestanosti. Oni sadrže baždarenu liniju za slabljenje i milivoltmetar sa pojačavačem sa promenljivim pojačanjem.

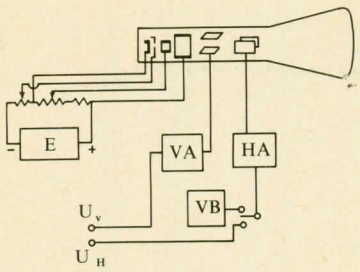
Fonometar sa registratorom. Ovaj tip aparata omogućava da se snime elektroakustični nivoi na izlazu iz nekog zvučnog uređaja. Zvučni nivoi su najčešće izraženi u logaritamskom obliku (u decibelima ili neperima). Uređaj sadrži logaritamski pojačavač koji koristi pojačavačke cevi čija karakteristika rešetke ima eksponencijalan oblik.

Panoramski analizator. Ovaj aparat, koji dugujemo R. Ašanu (R. Aschen), omogućuje da se na ekranu katodnog osciloskopa dobije kompleksan spektar niske učestanosti. On koristi frekventno modulisani oscilator. Signal na izlazu oscilatora meša se sa kompleksnim signalom, i posle pojačanja i detekcije, učestanost izbijanja vodi se na ploče za vertikalno skretanje katodne cevi. Vremenska baza katodne cevi upravlja reaktivnom cevi, čime obezbeđuje frekventnu modulaciju oscilatora. Pored toga, predviđena je sinhronizacija između horizontalnog pomeranja svetle tačke i promene učestanosti oscilatora.

KATODNI OSCILOSKOP. Katodni osciloskop omogućuje posmatranje krive koja predstavlja neku periodičnu električnu pojavu. Ova kriva može biti snimljena fotografskim ili kinematografskim aparatom, čime osciloskop postaje oscilograf. Osim jednostavnog i čistog posmatranja osciloskop omogućuje da se izvrše mnogobrojna kvantitativna merenja (amplituda, učestanost, trajanje, oblik itd.). Zahvaljujući pogodnim pretvaračima, osciloskop predstavlja univerzalni uređaj za ispitivanje, kontrolu i merenje, koji se koristi u svim oblastima industrije i nauke.

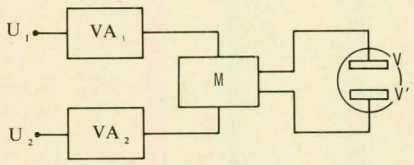


Sl. 214. — Princip frekvencmetra sa direktnim čitanjem učestanosti: E — signal nepoznate učestanosti; VB — vremenska baza sa kvarcom; D — delitelj učestanosti; A — pojačavač; B — brojač; T — totalizator.



Sl. 216. — Princip rada osciloskopa sa elektronskim prekidačem; U_1 i U_2 — ulazi dva vertikalna pojačavača; VA_1 i VA_2 — vertikalni pojačavači; M — multivibrator; V i V' — ploče za vertikalno skretanje.

Sl. 215. — Princip rada osciloskopa: E — izvor visokog napona; U_V — ulaz vertikalnog pojačavača; U_H — ulaz horizontalnog pojačavača; VA — vertikalni pojačavač; HA — horizontalni pojačavač; VB — vremenska baza.



Osciloskop (*sl.* 215) sadrži sledeće elemente;

— katodnu cev i organe za podešavanje intenziteta i koncentracije snopa;

— uređaj nazvan »vremenska baza«, koji daje signal u vidu »zubaca testere«, čime obezbeđuje horizontalno skretanje elektronskog mlaza;

—»horizontalni pojačavač«, koji omogućuje okidnim signalima da imaju dovoljnu amplitudu da bi oscilogram imao pogodnu širinu;

— »vertikalni pojačavač«, koji omogućuje pojačanje ulaznih signala do željene veličine pogodne za proučavanje talasnih oblika posmatranog signala na ekranu osciloskopa;

— sistem napajanja koji obezbeđuje napone grejanja elektronskih cevi, anodni napon i visoki napon reda 1 500 do 2 000 V koji je potreban za rad katodne cevi.

Vremenska baza. Vremenska baza sadrži preklopnik, obično graduisan u vremenu, kojim se bira trajanje baze, što omogućuje merenje pojava različitog trajanja. Tačnije podešavanje vremena prebrisavanja omogućuje se drugim dugmetom. Posebno kolo služi za sinhronizaciju vremenske baze sa posmatranom pojavom ili sa učestanošću mreže. Osim toga, nezavisnim preklopnikom isključuje se vremenska baza i obezbeđuje horizontalno skretanje pomoću spoljašnjeg periodičnog napona, na primer, radi merenja učestanosti metodom Lisažuovih (Lissajous) figura.

Vertikalni pojačavač. Potreban napon ulaznog ili posmatranog signala, u zavisnosti od osciloskopa, iznosi od 1 mV do 1 V, dok ploče za skretanje, zavisno od karakteristika katodne cevi, zahtevaju napon reda veličine 100 do 150 V. Dakle, vertikalni pojačavač mora da ima mogućnost promene pojačanja od 100 do 1,5.10^5. Oslabljivač bez izobličenja smanjuje signale čija je amplituda suviše velika. Pojačavač mora da ima linearno pojačanje u širokom opsegu učestanosti da bi se izbeglo izobličenje posmatranih signala.

Pravljenje osciloskopa namenjenih ispitivanju impulsa visoke učestanosti predstavlja ozbiljan problem. Za najviše učestanosti (više gigaherca) koriste se stroboskopske metode koje omogućuju da se tok periodične pojave uspostavi iz velikog broja uzastopnih perioda pomoću unapred određenih uzanih delova krive.

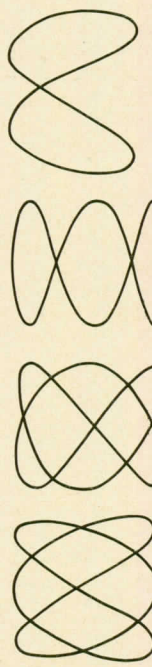
Izvesni osciloskopi omogućuju jednovremeno ispitivanje više periodičnih pojava ili odnos harmonika neke učestanosti, zahvaljujući elektronskom prekidaču, čiji je princip, za slučaj ispitivanja dve pojave iste učestanosti prikazan na *sl.* 216. Ulazni signali dovedeni na U_1 i U_2 pojačavaju se pomoću pojačavača VA_1 i VA_2. Multivibrator M proizvodi pravougaoni signal koji se u protivfazi dovodi na jednu od elektroda, obično na zaštitnu rešetku cevi pojačavača VA_1 i VA_2. Pravougani signal naizmenično blokira svaki od pojačavača, ali posmatrač jednovremeno vidi dve krive koje izgledaju isprekidano. Učestanost multivibratora mora da bude dovoljno visoka da bi se izbeglo neugodno treperenje slike. Korišćenjem više multivibratora moguće je jednovremeno ispitivati do pet pojava.

U posebnom slučaju posmatranja dve pojave često se koristi katodna cev sa dva mlaza, koja sadrži dva elektronska topa i dva sistema za vertikalno skretanje, ali samo jedan sistem za horizontalno skretanje.

Tumačenje Lisažuovih figura. Na *sl.* 217. prikazano je nekoliko karakterističnih oblika dobijenih pomoću osciloskopa za vreme ispitivanja različitih pojava. Slike od 217*a* do 217*g* nazivaju se *Lisažuove figure*, po imenu francuskog fizičara Lisažua (Lissajous), koji je 1873. pokazao da pravougaono slaganje dve sinusoide daje zatvorenu krivu koja je upisana u pravougaonik. Ove figure omogućuju da se odredi nepoznata učestanost ili da se izbaždari generator promenljive učestanosti.

Da bi se dobila Lisažuova figura, napon nepoznate učestanosti f_v dovodi se na ulaz za vertikalno skretanje. Poznata učestanost baždarenja f_h dovodi se na ploče za horizontalno skretanje, čime se obezbeđuje horizontalno kretanje mlaza, pošto se vremenska baza isključuje iz rada. Ako je odnos dovedenih učestanosti ceo broj ili razlomak, dobija se nepokretna figura. Horizontalne i vertikalne tangente pojedinih petlji Lisažuovih figura poklapaju se sa stranama pravougaonika u koji su upisane.

Sl. 217. — Primeri likova dobijenih na ekranu osciloskopa pri ispitivanju različitih pojava.



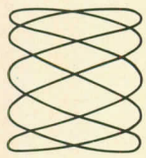
a. Učestanost f_v signala dovedenog na ploče za vertikalno skretanje jednaka je polovini učestanosti f_h signala dovedenog na ploče za horizontalno skretanje.

b. Učestanost f_v signala dovedenog na ploče za vertikalno skretanje jednaka je trostrukoj učestanosti f_h signala dovedenog na ploče za horizontalno skretanje.

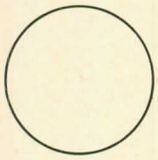
c. Odnos učestanosti f_v i f_h iznosi 3/2.

d. Odnos učestanosti f_v i f_h iznosi 2/3.

→



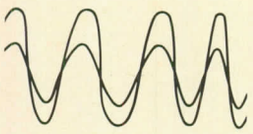
đ. Odnos učestanosti f_v i f_h iznosi 2/5.



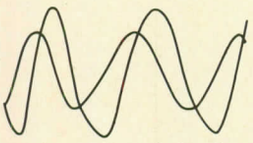
f. Naponi iste učestanosti fazno pomereni za $\pi/2$.



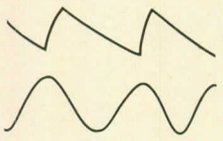
g. Naponi iste učestanosti fazno pomereni za ugao između O i $\pi/2$.



h. Dva sinusoidalna napona u fazi.



i. Dva fazno pomerena napona iste učestanosti.



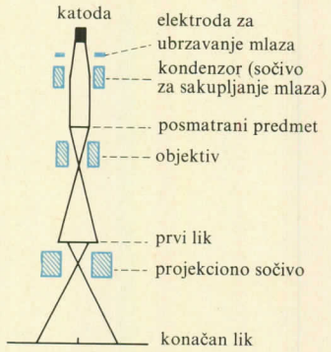
j. Gore, napon na krajevima kondenzatora filtra. Dole, naizmenični napon napajanja ispravljača.

Ako je n_h broj dodirnih tačaka krive i horizontalne strane pravougaonika, a n_v broj dodirnih tačaka krive i vertikalne strane, tada je nepoznata učestanost f_v signala dovedenog na ploče za vertikalno skretanje data izrazom:

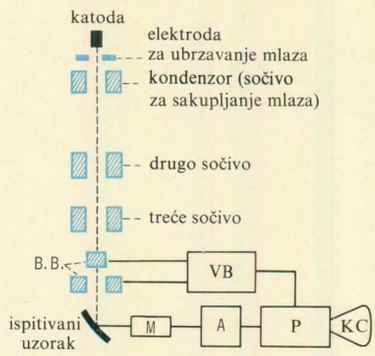
$$f_v = \frac{n_h}{n_v}.$$

Pomoću osciloskopa sa dva mlaza moguće je upoređivati dve pojave koje se jednovremeno dešavaju. Slika 217*h* pokazuje dva signala iste učestanosti i iste faze. Slika 217*i* pokazuje dva signala iste učestanosti, pri čemu signal sa većom amplitudom kasni u odnosu na drugi signal. Na slici 217*j* gornja kriva predstavlja napon na krajevima kondenzatora za filtriranje ispravljenog napona, a donja predstavlja naizmenični napon napajanja ispravljača.

ELEKTRONSKI MIKROSKOP. Klasični optički mikroskopi omogućavaju povećanje u oblasti vidljivog spektra samo do 2 000 puta i u ultravioletnom spektru do 3 000 puta. Teorijski, povećanjem veličine optičkog mikroskopa moglo bi se povećati njegovo uveličavanje, ali moć razlaganja mikroskopa ograničava ovu teorijsku mogućnost. Moć razlaganja optičkog mikroskopa srazmerna je talasnoj dužini upotrebljene svetlosti, pa je razumljiva upotreba ultravioletne svetlosti, koja, mada nevidljiva, ipak utiče na fotografsku ploču. Teorija talasne mehanike



Sl. 218. Princip rada elektronskog mikroskopa sa prozračivanjem.



Sl. 219. — Princip rada elektronskog mikroskopa sa sekundarnim elektronima: BB — namotaji za skretanje mlaza; M — elektronski multiplikator; A — pojačavač; P — prijemnik lika; VB — vremenska baza za skretanje mlaza; KC — katodna cev.

pokazuje da je naelektrisana čestica u kretanju *povezana* sa talasnom dužinom De Broljijevom (Louis de Broglie) formulom:

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

gde je: h Plankova konstanta, m masa čestice i v njena brzina.

Lako je podstaknuti elektron da se kreće krajnje velikom brzinom, pri čemu mu je odgovarajuća talasna dužina vrlo mala, znatno manja od angstrema. Za elektronski izvor od 50 kV odgovarajuća talasna dužina iznosi 0,055 Å, što je oko 100 000 puta manje od talasne dužine vidljive svetlosti. Iz ovoga se lako sagledava granica uvećanja koja se može postići elektronskim mikroskopom.

Sočiva elektronskog mikroskopa mogu da budu elektrostatičkog tipa ili, opštije, elektromagnetnog tipa. Na žalost, usled sferne aberacije, moć razlaganja ovih sočiva je ograničena na 0,0002 mikrona, što predstavlja nedostatak koji se može poreditи sa najozbiljnijim nedostacima optičkih sočiva.

Pri pravljenju elektronskih mikroskopa koristi se više principa. Međutim, mikroskop sa prozračivanjem je najrasprostranjeniji pošto nesumnjivo daje najbolje rezultate. Pri korišćenju uređaja ovog tipa ispitivanje se obavlja pomoću prozračivanja, što zahteva da ispitivani uzorci budu veoma tanki, da bi elektroni, koji imaju malu moć prodiranja kroz materiju, mogli proći kroz njih. Zaista, ispitivana materija mora da bude u vidu opne čija maksimalna debljina iznosi nekoliko stotina angstrema.

Da se ostvare tako tanki listići, koriste se dve metode:

- mehanička obrada metalnih delova dok se ne dobiju uzorci debljine od nekoliko stotih do nekoliko desetih delova milimetra, koji se dalje mogu stanjivati postupkom elektrolitičkog poliranja, koje ponekad prati i jonsko bombardovanje;
- naparavanje u vakuumu, na rastvorljiv nosač, metalnog nanosa ili posmatrane legure.

Mikroskop sa prozračivanjem *(sl.* 218) sadrži sledeće elemente:

— elektronski top (indirektno grejana katoda i ubrzanje elektrona anodnim naponom od 50 do 100 kV);

— kondenzor (elektromagnetno sočivo sa velikom žižnom daljinom);

— objektiv (elektromagnetno sočivo sa malom žižnom daljinom), koji daje prvu sliku; ova slika je najčešće vidljiva kroz neki bočni prozor;

— nosač predmeta, koji se nalazi u blizini objektiva i može se sa predmetom bočno pomerati pomoću mikrometarskog mehanizma;

— fluorescentni zastor na kome se pojavljuje lik ili fotografski film;

— sistem napajanja visokog napona (ispravljačke cevi ili silicijumske diode), iza koga se nalazi sistem za regulisanje napona stabilnosti reda 10^{-4};

— sistem za vakuum (primarni vakuum i pumpe sa uljem ili živom).

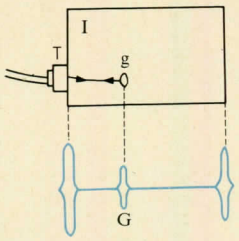
Dobar mikroskop sa prozračivanjem ima moć razlaganja bolju od 25 Å, a maksimalno uveličavanje dostiže do 250 000. U početku namenjen potrebama naučnog istraživanja, elektronski mikroskop danas nalazi mnogobrojne primene u industrijskom istraživanju, a posebno u metalografiji.

Elektronski mikroskop sa hiperakceleracijom. Elektronski mikroskop, usled svoje veće moći razlaganja, zamenio je klasičan mikroskop u mnogim oblastima. Međutim, i on ima jedan veliki nedostatak, koji se odnosi na princip njegovog rada. Pošto elektroni u vazduhu imaju krajnje malu putanju, to se radi povećanja njihovog dometa u telu mikroskopa ostvaruje visok vakuum u kome se nalaze posmatrani uzorci. U ovim uslovima ispitivanja biološki preparati ne mogu da žive i oni bi se rasprsli. Prema tome, ovim mikroskopom se ne mogu ispitivati žive ćelije i mikrobi. Osim toga, s obzirom na malu moć prodiranja elektrona kroz materiju, potrebno je ispitivane ćelije seći u tanke listiće, debljine reda desetog dela mikrona.

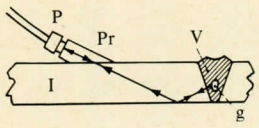
Pod rukovodstvom profesora G. Dipuja (Gaston Dupouy), u Laboratoriji za elektronsku optiku Naučnoistraživačkog centra u Tuluzi, napravljen je elektronski mikroskop koji otklanja ove nedostatke primenom hiperakceleracije. U ovom mikroskopu, napon za ubrzanje elektrona dostiže vrednost od nekoliko desetina hiljada volta do 1 500 000 V, pri čemu je faktor stabilnosti ovog napona oko 2.10^{-6}. Pri ovim uslovima, moć prodiranja elektrona postaje takva da mogu proći kroz cele ćelije. Osim toga, moguće je staviti preparat u hermetički zatvorenu kutiju u kojoj se ćelije i mikrobi nalaze pod normalnim pritiskom. Na taj način se mogu ispitivati živi uzorci.

Elektronski mikroskop sa sekundarnim elektronima. Elektronski mikroskopi, i klasični kao i profesora Dipuja sa hiperubrzanim elektronima, pripadaju tipu koji se naziva mikroskop »sa prozračivanjem«, što znači, da kontrasti dobijenog lika proističu iz razlike elektronskog fluksa u različitim tačkama posmatranog predmeta. U toku svog prolaska kroz ispitivanu materiju elektroni se pokoravaju složenim zakonima prostiranja, usled čega će biti delom apsorbovani, a delom rasuti. Ovo ima za posledicu stvaranje svetlosnog kruga oko lika pojedinih tačaka, čime se smanjuje kontrast slike, a stoga i moć razlaganja mikroskopa.

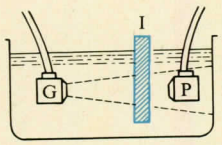
Napravljen je novi tip mikroskopa *(sl.* 219) koji hvata sekundarne elektrone emitovane od uzorka,



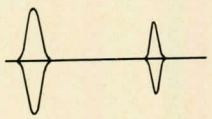
Sl. 220. — Ispitivanje materije pomoću ultrazvuka, metod odjeka: I — ispitivani uzorak; P — pretvarač; g — greška u proizvodnji; G — signal na ekranu osciloskopa koji odgovara grešci.



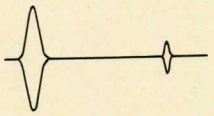
Sl. 221. Ispitivanje vara: I — ispitivani uzorak; P — pretvarač; Pr — prizma; V — var; g — greška u zavarivanju.



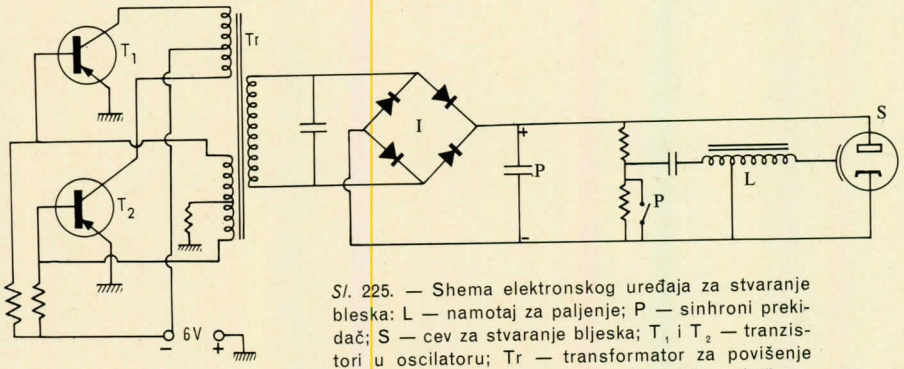
Sl. 222. — Ispitivanje uzorka pomoću ultrazvuka, metod prozračivanja: I — ispitivani uzorak; G — generator davač; P — prijemnik.



Sl. 223. — Signal na ekranu osciloskopa u slučaju ispravnog uzorka.



Sl. 224. — Signal na ekranu osciloskopa u slučaju neispravnog uzorka.



Sl. 225. — Shema elektronskog uređaja za stvaranje bleska: L — namotaj za paljenje; P — sinhroni prekidač; S — cev za stvaranje bljeska; T_1 i T_2 — tranzistori u oscilatoru; Tr — transformator za povišenje napona; C — kondenzator; I — diodni ispravljač.

pa ih, posle pojačanja, koristi za pravljenje lika na zastoru katodne cevi, umesto da koristi elektronski snop koji prolazi kroz posmatrani uzorak. Sekundarni elektroni, emitovani od različitih tačaka tela, prostiru se u svim pravcima na donekle »anarhičan« način. Za jasan lik potrebno je da se u svakom trenutku primaju elektroni emitovani samo iz jedne tačke posmatranog uzorka, a da se izlaznim signalom iz pojačavača osvetle odgovarajuće tačke zastora katodne cevi. Zbog toga se primarnim snopom prelazi cela površina uzorka, pri čemu se snop sinhrono pomera sa mlazom katodne cevi koji proizvodi lik. Ukratko, ovde je upotrebljena tehnika stvaranja slika pomoću uzastopnih linija, koja se koristi u televiziji.

Potrebno je koristiti krajnje precizan snop primarnih elektrona, što se može ostvariti samo pomoću elektronskih sočiva vrlo velike tačnosti. Usled pomerenja primarnog snopa, svakog trenutka će se iz raznih tačaka uzorka emitovati sekundarni elektroni koji se usmeravaju prema elektronskom multiplikatoru. Izlazna struja multiplikatora napaja klasičan pojačavač koji moduliše mlaz katodne cevi, čime se stvara lik. Dva uska elektronska snopa, od kojih jedan ispituje predmet, a drugi ekran prijemnika, moraju biti savršeno sinhronizovani, što se ostvaruje upotrebom samo jedne vremenske baze (linija i lika) koja obezbeđuje skretanje oba snopa. Mikroskopi sa sekundarnim elektronima imaju velike prednosti jer ne zahtevaju sečenje objekta u tanke trake i daju lik predmeta, a ne njegovu senku, koja manje ili više zavisi od prirode posmatranog uzorka.

ISPITIVANJE MATERIJALA POMOĆU ULTRAZVUKA. Ispitivanje materijala bez razaranja ima veliki značaj u našoj epohi. Ono omogućuje da se pre upotrebe odbace neispravni metalni delovi i da se kontroliše ispravnost metalnih ili nemetalnih, livenih ili žarenih delova, čime se smanjuje opasnost od mehaničkih nezgoda, a ujedno postiže i ušteda u proizvodnji. Ovo ispitivanje, ostvareno pomoću ultrazvuka, sastoji se u odašiljanju zvučnih talasa u ispitivanu materiju, koji se kroz nju prostiru i odbijaju se sa njene druge strane ili od greške pri proizvodnji, ukoliko ona postoji. Ovo je *metoda odjeka.* Takođe je moguće posmatrati ispravnost prostiranja ovih talasa kroz materijal, i taj postupak je nazvan *metoda prozračivanja* (v. poglavlje metalurgije).

Metod odjeka. Aparat za ispitivanje materijala pomoću ultrazvuka *(sl.* 220) koji koristi metodu odjeka, sadrži generator impulsa čija se učestanost može podešavati od 100 do 1 000 Hz. Ovi impulsi izazivaju emitovanje strujnih signala ultrazvučne učestanosti, koja se može podešavati od 0,5 do 10 MHz, zavisno od potreba korisnika. Struja iz predajnika vodi se u pretvarač koji sadrži pločicu od piezoelektrične keramike, obično od barijum-titanata. Pretvarači emituju više stotina puta u sekundi povorke ultrazvučnih oscilacija, koje traju nekoliko mikrosekundi i koje se prostiru kroz posmatrani materijal. Svetla tačka prelazi ekran osciloskopa konstantnom brzinom. Svaki emitovani impuls prouzrokuje horizontalno kretanje elektronskog mlaza osciloskopa i na njegovom ekranu stvara referentni signal. Između emitovanih impulsa, pretvarač, koji radi kao prijemnik, »hvata« signal odbijen od suprotne strane merenog komada ili od eventualne greške u proizvodnji. Eho koji iz ovoga proizlazi, beleži se na osciloskopu, isto kao što je u početku zabeležen upadni signal. Relativno odstojanje koje razdvaja različite signale na ekranu osciloskopa omogućuje da se sazna položaj greške u unutrašnjosti merenog uzorka.

Moguće je i pod uglom kontrolisati varenje gvozdenih ploča, pri čemu se ultrazvučni talasi prelamaju i odbijaju od vara u ispitivanom uzorku. U ovim slučajevima koristi se pretvarač sa prizmom *(sl.* 221), koja obezbeđuje da upadni ugao ultrazvučnog snopa iznosi 35° do 60°. Ovaj snop se odbija od suprotne strane gvozdene ploče. U slučaju da se var nalazi u teško pristupačnoj oblasti, za njegovo ispitivanje se može koristiti višestruko odbijanje ultrazvučnih talasa od obe strane ploče, koje služe kao reflektori. Položaj greške određuje se iz rastojanja između ispitivača i mesta varenja, vodeći računa o debljini ploče, o upadnom uglu i broju odbijanja snopa.

Metod prozračivanja. U ovoj metodi posmatra se intenzitet ultrazvučnih talasa koji su prošli kroz mereni predmet i primljeni pomoću prijemnika *(sl.* 222). U slučaju uzorka male debljine (npr., crni lim) ili komada složenog oblika, sa nedovoljno pristupačnim zidovima ispitivanje se obavlja u tečnosti, obično u vodi. Energija sa izlazne strane merenog uzorka, u pravcu između predajnika i moguće greške, biće manja od energije koja prolazi kroz homogenu oblast. Na slici 223. prikazana je dobijena slika na osciloskopu kad ultrazvučni talas prolazi kroz neoštećenu oblast, a na slici 224. slučaj kad talas prolazi kroz grešku u proizvodu npr., kroz šupljinu. Pomeranjem prijemnika lako se određuje položaj i poprečna veličina greške.

Automatska kontrola pomoću ultrazvuka. Služeći se metodom odjeka i metodom prozračivanja, napravljeni su automatski uređaji za kontinualnu automatsku regulaciju cevi i šipki. Druge metode omogućuju posmatranje grešaka u proizvodnji snimanjem preseka komada iz više uglova, služeći se tehnikom koja je slična tehnici rentgenskog snimanja.

Kontrola merenjem debljine. Izvesna industrijska ispitivanja svode se na merenje debljine. To je slučaj provere metalnih komada izloženih koroziji (rezervoari, metalne cevi, školjke brodova itd.). Neposredno merenje debljine je nemoguće pošto je pristupačna samo jedna strana merenog komada. Ovde se koristi posebna metoda merenja debljine *stvaranjem lokalne rezonance* pomoću ultrazvuka. Metoda se sastoji u emitovanju ultrazvučnih frekventno modulisanih talasa u ispitivani komad. Ovi talasi se odbijaju sa unutrašnje strane komada, čime se stvaraju stojeći talasi. Uvek kad je učestanost oscilacija jednaka rezonantnoj učestanosti komada, on počinje da vibrira i da apsorbuje energiju, što prouzrokuje naglu promenu napona na krajevima oscilatora. Pošto je pretvarač povezan sa komadom, na ekranu osciloskopa pojavljuje se jedna ili više vertikalnih crta koje određuju rezonantnu učestanost komada, a time i njegovu debljinu, ako je uređaj baždaren uzorkom poznate debljine. Metoda omogućuje merenje debljine metalnih materijala od 1 do 120 mm.

ELEKTRONSKI FLEŠ. Fotografisanje trenutnih prizora pri svakom vremenu u zatvorenom ili slobodnom prostoru zahteva dobro određene uslove osvetljenja. Pogodnim izborom otvora dijafragme i vremena snimanja foto-aparata moguće je donekle ublažiti nepovoljne uslove snimanja usled nedostatka prirodne svetlosti. Međutim, ova podešavanja ne mogu uvek zadovoljiti potrebne uslove za snimanje, pa se najčešće pribegava uređajima za stvaranje veštačke svetlosti ili *flešu,* koji trenutno daje vrlo jaku svetlost. Intenzitet svetlosti je takav da se uticaj prirodne svetlosti može smatrati zanemarljivim.

Elektronski fleš *(sl.* 225) u osnovi sadrži pretvarač jednosmernog napona od nekoliko stotina volta, koji puni kondenzator C kapacitivnosti od nekoliko stotina mikrofarada i cev za stvaranje bleska S, odnosno cev za pražnjenje punjenu plemenitim gasovima, najčešće ksenonom. Prekidač P, sinhronizovan sa okidačem foto-aparata, izaziva pražnjenje pomoćnog kondenzatora preko elektrode za paljenje cevi. Pražnjenjem velikog kondenzatora C kroz cev S ostvaruje se jak trenutni izvor svetlosti. Izvor visokog napona dobija se pomoću tranzistorkog oscilatora koji se napaja baterijom ili akumulatorom od 6 V. Transformator i ispravljač sa silicijumskim diodama obezbeđuju jednosmernu struju za punjenje kondenzatora C.

ELEKTRONSKI STROBOSKOP. Stroboskopija omogućuje posmatranje pokretnih tela u brzom periodičnom, rotacionom ili oscilatornom kretanju. Stroboskop omogućuje da se prividno uspori ili čak zaustavi neko periodično kretanje. Za vreme prividne nepokretnosti sistema u kretanju moguće je proučiti ponašanje nekih njegovih elemenata.

Pre pronalaska gasnih cevi za pražnjenje pribegavalo se korišćenju rotacionih zaklona koji su u brzom ritmu prekidali svetlosni snop koji je osvetljavao proučavani predmet. Međutim, ovaj postupak je imao samo ograničenu primenu usled male vrednosti dobijenog intenziteta svetlosti. Lampe za pražnjenje pomoću jonizacije gasa omogućuju da se dobije značajan svetlosni fluks, koji dostiže više desetina megalumena u vrlo kratkom vremenu reda nekoliko mikrosekundi.

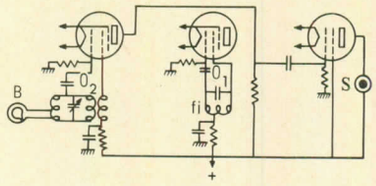
Generator učestanosti od 50 do 20 000 Hz izaziva oslobađanje energije akumulirane u kondenzatoru u cev za pražnjenje. Kretanje ispitivanog predmeta upravlja sistemom za sinhronizaciju koji, ako je potrebno, omogućuje da predmet bude prividno potpuno nepokretan. Posle svakog paljenja svetlosti kondenzator se ponovo puni pomoću struje visokog napona.

DETEKCIJA METALA. Pod nazivom »detektori metala« podrazumevaju se elektronski uređaji namenjeni da na rastojanju otkriju prisustvo metalnog tela. Oni se koriste za traženje metalnih komadića u različitim osnovnim materijalima (drvo, guma, ugalj, rude, papirna masa, plastične materije, prehrambeni i farmaceutski proizvodi). Za vreme drugog svetskog rata detektori su imali važnu vojnu primenu u *otkrivanju mina*.

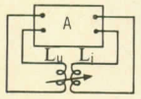
Kasnije, aparati na istom principu korišćeni su za otkrivanje vodovodne mreže, gasovoda i električnih kablova. Najzad, ponekad se detektori male snage koriste u veterinarstvu za pronalaženje metalnog komada u telu životinje.

Detektori za otkrivanje metala koriste jedan od sledećih principa:

1. generator sa izbijanjem učestanosti koji se sastoji od dva oscilatora visoke učestanosti;



Sl. 226. — Shema detektora sa izbijanjem: O_1 — oscilator učestanosti f_i; O_2 — oscilator spregnut sa namotajem za ispitivanje B; S — slušalica.

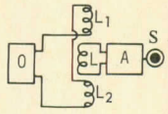


Sl. 227. — Princip detektora sa uspostavljanjem oscilacija: A — pojačavač; L_u — ulazni namotaj; L_i — izlazni namotaj.

2. detektor sa uspostavljanjem oscilacija;
3. most sa uzajamnom indukcijom.

Detektor sa izbijanjem učestanosti. Oscilator visoke učestanosti proizvodi što je moguće stabilniju učestanosti f_i Učestanost drugog oscilatora podešena je tačno na učestanost prvog oscilatora. Namotaj za traženje metalnih delova paralelno je povezan sa delom oscilatornog namotaja drugog oscilatora. Ako se ovaj namotaj približi nekoj metalnoj masi, učestanost drugog oscilatora se menja i izaziva, pomoću interferencije sa nepromenjenom učestanošću f_i, izbijanje učestanosti, koje posle detekcije proizvodi čujni signal u telefonskoj slušalici *(sl.* 226).

Detektor sa uspostavljanjem oscilacija. Pojačavač niskih učestanosti, napravljen sa induktivnom spregom između ulaznog i izlaznog kola, podešen je na granicu započinjanja oscilacija *(sl.* 227). Približavanjem namotaja nekom magnetnom materijalu povećava se sprega između spregnutih kola, čime se izaziva oscilovanje. Ovaj sistem se koristi samo za otkrivanje feromaterijala. Prema ovom principu napravljeni su mnogi detektori ruda.



Sl. 228. — Princip rada detektora sa uzajamnom indukcijom: O — cevni ili tranzistorski niskofrekventni oscilator; L_1 i L_2 — identični namotaji vezani u opoziciju; L — namotaj spregnut sa L_1 i L_2; A — pojačavač; S — slušalica.

Most sa uzajamnom indukcijom. U ovom sistemu *(sl.* 228) oscilator O zvučne učestanosti indukuje u dva indentična kalema L_1 i L_2 jednake elektromotorne sile suprotnog znaka, tako da je njihovo dejstvo na treći namotaj L jednako nuli. Ako se jedan od namotaja L_1 ili L_2 približi nekom metalnom predmetu, menja se njegova induktivnost, usled čega most postaje neuravnotežen, i pojavljuje se napon na krajevima kalema L. Ovaj napon, posle pojačanja, aktivira telefonsku slušalicu S. Veličina namotaja za otkrivanje ima veliki značaj i mora se prilagoditi i veličini traženih metalnih predmeta. Na primer: namotaj prečnika 50 cm omogućuje otkrivanje podzemnih mina na dubini od 40 cm, dok detektor veličine nekoliko centimetara otkriva metalne čestice u tabli čokolade debljine 1 cm.

Delovanje na materiju posredstvom elektronike

UVOD. Elektronika predstavlja najistančanije sredstvo za upravljanje različitim mehanizmima, kako lakim uređajima za merenje, tako i najsnažnijim mašinama. Osim toga, elektronika omogućuje da se neposredno utiče na materiju da bi se promenile neke njene karakteristike ili da bi se pospešile neke hemijske reakcije. Najzad, elektronika predstavlja i osnov novih metoda industrijske proizvodnje, grejanja i varenja, koji su omogućili ogroman napredak tehnologije. Ovi postupci su opisani u odeljcima: *Metalurgija* i *Obrada metala.*

FIZIKO-HEMIJSKO DEJSTVO ULTRAZVUKA. Vibriranje proizvedeno snažnim izvorima ultrazvuka izaziva promene u materiji. Na primer, zna se da stojeći ultrazvučni talasi deluju na okolinu tako da pokreću i održavaju i lebdenju čvrste čestice, težeći da ih prikupe i nagomilaju. Osim toga, poznati su hemijski i biološki efekti ultrazvuka koji su našli izvesne primene. Neki drugi efekti, koji, izgleda, pružaju velike mogućnosti, nalaze se još u toku razvoja.

Dejstvo ultrazvuka na tečnu sredinu. Predajnik ultrazvučnih vibracija velike energije ali male amplitude, potopljen u tečnost, izaziva u njoj mehaničke sile, koje mogu da dostignu vrednost i 15 000 puta veću od hidrostatičkog pritiska. U primeni, učestanost predajnika se nalazi između 20 i 100 kHz, a njegova snaga između 10 i 20 W/cm². Izbor ovih veličina zavisi od namene uređaja.

Prostiranje ultrazvučnih talasa kroz tečnost proizvodi u njoj mestimične kompresije i depresije koje ustalasaju sredinu. Na taj način se iz tečnosti oslobađaju mnogobrojni gasni mehuri.

Ovaj fenomen se naziva *kavitacija*. Pravljenje emulzivnih nanosa je neposredna posledica kavitacije. Ultrazvuk omogućuje da se izvrši raspršivanje žive u vodi, pravljenje stabilnih koloidnih rastvora, pravljenje različitih homogenih smeša, kao emulzija platine, zlata, srebra, bakra, nikla, hroma, aluminijuma. Fenomen kavitacije može se upotrebiti za oslobađanje gasa u tečnosti ili rastopljenim metalima, koji u ovim uslovima brže očvrsnu i imaju finiju strukturu. Čak je moguće, korišćenjem efekta raspršivanja pomoću ultrazvuka, napraviti u rastopljenom stanju intimnu smešu dva metala koji se inače ne mešaju, npr., olova i aluminijuma.

Ultrazvuk omogućuje da se pobošlja kvalitet metala nanesenog pomoću elektrolize. Uloga ultrazvuka u toku elektrolize može se objasniti njegovim dejstvom na gasne mehure. Energetsko vezivanje, koje je nemoguće ostvariti uobičajenim mehaničkim sredstvima, postiže se udaljavanjem gasnih mehurića sa katode. Osim toga, dejstvom ultrazvuka menja se izgled nanesenog metala i povećava se stepen korisnog dejstva struje. U slučaju hroma, nanos je homogeniji, ima duži vek trajanja a ujedno je i sjajniji. Ovako ostvaren nanos je dva puta otporniji prema nagrizanju hlorovodonične kiseline.

Hemijsko dejstvo ultrazvuka. Prostiranje ultrazvučnih talasa kroz neku sredinu proizvodi molekularno kretanje koje može da izazove stanje snažnije hemijske reakcije. I zaista, zidovi mehurića oslobođenih pomoću kavitacije i kapljice koje pri tom nastaju, opterećeni su elektricitetom suprotnog znaka. Pri kontrakciji mehurića električni napon znatno raste. Usled toga, između zidova mehurića i kapljica nastaje električno pražnjenje koje predstavlja bitan uzrok snažnog hemijskog dejstva prouzrokovanog ultrazvukom. Korisno je upotrebiti visoku učestanost reda nekoliko megaherca. Pod dejstvom ultrazvuka mogu brzo da se razlože benzoeva kiselina, skrob i želatin i da se razori hemoglobin. Ultrazvučni talasi ubrzavaju evoluciju svih hemijskih sistema prema njihovom stabilnom stanju. Otuda potiče upotreba ultrazvuka za pospešavanje starenja alkoholnih pića, drveta, mirisa. Ultrazvuk je, nesumnjivo, uspešno sredstvo za depolimerizaciju: rastvori nitroceluloze, acetata polivinila i polistirena, podvrgnuti nekoliko časova dejstvu ultrazvuka, pokazuju znatno smanjivanje molekularne težine. U drugom slučaju, ultrazvuk ima polimerizaciono dejstvo, što je slučaj kod acetaldehida, koji se kondenzuje i daje alkohol. Štaviše, izvesni elementi ulja iz petroleja mogu se polimerizovati i stabilisati. Vidi se znatna rasprostranjenost mogućih primena ultrazvuka u oblasti fiziko-hemijske obrade materije.

Čišćenje pomoću ultrazvuka. Ultrazvučni talasi proizvode živo kretanje tečnosti, što ima za posledicu uspešno čišćenje materijala koji je u nju potopljen. Princip je sledeći; magnetostriktivni davač proizvodi snažan ultrazvučni snop u tečnosti u koju je potopljen i u kojoj je obično rastvoren odgovarajući deterdžent. Tečnosu je u stanju kavitacije, pri čemu se u njoj razvijaju vanredno veliki mestimični pritisci. Ako se zaprljani mehanički delovi unesu u tečnost, mestimični pritisci istiskuju nečistoće koje rasipaju tečnost sa deterdžentom. Maksimalni intenzitet pritiska u tečnosti stvara se u čvorovima stojećih talasa. Da bi se ostvarilo dobro čišćenje, potrebno je izabrati snagu i učestanost generatora, tako da se dobije snažna kavitacija. U tom slučaju, metalni predmeti su savršeno očišćeni, čak i njihove najnepristupačnije tačke, i to u vremenu od nekoliko desetina sekundi. Danas postoje više tipova aparata za čišćenje pomoću ultrazvuka, koji su podešeni za različite uslove rada. Metoda koja je u početku bila korišćena za komade malih dimenzija, danas se primenjuje i na crne limove koji izlaze iz uređaja za valjanje na hladno. U ovom slučaju potrebna snaga ultrazvuka dostiže više desetina kilovata.

VISOKOFREKVENTNO ZAGREVANJE

PRINCIP. Visokofrekventno ili indukciono zagrevanje metala zasnovano je na činjenici da provodna materija, postavljena u promenljivo magnetno polje, predstavlja sedište indukovanih struja koja je greju pomoću Džulovog efekta.

Kroz primarni namotaj teče naizmenična struja koja stvara promenljivo magnetno polje. Zagrevani predmet, uvek od metala, postavljen je u polje i kroz njega teku snažne Fukolove (Foucault) struje. Ako je zagrevani predmet sastavljen od magnetnih metala, on je još sedište i histeroznih gubitaka, što ima za posledicu povećanje grejanja. Koncentracija energije u grejanom predmetu može da dostigne vrednost od 20 kW po kvadratnom centimetru.

Već na početku veka bilo je korišćeno indukciono zagrevanje za obradu posebnih čelika. Međutim, elektronika, koja je omogućila lako generisanje visokih učestanosti, znatno je povećala mogućnost i značajno proširila polje primena indukcionog zagrevanja. I zaista, ako je učestanost dovoljno velika, indukovane struje se ograničuju na tanak površinski sloj zagrevanog predmeta, tako da on može da pocrveni, čak i da se istopi pre nego što se njegova unutrašnjost znatnije zagreje. Iz ovog proizlaze mnogobrojne prednosti:

1. Zagreva se samo određeni deo predmeta pri čemu termička provodnost ne stiže da deluje.

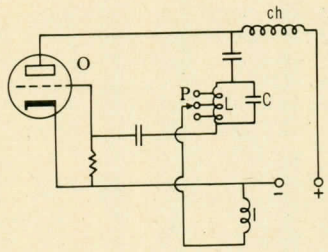
2. Grejanje je izvanredno brzo. Povišenje temperature može da dostigne i više stotina stepeni u sekundi bez opasnosti zagađivanja produktima sagorevanja. Topljenje se lako obavlja u vakuumu ili u kontrolisanoj atmosferi, pri čemu se zagrevane materije nalaze u staklenom zvonu.

3. Izbor učestanosti omogućuje da se tačno odredi debljina zagrevanog sloja, a da se ne promene osobine samog jezgra zagrevanog komada.

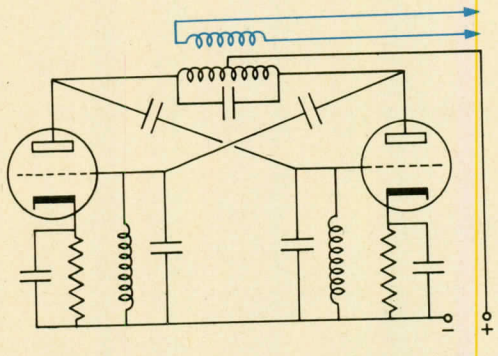
4. Podešavanje snage i vremena grejanja omogućuje da se tačno odredi krajnja vrednost temperature zagrevanog materijala.

5. Lako se ostvaruje automatizacija radnih operacija, što omogućuje povećanje proizvodnje.

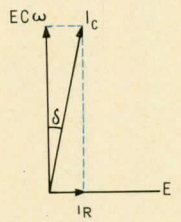
GENERATOR VISOKE UČESTANOSTI. Generatori namenjeni visokofrekventnom zagrevanju obično sadrže oscilator sa jednom ili dve elektronske cevi u kolu sa povratnom spregom, što znači da se podešeno oscilatorno kolo (namotaj L i kondenzator C u paraleli) nalazi u anodnom kolu i da je spregnuto sa kolom rešetke (*sl.* 229). Učestanost nastalih oscilacija je data Tomsonovom (Thomson) relacijom:



Sl. 229. Osnovna shema generatora za visokofrekventno grejanje:
O — oscilator sa elektronskim cevima; LC — oscilatorno kolo; P — preklopnik za podešavanje visokofrekventnog napona; ch — prigušnica; I — indukcioni namotaj.



Sl. 230. — Osnovna shema simetričnog generatora u puš-pulu.



Sl. 231. — Vektorski prikaz struja u kondenzatoru.

Faktor gubitaka i dielektrična otpornost različitih izolatora

Izolator	Faktor gubitaka tg δ	Relativna dielektrična otpornost
Acetat celuloze	0,01 do 0,1	90 do 100
Suvo drvo . .	0,05	5,5
Galalit . . .	0,052	120 do 150
Polivinil-hlorid	0,02 do 0,04	500
Metil-metakrilat (pleksiglas) .	0,03 do 0,04	160
Najlon . . .	0,02 do 0,004	140 do 190
Polietilen . .	0,0002 do 0,0005	180
Polistiren . .	0,0001 do 0,001	180 do 290
Fenol-formaldehid . . .	0,03	120
Urea formol (polopas) . .	0,015 do 0,03	200 do 280
Teflon . . .	0,0005	200
Staklo (kraun) .	0,002	300
Staklo (flint) .	0,004	300

$$f=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Kalem L napaja, najčešće pomoću koaksijalnog kabla, namotaj koji stvara indukciono polje u koje je postavljen zagrevani predmet. Preklopnik P_1 omogućuje izbor napona visoke učestanosti, koji se dovodi indukcionom namotaju I, čime se određuje snaga grejanja.

Na *sl.* 230. prikazana je osnovna shema uravnoteženog generatora čije su dve cevi postavljene u puš-pul vezu, što obezbeđuje dobru stabilizaciju učestanosti.

Industrijski visokofrekventni generatori snabdeveni su emisionim cevima, od kojih neke daju snagu od više stotina kilovata. Za ovu vrstu primene posebno odgovaraju cevi tipa »Vapotron«. Za vrlo velike snage može se u paralelu grupisati više cevi. Napajanje anodnog kola visokofrekventnog generatora vrši se pomoću trofaznog ispravljača sa fanotronima ili, ako se želi postepena regulacija snage grejanja, sa tri tiratrona čijim se rešetkama upravlja pomoću sistema sa faznim pomerajem.

Visokofrekventno zagrevanje metala ima tri bitne primene: varenje i zavarivanje, površinsko kaljenje i oslobađanje gasa u vakuumu, koji su opisani u odeljku *Metalurgija*.

GREJANJE POMOĆU DIELEKTRIČNIH GUBITAKA

OPŠTI POJMOVI. Kad se neka dielektrična materija postavi u električno polje, njeni molekuli teže da se orijentišu prema polju. Ako se koristi naizmenično polje, molekuli teže da se okreću da bi pratili orijentaciju polja. Iz ovoga proizlazi molekularno trenje koje apsorbuje energiju, čime se izaziva zagrevanje dielektrika. Moglo bi se reći da električno polje nailazi na neku vrstu »viskoziteta« koji, zavisno od posmatrane materije, može da ima veću ili manju vrednost.

U kondenzatoru sa savršenim dielektrikom, što znači da se ne greje, struja prednjači u odnosu na napon za ugao $\frac{\pi}{2}$. Kako je dielektrik sedište gubitaka, može se smatrati da se stvarni kondenzator sastoji od savršenog kondenzatora u paraleli sa otpornikom R, koji predstavlja sedište gubitaka P. Ako se naizmenični napon E kružne učestanosti ω dovede na kondenzator, kroz ovaj protiče struja $I_c=EC\omega$, a kroz otpornik R struja $I_R=\frac{E}{R}$, koja je u fazi sa naponom E. Ukupna struja I jednaka je geometrijskom zbiru struja I_C i I_R (*sl.* 231). Ova struja kasni za strujom I_C za ugao δ. Snaga P na otporniku R jednaka je $P=E^2$ tg $\delta\omega C$. Ona je srazmerna sa tg δ. Ovaj koeficijent tg δ je karakteristika datog dielektrika i nazvan je *faktor gubitaka*, a može se menjati sa učestanošću. Na osnovu njegove vrednosti može se odrediti snaga disipirana u dielektriku. Čak iako je vrednost tg δ nedovoljna, može se, pri visokim učestanostima, u dielektriku disipirati značajna snaga. Takođe je moguće napraviti uređaje za grejanje koji se mogu primeniti na vrlo veliki broj izolatora. Disipirana snaga može dostići vrednosti sto vata po kubnom centimetru.

Napon proboja dielektrika najčešće ograničava napon koji se može dovesti radnim elektrodama. Hladno staklo ima nedovoljan faktor gubitaka, ali u okolini temperature omekšavanja on dostiže dovoljnu vrednost da omogući znatno disipiranje energije, što je dragoceno za neke primene.

VISOKOFREKVENTNI GENERATORI. Princip visokofrekventnih generatora za grejanje pomoću dielektričnih gubitaka isti je kao i princip generatora koji se koriste za indukciono zagrevanje. Međutim, ovde se mora posvetiti posebna pažnja izgradnji oscilatornih kola i sistema za sprezanje generatora i radnih elektroda. U najednostavnijim slučajevima, prilagođavanja se ostvaruju pomoću transformatora. U drugim slučajevima koristi se vod podešen na četvrtinu talasne dužine. Za najviše učestanosti pribegava se talasovodima. Zagrevani predmeti se u ovom slučaju postavlja u završnu šupljinu. U svim slučajevima, može se računati da ukupni stepen korisnog dejstva bude nešto veći od 25%.

VARENJE PLASTIČNIH MATERIJA. Grejanje pomoću dielektričnih gubitaka ima mnogobrojne primene. Glavne su predgrevanje plastičnih materija koje iznad neke temperature trajno menjaju osobine i varenje plastičnih materija u tablama, kao što je vinil-hlorid, ili veštačkih vlakana, kao što su najlon i rilsan. Prave se mašine za spajanje, koje su nazvane elektronskim, u kojima je spajanje ostvareno nizom zavarenih tačaka ili neprekidnom linijom vara. U slučaju neprekidnog vara, vareni materijali se spajaju pomoću točkića koji služe kao elektrode. Dobijeni var je hermetički zatvoren. Na isti način je moguće napraviti predmete za naduvavanje, balone, vazdušne dušeke ili plastične kese za namirnice, bočice itd.

SUŠENJE DRVENE GRAĐE. Metoda grejanja pomoću dielektričnih gubitaka omogućuje sušenje drvene građe za nekoliko časova, dok bi prirodno sušenje zahtevalo godine. Rezultati su stvarno bolji od onih koji bi se mogli postići u sušarama, čiji je nedostatak da prvo suše površinu, koja potom štiti unutrašnjost, čime sprečava oslobađanje unutrašnje vlage. Ako unutrašnjost drveta nije potpuno suva, ono se skuplja i građa se deformiše. Sušenje pomoću visoke učestanosti, uz zagrevanje cele mase drveta, predstavlja idealno rešenje kad relativno povišeni troškovi proizvodnje dozvoljavaju njegovu upotrebu.

LEPLJENJE DRVETA. Visokofrekventno grejanje je posebno dragoceno za lepljenje drveta. Korišćenjem lepkova na bazi urea-formola, čiji je ugao gubitaka vrlo veliki, ostvaruje se mestimično zagrevanje, pošto se lepak zagreva mnogo brže od drveta. Tako se za nekoliko sekundi može ostvariti lepljenje koje bi, pomoću drugih metoda, zahtevalo više časova. Postupak se primenjuje bilo za komade građe, bilo za ploče iz slojeva sa unakrsnim vlaknima, bilo za ploče načinjene od drvenih otpadaka i strugotine ili od vlakana impregnisanih polimerskim smolama.

OSTALE PRIMENE. Grejanje pomoću dielektričnih gubitaka koristi se uvek kad je potrebno ubrzati proces zagrevanja ili kad je neophodno izvršiti zagrevanje cele mase. Metoda se podjednako koristi za:

— sečenje pri toploj obradi staklenih proizvoda,
— predgrevanje otpornih materijala,
– sušenje kalupa za livenje,
— sušenje vune i pamuka,
— sušenje žice namotaja posle lakiranja,
— razaranje jajašca štetočina u brašnu,
— ultrabrzo kovanje itd.

Automatska regulacija i servomehanizmi

UVOD. Većina mašina, u najširem značenju ove reči, bilo da je to čekić, testera, točak, razboj za tkanje, u svom nastanku su napravljene da bi njima rukovao i upravljao čovek.

• *Mehanizacija* je zamenila fizički rad čoveka, ali je on ipak ostao još dugo neophodan da upravlja mašinom.

• *Automatizacija* je omogućila da se zameni učešće čoveka u proizvodnji, odnosno da se ostvare mašine sposobne da same obezbede izvršenje datog rada. Ovaj problem prvo je rešen za obavljanje jednostavnih radnji ili za niz uzastopnih jednostavnih operacija. Mašine ove vrste predviđene su za automatsku obradu. Umesto čoveka, upravljanje mašinom preuzima mehanički skup koji određuje upravljački program, odnosno tačan unapred određen redosled uzastopnih operacija koje mašina automatski obavlja. Mašine ovog tipa nastavljaju da rade čak i u slučaju nedostatka materijala za obradu ili nepreciznog rada pojedinih organa mašine, ponavljajući uvek ista, netačna i nekorisna kretanja.

Usled neizbežnih promena uslova rada mašine (istrošenost organa ili alata, promena prvobitnog materijala, termičko širenje nekih elemenata, vibriranje), proizvedeni predmeti mogu izići van dozvoljenih fabričkih tolerancija. Prema tome, nameće se potreba za nadzorom za koji je neophodan operator koji obavlja kontrole ili analize, što znači merenja. U slučaju da se ova merenja mogu izvršiti automatski na samoj mašini, njihovi rezultati mogli bi se iskoristiti za upravljanje rada mašine. Na ovaj način se ostvaruju *servomehanizmi*, što znači mehanizmi koji verno izvršavaju postavljene zahteve.

Prema prirodi posla koji treba obaviti, u industriji se koriste bilo automati koji obavljaju niz operacija po unapred određenom redosledu, bilo servomehanizmi. Industrija je tako krenula putem automatizacije koja se često označava američkim izrazom *automatika*.

Servomehanizmi

Zadatak servomehanizma je da automatski održava zadatu vrednost neke fizičke veličine, uprkos delovanju faktora poremećaja. Fizička veličina koja se održava konstantnom, može biti bilo koja, npr.: mehanička dimenzija, temperatura, pritisak, brzina, snaga itd.

SASTAV SERVOMEHANIZAMA

Servomehanizam (*sl.* 232) sačinjava sledeći skup elemenata:

1. organ za upravljanje, na kome se »zadaje« vrednost g_1 veličine G, koju treba održavati konstantnom;

2. Organ koji pomoću spoljašnje energije izvršava željeni rad (mašina-alatka ako se radi o mehaničkoj obradi materije, generator toplote ako je po sredi održavanje nekog elementa na određenoj temperaturi itd.); ovaj organ se naziva *kolo (grana) akcije*;

3. merni organ M, koji u svakom trenutku meri vrednost g_2 veličine G, koja se menja pod dejstvom prethodnog organa;

4. organ za upoređenje, čiji je signal srazmeran razlici $g_1 - g_2$, koja se naziva *greškom*; signal greške se prenosi kolu akcije u smeru koji teži da je smanji.

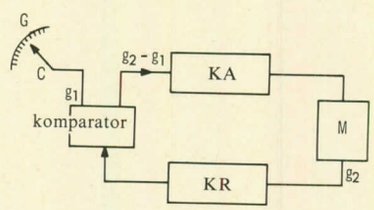
Merni organ koji određuje vrednost g_2, obično nema dovoljnu snagu da bi upravljao organom koji obavlja rad. Dakle, iza njega dolazi pojačavač, za koji se često nameće elektronsko rešenje.

Servomehanizam je okarakteristan spregom u zatvorenoj petlji. Ova petlja u suštini sadrži kolo akcije KA, koje obavlja rad, i kolo reakcije KR, koje se naziva *kolo povratnog dejstva*, pošto na ulazno kolo treba da prenese informaciju o radu izvršenom posredstvom kola akcije. Na taj način se ostvaruje potčinjavanje uzroka (signal na ulazu kola akcije) njegovoj posledici (izlazni signal). Za uređaj se kaže da radi u *zatvorenoj petlji*.

Zavisno od vrste uređaja, kolo reakcije može biti mehaničko, pneumatsko, termičko ili električno a, isto tako, može da združi više različitih sredstava akcije.

Teorijski, može se koristiti ma koji način prenosa informacija sa izlaza kola akcije na njegov ulaz.

Ako elementi kola reakcije nemaju zanemarljivu masu, oni unose kašnjenje pri prenosu informacija o potrebnoj korekciji. Dakle, korekcija se izvršava sa nekim kašnjenjem čime se smanjuje tačnost. Da bi se brzo ostvarila željena vrednost, na izlazu sistema povećava se amplituda korekcije, odnosno, povećava se uticaj kola reakcije. U slučaju prevelike korekcije proizvela bi se greška u suprotnom smeru, usled čega bi nastalo oscilovanje sistema. Zahvaljujući zvanrednoj osetljivosti i skoro trenutnoj brzini odgovora, elektronika predstavlja gotovo idealno rešenje za probleme servomehanizama. Uostalom, jedino elektronika omogućuje da automatizacija dostigne ove razmere i otvara joj oblasti delatnosti koje zahtevaju logiku, inteligenciju i donošenje odluka. Računari ili ordinatori počinju da obezbeđuju upravljanje složenim uređajima, a pristupa se i upravljanju preduzećima.



Sl. 232. — Princip rada servomehanizama:
G — veličina koju treba održavati konstantnom;
C — komandni organ kojim se zadaje vrednost g_1;
KA — kolo akcije;
M — merni organ izlazne veličine g_2;
KR — kolo reakcije.

STABILNOST SERVOMEHANIZAMA

Može se smatrati da kolo povratnog dejstva servomehanizma ima isti zadatak kao i negativna reakcija pojačavača. Pojačavač je stabilan kad se posredstvom negativne reakcije vraća na ulaz deo βV_i izlaznog signala V_i, koji je u protivfazi sa signalom dovedenim na ulaz. Pri izvesnim učestanostima, usled promene faze u pojačavaču ili u kolu povratne sprege, ovaj uslov nije više ispunjen, i signal vraćen na ulaz može da promeni fazu za 180°. U ovom slučaju, negativna reakcija postaje pozitivna povratna sprega što ima za posledicu nastajanje oscilacija. Ako je proizvod $A\beta$, pojačanja A i stepena povratne sprege β, veći od jedinice, amplituda oscilovanja je ograničena samo zasićenjem u petlji, čime se smanjuje pojačanje i uspostavlja dinamička ravnoteža.

Pri nekim učestanostima može da nastupi rezonanca u elementima snage, pri čemu postoji opasnost od mehaničkog razaranja uređaja.

Proučavanje uslova stabilnosti servomehanizma je vrlo složeno. Odgovarajuću teoriju formulisali su Rut, Harvic i Nikvist (Routh, Hurwitz, Nyquist), ali se u svim slučajevima servohehanizmi moraju podvrći vrlo ozbiljnoj eksperimentalnoj proveri zbog velikog broja parametara koji mogu da naruše njihov rad.

PODELA SERVOMEHANIZAMA

Postoji vrlo veliki broj vrsta servohehanizama. Najčešće se koriste *pozicioni servohehanizmi* i *brzinski servomehanizmi*.

POZICIONI SERVOMEHANIZAM. Zadatak ovog uređaja je da u prostoru odredi položaj nekog pokretnog organa u odnosu na drugi organ.

Pozicioni servomehanizam ostvaruje se bilo prema metodi automatskog potenciometra, bilo prema metodi sinhromotora.

Metoda automatskog potenciometra. Princip je vrlo jednostavan (*sl.* 233). Dva potenciometra P_1 i P_2 povezani su paralelno na krajeve izvora konstantnog napona U. Klizač potenciometra P_1, kojim rukuje operator, omogućuje da se na ovom potenciometru unapred izabere neki napon između O i U. Klizač potenciometra P_2 pokreće se pomoću motora M. Razlika potencijala između klizača P_1 i P_2 vodi se na ulaz pojačavača A, čija izlazna struja napaja motor M. Usled ove struje motor M se okreće u smeru koji zavisi od signala razlike potencijala između dva klizača. Motor se okreće sve dok se ulazni napon pojačavača ne svede na nulu. U tom slučaju klizač potenciometra P_2 zauzima isti položaj kao i klizač potenciometra P_1. Ako operator pokrene klizač P_1, motor M počinje da se okreće i klizač P_2 prati kretanje klizača P_1.

Metoda sinhromotora. Sinhromotor, ili selsin, u suštini sadrži stator sa tri namotaja, slično trofaznim motorima (*sl.* 234). Rotor R sadrži jedan bipolarni namotaj. Ako se rotor R napaja naizmeničnim naponom, on će indukovati napone u fazi u tri namotaja statora S_1, S_2 i S_3. Efektivna vrednost indukovanih napona zavisiće od relativnog položaja rotora u odnosu na tri namotaja. Ovaj se motor naziva *generator* ili *predajnik*.

Identičan motor ima ulogu *prijemnika*, čija su tri statorska namotaja povezana sa namotajima generatora. Njegov rotor se napaja paralelno sa rotorom prvog motora i zauzima takav položaj da indukuje napone u opoziciji faza sa naponima koji dolaze sa namotaja generatora. Dakle, rotor prijemnika tačno prati položaj rotora generatora, kao da su rotori mehanički spregnuti. Na taj način se ostvaruje *sistem prenošenja ugla*.

Ovaj tip selsina, nazvan »sa direktnim dejstvom«, ima jedan nedostatak koji mu u izvesnim slučajevima onemogućuje upotrebu.

Naime, obrtni momenat rotora prijemnika mogao bi biti nedovoljan da pokrene snažniji mehanizam korisnika, osim ako se kao generator ne koristi motor veće snage. Stoga se najčešće koristi selsin sa indirektnim dejstvom (*sl.* 235), u kome rotor prijemnika nije direktno spregnut sa korisnikom, već samo daje naizmenični napon koji karakteriše ugaono pomeranje u odnosu na rotor generatora. Ovaj napon, posle pojačanja upravlja motorom M dovoljne snage da pokrene mehanizam korisnika. Mehaničkom vezom ostvareno je kolo reakcije, koje obezbeđuje sinhrono okretanje motora M i rotora prijemnika.

BRZINSKI SERVOMEHANIZAM. U ovom tipu servomehanizma izlazna veličina je brzina obrtanja motora. Zadatak servomehanizma je da brzinu obrtanja motora podesi da bude jednaka vrednosti koju operator određuje po svojoj volji. Shema takvog servomehanizma prikazana je na slici 236. Konstantan napon napaja nezavisan pobudni namotaj Ex motora M sa jednosmernom strujom, čija se brzina okretanja održava. Njegov rotor se napaja pomoću generatora G koji pokreće motor M_1. Induktor generatora G napaja se izlaznim naponom pojačavača A.

Ulazni napon pojačavača je razlika dva napona, $v_0 - V$, gde je: v_0 – napon na klizaču potenciometra P, koji se može podešavati i koji se naziva »referentni napon«, a V — napon tahometra D koji pokreće motor M.

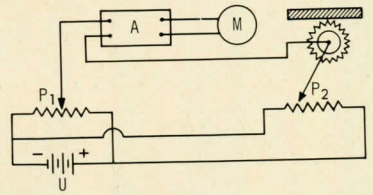
Ako brzina motora M teži da poraste, to izaziva porast napona V i smanjuje razlike napona v_o — V. Dakle, smanjuje se izlazni napon pojačavača, koji, smanjujući eksitaciju generatora G, ujedno smanjuje brzinu okretanja M, sve dok ova ponovo ne dostigne svoju početnu vrednost. Ako operator promeni vrednost referentnog napona v_0, odgovarajuća brzina motora se menja. Svakoj vrednosti referentnog napona odgovara određena vrednost brzine okretanja motora M, tako da je moguće baždariti potenciometar P brojem obrtaja u minuti motora M.

UPOTREBA SERVOMEHANIZAMA

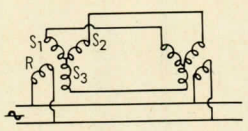
Servomehanizmi nalaze veliku primenu u industriji. Najčešće se koriste za upravljanje mašinama-alatljikama i upravljanje uređajima za varenje.

UPRAVLJANJE MAŠINAMA-ALATLJIKAMA. Upravljanje mašinama-alatljikama omogućuje da se lako reši nekoliko sledećih problema:

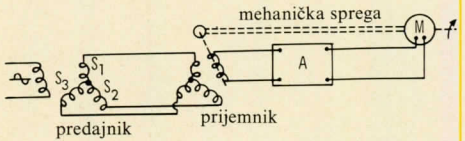
1. podešavanje brzine obrtanja motora u vrlo širokom opsegu;



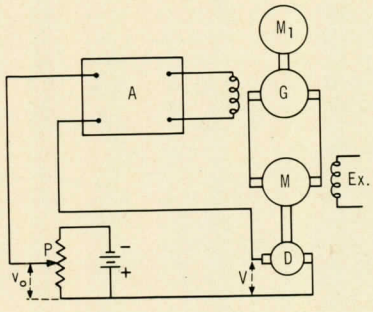
Sl. 233. — Potenciometarski pozicioni servomehanizam;
A — pojačavač; U — izvor napajanja; P_1 — komandni potenciometar; P_2 — prateći potenciometar; M — motor koji pokreće potenciometar P_2.



Sl. 234. — Pozicioni servomehanizam pomoću selsina sa direktnim dejstvom: S_1, S_2, S_3 — namotaji statora;
R — namotaj rotora.



Sl. 235. — Pozicioni servomehanizam pomoću selsina sa indirektnim dejstvom. Pojačavač A napaja motor M, koji pokreće rotor prijemnika.

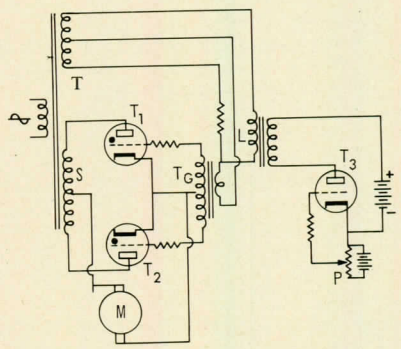


Sl. 236. — Principska shema brzinskog servomehanizma:
M — motor čija se brzina obrtanja održava konstantnom;
E_x — nezavisan pobudni namotaj motora M;
M_1 — motor za pokretanje generatora G;
G — generator za napajanje rotora motora M;
A — pojačavač;
v_0 — referentni napon potenciometra P;
P — potenciometar za određivanje brzine obrtanja motora M;
V — izlazni napon tahometra (diname);
T — tahometar.

2. stabilizacija brzine obrtanja uprkos promene napona mreže ili opterećenja;
3. promena brzine prema unapred određenom programu ili podešavanje brzine zavisno od ma koje fizičke veličine (pritisak, temperatura, svetlosni fluks);
4. rad pri konstantnoj sprezi ili pri konstantnoj snazi.

Zbog svoje velike sposobnosti prilagođavanja za upravljanje ovim mašinama praktično se koristi jedino jednosmerni motor sa nezavisnom pobudom. Na slici 237. prikazana je osnovna shema elektronskog upravljanja motorom. Rotor motora M napaja se iz sekundara transformatora T preko tiratrona T_1 i T_2, od kojih svaki ispravlja jednu poluperiodu napona mreže. Rešetke tiratrona T_1 i T_2 napajaju se u opoziciji faza preko transformatora T_G, na čiji se primar dovodi napon sa promenljivom fazom.

Dakle, podešavanjem faze menja se srednja vrednost struje kroz tiratron. Podešavanje faznog pomeraja napona dovedenog na rešetke ostvaruje se većim ili manjim zasićenjem namotaja L anodnom strujom cevi T_3, čiji se napon rešetke reguliše pomoću potenciometra P. Prema tome, rukovanje potenciometrom P obezbeđuje podešavanje brzine okretanja motora M.



Sl. 237. — Osnovna shema elektronskog upravljanja motora:
M — motor (kojim se upravlja);
T — mrežni transformator;
S — sekundar transformatora za napajanje anoda tiratrona T_1 i T_2;
T_G — transformator za napajanje rešetki tiratrona;
L — namotaj za stvaranje faznog pomeraja;
T_3 — trioda, čija anodna struja, više ili manje, izaziva zasićenje magnetnog kola namotaja L;
P — potenciometar za podešavanje napona rešetke cevi T_3

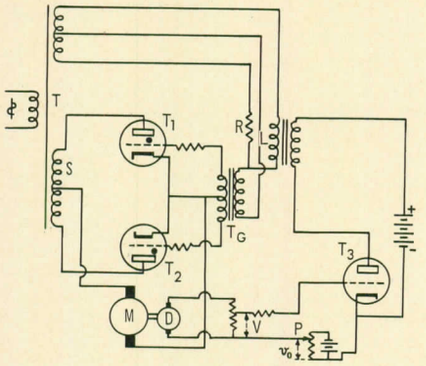
Ako se zahteva stabilizacija brzine okretanja motora, dovoljno je napon rešetke cevi T_3 podrediti brzini okretanja motora M. U tom slučaju, rešetka cevi T_3 napaja se pomoću tahometarske diname, koju pokreće motor (*sl.* 238).

Sistemima za upravljanje motorom mogu se lako pridodati dodatni uređaji koji im obezbeđuju sigurnost rada i olakšavaju upotrebu usled:

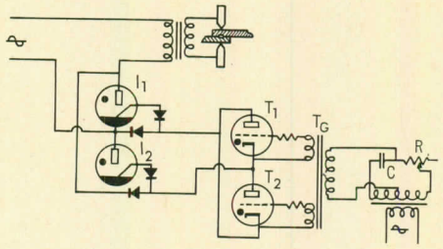
— ograničenja intenziteta struje pokretanja;
— prethodnog zagrevanja tiratronskog vlakna;
— lake promene smera rada motora;
— brzog kočenja.

Regulator sa tiristorima. U novije vreme tiristori sve više zamenjuju tiratrone u uređajima za upravljanje mašinama. Tiristori su u prednosti jer ne zahtevaju grejanje (odmah su spremni za rad), imaju veoma mali unutrašnji pad napona i praktično neograničen vek trajanja. Princip rada regulatora sa tiristorima i tiratronima je u osnovi isti.

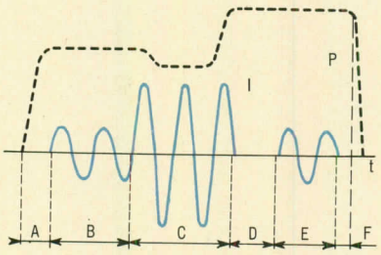
UPRAVLJANJE UREĐAJIMA ZA VARENJE. Elektronika, usled svojih mnogostrukih mogućnosti



Sl. 238. — Osnovna shema elektronske stabilizacije brzine obrtanja motora:
T — mrežni transformator;
S — sekundar transformatora za napajanje anoda tiratrona T_1 i T_2;
T_G — transformator za napajanje rešetki tiratrona;
M — motor čija se brzina stabiliše;
D — tahometar;
L — namotaj za stvaranje faznog pomeraja;
T_3 — trioda čija anodna struja, više ili manje, izaziva zasićenje magnetnog kola namotaja L;
P — potenciometar za određivanje referentnog napona v_0;
V — napon srazmeran brzini obrtanja motora M.
Napon na rešetki cevi T_3 jednak je razlici napona v_0 i V.

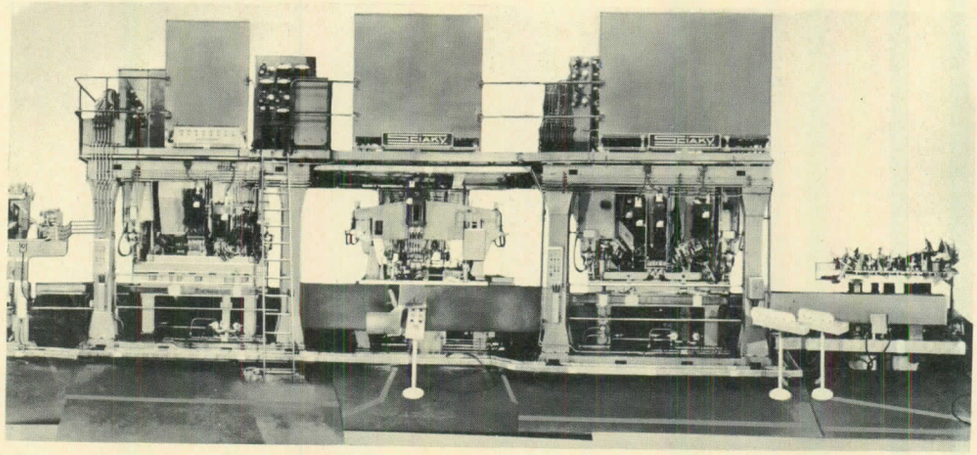


Sl. 239. — Osnovna shema regulacije jačine struje varenja:
I_1, I_2 — ignitroni za automatsko prekidanje napajanja primara transformatora za varenje;
T_1, T_2 — tiratroni za regulaciju paljenja ignitrona;
T_G — transformator za napajanje rešetki tiratrona; dovedeni naponi su u protivfazi i fazno pomereni u odnosu na napon mreže;
C, R — kondenzator i otpornik za stvaranje faznog pomeraja.



Sl. 240. — Redosled operacija uređaja za varenje: I — intenzitet struje; P — pritisak na komade za varenje; A — postavljanje; B — predgrevanje; C — varenje; D — kaljenje; E — žarenje; F — kovanje.

Sl. 241. — Deo mašine za varenje bočnih strana »fijata 850«.



u oblasti preciznog merenja struje i vremena i karakteristika brzih prekidačkih elemenata koji rade bez pomeranja mehaničkih delova, omogućila je da električno varenje pomoću otpornosti dostigne visok stepen savršenstva, koji ovoj tehnici otvara mnogobrojne primene u veoma različitim oblastima (v. Metalurgija).

Elektronski uređaj aparata za varenje. Uspostavljanje struje primara i njeno prekidanje ostvareni su pomoću dva ignitrona, koji koriste inverzno paralelnu, odnosno *antiparalelnu* vezu *(sl.* 239), pri čemu svaki ignitron propušta jednu poluperiodu naizmenične struje. Paljenje ignitrona izaziva se pomoću ignitora na koje se u pogodnom momentu dovodi pozitivan napon u odnosu na katodu. Postoji opasnost da paljenje ma u kom trenutku periode naizmenične struje napajanja prouzrokuje suviše veliku struju, što izaziva nepravilno varenje. Prema tome, potrebno je odrediti tačan trenutak paljenja svakog tiratrona, koji je moguće podešavati za svaku poluperiodu. Zbog toga se ignitoru svakog ignitrona dovodi napon paljenja posredstvom tiratrona. Dva tiratrona se vezuju u antiparalelnu vezu i njihovo paljenje se izaziva dovođenjem na njihove rešetke dva naizmenična napona u protivfazi. Ovi naponi su, respektivno, fazno pomereni za promenljiv ugao u odnosu na anodne napone.

Regulisanje trajanja protoka struje za vreme svake poluperiode omogućuje podešavanje srednje struje koja prolazi kroz primar transformatora i, prema tome, struje koja prolazi kroz tačku varenja.

Trajanje zavarivanja može se odrediti regulisanjem vremena punjenja ili pražnjenja kondenzatora preko nekog otpornika. Ovaj postupak nije dovoljno tačan, pošto operacija varenja može da započne u bilo kom trenutku poluperiode, čime bi se menjala snaga disipirana u varu.

Za poboljšanje preciznosti pogodnije je koristiti jednako zavarivanja, pri čemu se odbrojava tačan broj perioda struje napajanja. Različita mesta uzastopnog zavarivanja primaju tako uvek istu energiju. Odbrojavanje tačnog broja perioda najčešće se ostvaruje pomoću cevi koja se naziva *dekatron* i koja sadrži centralnu anodu oko koje je raspoređeno deset katoda. Kola su podešena tako da luk može da postoji između anode i samo jedne katode. Pomoćne elektrode, postavljene između katoda, obezbeđuju da se pri svakoj periodi prenese pražnjenje sa jedne katode na sledeću, sve dok se ne postigne željeni broj perioda. Kad pražnjenje napravi pun krug, tj. pređe svih deset katoda, šalje se impuls sledećoj dekatronskoj cevi koja broji desetine perioda. Na taj način se može utvrditi struja u primaru transformatora za zavarivanje za tačno određen broj perioda.

Uređaj za trofazno zavarivanje. Zavarivanja koja zahtevaju najveću snagu, najčešće su trofaznog tipa. Ovaj tip uređaja je pogodan jer raspoređuje strujne udare na tri faze mreže, što dozvoljava pretvaranje trofazne struje učestanosti 50 Hz u monofaznu struju vrlo niske učestanosti, za koju je impedansa sekundara mnogo manja, čime se znatno poboljšava koeficijent korisnog dejstva. Promena učestanosti ostvarena je posredstvom tri grupe od po dva ignitrona u antiparalelnoj vezi, od kojih se svaka pali u određenom trenutku i propušta ispravljenu struju potrebnu da se »napravi« poluperioda određenog trajanja sabiranjem više trofaznih poluperioda istog znaka. Savremeni uređaji za zavarivanje omogućuju da se izvrši zavarivanje i raznorodnih metala i veoma različitih debljina. Oni obavljaju složen niz uzastopnih operacija sa određenim vremenom trajanja, kao što su: postavljanje, predgrevanje, varenje, kaljenje, usijavanje i kovanje, za koje su struje i pritisak elektroda automatski podešeni prema postavljenom programu *(sl.* 240). Jedino uređaji sa elektronskim upravljanjem omogućuju da se reši ovaj problem. Automobilska industrija koristi posebne mašine koje obezbeđuju automatsko spajanje različitih delova koji obrazuju karoseriju i koji sadrže nekoliko stotina tačaka za zavarivanje koje se obavlja u nekoliko desetina sekundi. Dužina takve mašine može biti i 70 m (*sl.* 241).

Fot. Sciaky.

Obrada podataka

POJAM INFORMACIJE

Pojam informacije neosporno je intuitivan. On se vezuje neposredno za pojam »obaveštenja«. Podatak da se upravo dogodio neki nepredviđeni događaj, ravan je doprinosu informacije koji je utoliko značajniji ukoliko je verovatnoća da se događaj odigra manja. Dakle, pojam informacije može da se poveže sa pojmom verovatnoće, što navodi na ideju da se on brojno izrazi. Najmanja količina informacija koja može da se dobije, ravna je onoj koja daje potvrdan ili negativan odgovor na nedvosmisleno postavljeno pitanje. Ova količina informacija uzeta je za jedinicu i naziva se *bit* (»*BInary digiT*«).

Mašine za »obradu podataka« nazivaju se *računari*, kad je njihov zadatak, pre svega, računanje, ili *ordinatori*, opštiji izraz, kad obavljaju ne samo računanje već takođe obezbeđuju i upravljanje i automatsko vođenje složenih organizama.

Računari mogu da pruže dve vrste podataka, numeričke ili analogne.

• Podatak je *numerički* ili *digitalan* kad je izražen pomoću broja, što znači, kad se menja skokovito za diskretne količine. To je npr., podatak o vremenu koji časovnik daje u »skokovima«, pružajući gledaocima svetlosna obaveštenja da li je određen vremenski interval već protekao ili još nije.

• Podatak je *analogan* kad neprekidno predstavlja neku promenljivu veličinu i kad je pristupačan svakog trenutka, npr., pokazivanje mernih aparata, kao što su voltmetar, vatmetar, termometar, s obzirom da se promenljive veličine prikazuju ugaonim kretanjem kazaljke ili visinom živinog stuba.

Cifarski analogni računari

Postoje dve osnovne vrste računara: cifarski (digitalni) i analogni računari. Međutim, postoje postupci pretvaranja analognih podataka u digitalne i obrnuto, koji omogućuju da se za neke probleme, po volji, koristi računar jedne ili druge vrste. U početku, cifarski računari su bili namenjeni računovodstvenim obračunima, dok su analogni računari bili predviđeni za naučna proučavanja. Međutim, razvoj numeričkih računara omogućuje im da obavljaju sve naučne proračune sa tačnošću koja ne može da se očekuje od analognih računara.

CIFARSKI RAČUNARI

Prve mehaničke mašine za računanje, kao, npr. Paskalova računska mašina, koristile su decimalni brojni sistem, ostvaren pomoću točkova sa deset zubaca, pri čemu svakom zupcu odgovara jedna od deset cifara. I dan-danas male kancelarijske računske mašine i registar-kase koriste isti princip sa zupčanicima i ozubljenom polugom, koji sadrže deset zubaca. Moguće je napraviti električne ili elektronske računske mašine koje koriste desetni brojni sistem. Međutim, pri upotrebi električne struje mnogo je jednostavnije da se pribegne drugom brojnom sistemu: binarnom sistemu.

Binarni brojni sistem. Gotovo svi elektronski računari, sa cevima ili tranzistorima, koriste binarni brojni sistem, pošto dve cifre 0 i 1, koje postoje u ovom sistemu, mogu lako predstavljati dva karakteristična stanja nekog električnog kola, npr.: *otvoreno* ili *zatvoreno stanje* nekog kontakta, *provodno* ili *neprovodno stanje* poluprovodničkog spoja, *stanje provođenja* ili *neprovođenja* nekog tranzistora, *odsustvo* ili *prisustvo* napona ili struje na liniji, *odsustvo* ili *prisustvo* namagnetisanja magnetnih materijala itd.

Binarnim sistemom mogu se lako predstaviti kako brojne vrednosti, tako i slova, reči i izrazi, što se, jednostavno, svodi na problem kodiranja. Pa ipak, binarni brojni sistem ima nedostatak da zahteva oko 3,3 puta više cifara nego decimalni sistem, da bi se izrazila ista brojna vrednost. Međutim, ova teškoća ni najmanje ne smeta i ona je samo prividna pošto elektronsko čitanje cifara može da se izvrši brzinom većom od 300 000 cifara u sekundi.

Priložena tabela prikazuje vezu između petnaest prvih brojnih vrednosti izraženih u decimalnom i binarnom sistemu. U binarnom sistemu »težina« cifara u različitim kolonama, gledajući zdesna nalevo, jednaka je vrednostima uzastopnih stepena broja 2.

Decimalni broj	Binarni broj
Težinski brojevi: 10.1	8 4 2 1
0	0 0 0 0
1	0 0 0 1
2	0 0 1 0
3	0 0 1 1
4	0 1 0 0
5	0 1 0 1
6	0 1 1 0
7	0 1 1 1
8	1 0 0 0
9	1 0 0 1
10	1 0 1 0
11	1 0 1 1
12	1 1 0 0
13	1 1 0 1
14	1 1 1 0
15	1 1 1 1

Sabiranje dva binarna broja. Osnovna tablica sabiranja u binarnom sistemu je vrlo jednostavna i glasi:

$$0 + 0 = 0$$
$$0 + 1 = 1$$
$$1 + 1 = 10$$

Ukoliko postoji prenos, postupak se sastoji u dodavanju jedinice sledećoj levoj koloni. Primera radi daje se sledeće sabiranje:

	(1)	(1)		(prenos)
	1	0	1	1
	1	1	1	1
1	1	0	0	1

Oduzimanje dva binarna broja. Oduzimanje binarnog broja vrši se sabiranjem njegovog komplementa, odnosno broja koji se dobija zamenom svake cifre njenim komplementom, što jednostavno znači da se nule zamenjuju jedinicama, i obrnuto.

Množenje dva binarna broja. Operacija množenja obavlja se kao u decimalnom sistemu, pri čemu se sabiranje pojedinačnih rezultata vrši primenom pravila binarnog sabiranja. Za množenje binarnog broja sa 2, 4, 8 itd. dovoljno je dodati jednu, dve, tri ... ili više nula desno od množenika, koji je izražen kao binarni broj.

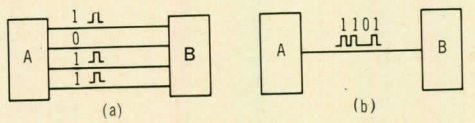
Polubinarni sistem. Izvesni računari, umesto opisanog čistog binarnog brojnog sistema, koriste varijantu koja se naziva *binarno kodirani decimalni sistem* ili *polubinarni sistem*. U polubinarnom sistemu, u binarni broj se ne pretvara sam broj kao celina, već posebno svaka cifra decimalnog broja. Ovo rešenje predstavlja prednost pošto čuva njegovu decimalnu strukturu i ograničava zahteve decimalno-binarnog, odnosno binarno-decimalnog transkodovanja samo na deset uobičajenih cifara.

Prema tome, u ovom slučaju, svaka decimalna cifra predstavljena je sa četiri binarne cifre, 0 ili 1, prema sledećoj tabeli.

Decimalna cifra	Polubinarni kod
0	0 0 0 0
1	0 0 0 1
2	0 0 1 0
3	0 0 1 1
4	0 1 0 0
5	0 1 0 1
6	0 1 1 0
7	0 1 1 1
8	1 0 0 0
9	1 0 0 1

Predstavljanje brojeva pomoću električnih signala. Različite cifre brojeva ili reči (instrukcija) predstavljene su kratkim električnim impulsima. Impulsi koji predstavljaju cifre istog broja, mogu se preneti na dva načina:

— jednosmernim prenosom svake cifre posebnom linijom, što se naziva *paralelnim prenosom*;



Sl. 242. — Prenos binarnog broja od organa A do organa B:
a — paralelni prenos;
b — serijski prenos.

— uzastopnim prenosom cifara na istoj liniji, što se naziva *serijskim prenosom*. Na slici 242 a prikazan je princip paralelnog prenosa broja 1011, dok je serijski prenos istog broja prikazan na slici 242 b. U ovom drugom slučaju, prenos počinje levom cifrom binarnog broja, što znači od cifre jedinica. Ova metoda se češće koristi, pošto, u slučaju sabiranja dva sukcesivna broja, pojednostavljuje prenos ostatka.

SASTAV NUMERIČKOG RAČUNARA. Numerički računar sadrži sledeće bitne organe:

1. ulazne organe ili uvođenje podataka;
2. program;
3. aritmetičke organe;
4. organe pamćenja ili memoriju;
5. izlazne organe, koji daju rezultate računanja u lako upotrebljivom obliku.

Ulazni organ ili uvođenje podataka. Najjednostavniji postupak za uvođenje potrebnog podatka u računar je *bušena (perforirana) kartica*, koju je 1889. pronašao Holerit (Hollerith), ali čije poreklo, nesumnjivo, potiče od Žakara (Jacquard). Bušena kartica, koja može da se zameni perforiranom trakom, predstavlja prirodni posrednik između našeg uobičajenog načina izražavanja i binarnog sistema. I zaista, za svaki od ovih slučajeva, postoje samo dva moguća stanja: *biti perforiran* ili *ne biti perforiran*. Čitanje informacija upisanih na karticu ili perforiranu traku ranije se obavljalo pomoću mehaničkih šiljaka, zatim pomoću četkica koje, prolazeći kroz otvore na karticama ili traci, ostvaruju

izvestan kratkotrajan kontakt za vreme prelaska svake rupe. Danas se čitanje obavlja pomoću svetlosnog snopa i fotoelektrične ćelije. Standardne perforirane kartice (184 × 82 mm) sadrže 996 binarnih cifara. One se čitaju brzinom od nekoliko stotina u minuti, što znači brzinom oko pet hiljada binarnih cifara u sekundi, što je znatno manje od mogućnosti aritmetičkog organa.

Da bi se računar bolje iskoristio, često se za uvođenje podataka koristi *magnetna traka*, na koju su preneseni binarni impulsi očitani sa kartica. Ova magnetna traka se odmotava brzinom 1,9 m u sekundi. U ovom slučaju, informacija se beleži u obliku magnetnog »znaka« od 0,1 mm sa razmakom 1 mm, koji označava cifru 1, dok odsustvo znaka odgovara cifri 0. Na traci dužine 730 m, sa prečnikom kalema 28 cm, moguće je ubeležiti više od 30 miliona binarnih cifara. U ovom slučaju, brzina očitavanja dostiže 90 000 binarnih cifara u sekundi.

Za uvođenje podataka, vrlo često se koristi *perforirana traka teleprintera* sa 5 ili 7 redova rupa. Perforator sa tastaturom omogućuje ručno bušenje trake. Decimalne cifre, naznačene na dirkama, perforišu se na traci prema binarnom kodu. Deo decimalne binarne konverzije obavlja se automatski za vreme bušenja trake.

Neki ordinatori, posebno namenjeni za rad u računovodstvu, snabdeveni su uređajima koji im omogućuju da sa originalnih finansijskih dokumenata čitanju *brojeve upisane pomoću magnetnog mastila.* S obzirom da upotrebljene cifre imaju oblik kao i uobičajene cifre, mogu se čitati podjednako dobro čovečjim okom kao i magnetnim pretvaračem, što predstavlja ogromnu prednost upotrebe računara.

Drugi postupci, u toku razvoja, treba da omoguće čitanje karaktera otkucanih pisaćom mašinom. Neki istraživači su, čak, dobili ohrabrujuće rezultate za čitanje rukom pisanih karaktera.

Program. Stotine ili hiljade instrukcija koje se odnose na skup aritmetičkih ili logičnih operacija koje treba da izvrši računar, obrazuju program. Naravno da pravljenje programa računara ima osnovni značaj. Ova operacija se naziva *programiranje.* Kako se račun obavlja pomoću računara, ceo pripremni rad pada na *programera*, koji treba da objedini ozbiljno poznavanje matematike u smislu matematičke logike, sa istančanim osećanjem za analizu. Programiranje je dug i zametan posao. Zna se da jedan programer pripremi dnevno samo 30 do 40 instrukcija. Kako neka složena proračunavanja mogu zahtevati nekoliko hiljada instrukcija, to ona iziskuju višemesečni rad. Sam račun će biti izvršen za nekoliko časova rada računara.

Da bi se pojednostavila priprema programa, obično se jedan njegov deo poverava samoj mašini, vodeći računa da algebarski jezik ne sadrži nikakve dvosmislenosti i da se poštujući postojeća pravila koja se odnose na znake računskih operacija može lako rastaviti u sukcesivne delove. Dakle, potrebno je da računar u memoriji raspolaže potprogramima ili »kompilatorima« (program-prevodilac), koji se odnose na uobičajene matematičke funkcije kao: direktne ili inverzne trigonometrijske krive, hiperbolične krive, logaritme itd. U opštem slučaju, potprogrami se čuvaju u memoriji na spoljašnjem nosaču (perforirana ili magnetna traka) a potrebni delovi se prenose na traku koja prima niz instrukcija koje čine program.

Simbolički jezik. Da bi se olakšalo pisanje programa, programer raspolaže posebnim kodom, takozvanim *simboličkim jezikom*, što je moguće sličnijim uobičajenom jeziku, a koji ujedno omogućuje da se opišu sve radnje koje treba da izvrši računar. Postoji više simboličkih jezika. Jedan od najrasprostranjenijih naziva se »fortran« (*FORmule TRANslation)*, stvoren od strane IBM. Rečnik fortran je vrlo opširan, pošto njegov potpuni program-prevodilac sadrži više od 200 000 instrukcija.

Postojanje više simboličkih jezika predstavlja ozbiljnu nezgodu, pošto promenom računara biblioteka potprograma postaje neupotrebljiva. Da bi se ovaj nedostatak otklonio, međunarodna komisija konstruktora i korisnika računara odlučila je 1957. da se stvori univerzalan simbolički jezik, namenjen naučnim proračunima. Ovaj jezik je nazvan »algol« *(ALGOrithmic Language)*.

Drugi jezik namenjen računarima za upravljanje je isto tako u toku svog stvaranja i nazvan je »kobol« *(COmmon Bussines Oriented Language)*.

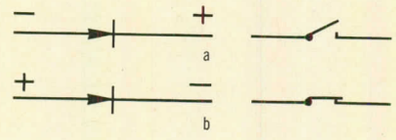
Usvajanje opšteg simboličkog jezika, što još nije postignuto, označiće veliki progres jer će omogućiti razmenu informacija između računara, od kojih bi neke mogle, na primer, da koriste program drugih računara ili, nasuprot, da za njih obavljaju neke operacije.

U oblasti komuniciranja između čoveka i računara u toku su proučavanja koja bi omogućila da se mašini pomoću mikrofona daju usmene instrukcije za rad. Obrnuto, probe ukazuju na mogućnost da računar saopšti rezultate svojih proračuna preko zvučnika, pri čemu bi elementi potrebnih rečenica bili prethodno snimljeni na magnetnom dobošu ili bi se veštački proizvodili pomoću elektronskog sintetizera.

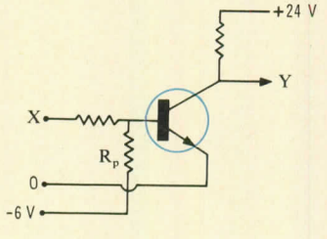
Aritmetički organi. Obavljanje različitih aritmetičkih operacija pogodnim naponskim impulsima koji predstavljaju binarne brojeve, zahteva veliki broj prekidačkih organa, koji su napravljeni od dioda ili tranzistora.

Prekidač sa diodama. Diode provode struju samo u smeru anoda — katoda. U suprotnom smeru struja je zanemarljiva i kaže se da je dioda *zakočena.* Prema tome, dioda može da obavlja zadatak prekidača, odnosno da zavisno od znaka dovedenog napona, otvara ili zatvara kolo (*sl.* 243). Ako se diodi dovede napon u smeru kao na slici 243a na izlazu neće postojati nikakav napon; ovo je binarni signal 0. Ali, ako se dovede napon u smeru kao na slici 243 b, on će se pojaviti na izlazu, što je binarni signal 1.

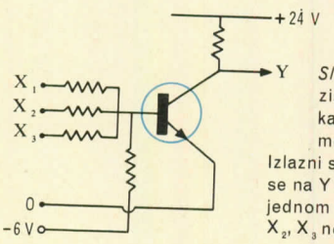
Pošto su nesavršeni pasivni elementi, diode deformišu signale koji kroz njih prolaze, naročito impulse sa strmom prednjom ivicom. Prema tome ograničen je broj dioda koje se mogu vezati na red, a u nekim slučajevima može biti potrebno da se koriste kola za uspostavljanje oblika signala.



Sl. 243. — Diodni prekidač:
a — dioda polarisana u *inverznom* smeru ponaša se kao otvoreni prekidač;
b — dioda polarisana u *direktnom* smeru ponaša se kao zatvoreni prekidač.



Sl. 244. Prekidačko kolo sa tranzistorom:
X — ulaz;
Y — izlaz.



Sl. 245. — Tranzistorsko kolo kao logički NI element. Izlazni signal pojavljuje se na Y samo ako ni na jednom od ulaza X_1, X_2, X_3 ne postoji signal.

Prekidač sa tranzistorima. Tranzistor može imati dva dobro definisana stabilna stanja: može da bude zakočen ili u zasićenju, što zavisi od struje baze tranzistora. Neka je NPN tranzistor povezan prema slici 244. S obzirom da nikakav napon nije doveden na ulaz X — što odgovara binarnom signalu 0 — baza se, preko otpornika R_p, nalazi na potencijalu izvora napajanja — 6 V, tranzistor je zakočen i napon kolektora iznosi +24 V. Ovaj napon odgovara izlaznom binarnom signalu 1. Ako se, nasuprot, posredstvom ma kakvog organa (prekidač, dugme na pritisak) dovede na ulaz X neki pozitivan signal — — što odgovara ulaznom signalu 1 — tranzistor prelazi u stanje zasićenja. Napon u tački Y praktično je na nultom potencijalu, što odgovara binarnom izlaznom signalu 0. Ukratko, kad se binarni signal 1 (pozitivan napon) dovede na bazu, na izlazu Y neće se pojaviti nikakav signal. U slučaju da se nikakav napon ne dovodi na bazu, pojavljuje se na izlazni binarni signal 1.

Ove dve mogućnosti date su u sledećoj tabeli:

Ulazni signal	Izlazni signal
1	0
0	1

Da bi se ostvarila funkcija prekidača, može se koristiti bilo PNP bilo NPN tranzistor. Pri današnjem stanju tehnike koriste se uglavnom silicijumski tranzistori tipa NPN.

Logička kola. Logičko kolo predstavlja prekidački sistem, čije stanje na izlazu zavisi u datom trenutku od kombinacije stanja primarnih promenljivih dovedenih na ulaz. Primarna promenljiva može da ima samo dva stanja 0 i 1. Takođe i na izlazu mogu postojati samo ta dva stanja 0 i 1, s obzirom da ona po definiciji odgovaraju prisustvu i odsustvu napona ili otvaranju i zatvaranju releja. Potencijali na ulazu i izlazu određeni su u odnosu na masu ili u odnosu na zajednički kondenzator više kola. Radi preglednosti principskih shema, mase se ne prikazuju na takvim shemama.

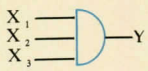
Logička kola odgovaraju različitim funkcijama Bulove algebre (Boole). I Bulova algebra koristi algebarske simbole, ali oni u njoj nemaju isto značenje kao u tradicionalnoj algebri. Tako — znak +, koji karakteriše obično sabiranje, izražava ono što se naziva *unija*, odnosno ILI. Prema tome, izraz X+Y izražava X ili Y, što znači bilo X bilo Y, a ne više X povećano za Y. Osnovne logičke funkcije koje, međusobnim kombinovanjem, omogućuju da se elektronskim putem ostvari rasuđivanje potrebno za proračun, su sledeće:

Funkcija ne. Ova funkcija realizovana je pomoću sheme na slici 244. Izlazni signal je uvek suprotan ulaznom signalu. Prema tome, to je funkcija *negacije* i često se naziva *komplementiranje*, a samo kolo *invertor.*

Funkcija ni. Osnovna shema tranzistorskog kola koje odgovara ovoj funkciji data je na slici 245. Ona je slična shemi sa slike 244, ali sadrži više ulaza X_1, X_2 i X_3. Izlazni signal pojavljuje se samo ako nema signala ni na jednom ulazu. Na taj način funkcija *ne* postala je funkcija *ni.* Sledeća tabela pokazuje dobijene signale na izlazu kola za moguće različite signale dovedene na ulaze:

X_1	X_2	X_3	Y
1	0	0	0
0	1	0	0
0	0	1	0
0	0	0	1

Obično se proizvođači opredeljuju za proizvodnju NI kola, smatrajući ih osnovnim, pošto se kombino-



Sl. 246. — Simbol koji predstavlja logički NI element: X_1, X_2, X_3 — ulazi; Y — izlaz.

vanjem identičnih NI jedinica, mogu ostvariti sve ostale logičke funkcije. Kompletna shema više desetina osnovnih kola mogla bi, usled svoje nepreglednosti, da predstavlja teškoću za čitanje i razumevanje. Prema tome, za izlaganja koja se ne odnose na sam sastav kola, osnovno kolo NI predstavlja se jednostavnim simbolom koji sadrži više ulaza i jedan izlaz (*sl.* 246).

Funkcija I. Funkcija I se dobija korišćenjem više NI kola. Koristi se samo po jedan ulaz svakog NI kola, dok se njihovi izlazi vode na ulaze sledećeg NI kola (*sl.* 247). U ovim uslovima, signal 1 pojaviće se na izlazu Y samo ako sva tri ulaza X_1, X_2 i X_3 jednovremeno primaju binarni signal 1. Sledeća tabela prikazuje signale koji se pojavljuju na pojedinim izlazima u zavisnosti od mogućih signala dovedenih na ulaz.

X_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2	Y_3	Y
0	0	0	1	1	1	0
1	0	0	0	1	1	0
0	1	0	1	0	1	0
0	0	1	1	1	0	0
1	1	0	0	0	1	0
0	1	1	1	0	0	0
1	0	1	0	1	0	0
1	1	1	0	0	0	1

Funkcija ILI. Da se dobije funkcija ILI, dovoljno je da se poveže izlaz jednog NI kola na ulaz sledećeg NI kola koje obrće izlazni signal prvog. Ova kombinacija predstavlja inkluzivno ILI kolo, što se može iskazati sa ; ili jedan, ili drugi, ili svi (*sl.* 248). Sledeća tabela daje sve mogućnosti koje mogu nastati:

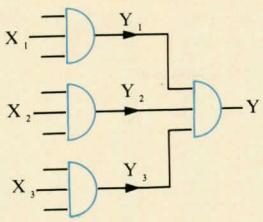
X_1	X_2	X_3	Y_1	Y
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
0	1	0	0	1
0	0	1	0	1
1	1	0	0	1
0	1	1	0	1
1	0	1	0	1
1	1	1	0	1

Funkcija ILI može se takođe ostvariti pomoću dioda prema shemi na slici 249. U direktnom smeru diode predstavljaju samo malu impedansu i kroz njih može da teče relativno velika struja. U suprotnom smeru one predstavljaju vrlo veliku impedansu.

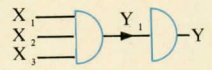
Na slici 250. prikazano je kako se može ostvariti funkcija ILI povezivanjem dioda i jednog elementa NI. Ova shema omogućuje da se poveća broj ulaza.

Funkcija pamćenja. Ova funkcija može da se uporedi sa funkcijom koja se dobija pomoću elektromagnetnog relea, čiji jedan kontakt uključuje sopstveno napajanje dejstvom signala »start«. Drugo rele prekida sopstveno napajanje pri dovođenju signala zaustavljanja »stop« (*sl.* 251).

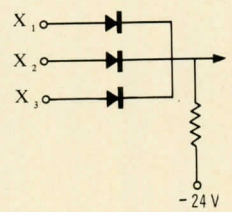
Funkcija pamćenja dobija se pomoću sheme na slici 252. U početku, prekidači »start« i »stop« su u mirnom stanju. Izlazni signal Y ima binarnu vrednost 0. Zatvaranjem kontakta »start« na prvom elementu, stvara se signal 1 na ulazu, usled čega se takođe pojavljuje binarni signal 1 na izlazu Y. Ovaj signal, doveden na ulaz prvog elementa, zamenjuje signal »start«, koji sada može i da se ukloni. Signal 1 postoji na izlazu Y sve dok se signal »stop« ne dovede na ulaz drugog elementa. Usled toga izlazni signal Y postaje 0 i, pošto nijedan ulaz prvog elementa ne prima signal, izlazni signal definitivno i ostaje 0. Donja tabela pokazuje uticaj različitih signala pre, za vreme i posle pritiska na prekidače.



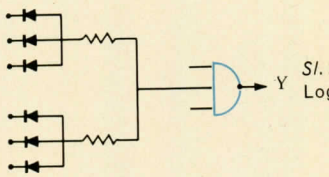
Sl. 247. — Logička funkcija I.



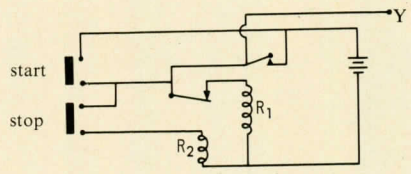
Sl. 248. Logička funkcija ILI.



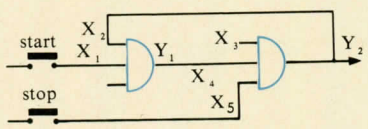
Sl. 249. Logička funkcija ILI ostvarena diodama.



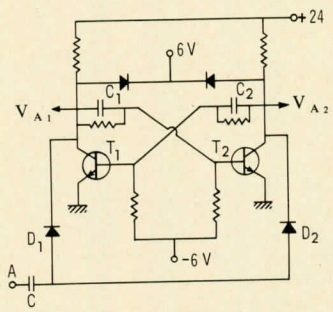
Sl. 250. Logička funkcija ILI.



Sl. 251. — Memorija ostvarena sa dva elektromagnetna releja R_1 i R_2. Relej R_1 je privučen pritiskom tastera »start« i na izlazu Y pojavljuje se signal. Pritisak tastera »stop« privlači R_2 i otpušta R_1. Signal na Y nestaje.



Sl. 252. — Funkcija »memorije« ostvarena sa dva NI elementa i tasterima »start« i »stop«.



Sl. 253. Bistabilni multivibrator: A — ulazni kraj; C — kondenzator za blokiranje jednosmernog napona; T_1, T_2 — tranzistori; D_1, D_2 — diode za zaustavljanje inverznih impulsa; C_1, C_2 — sprežni kondenzatori; V_{A_1}, V_{A_2} — izlazni krajevi.

Start	Stop	X_1	X_2	Y_1	X_3	X_4	X_5	Y
0	0	0	0	1	1	1	0	0
1	0	1	1	0	0	0	0	1
0	0	0	1	0	0	0	0	1
0	1	0	0			1	1	0
0	0	0	0	1	1	1	0	0

Bistabilni organi. Instrukcije koje obrazuju program, podaci o problemu, rezultati aritmetičkih operacija zabeleženi su u binarnom obliku u »registrima« koji se najčešće sastoje od tranzistorskih kola koja imaju dva stabilna stanja. *Bistabilna kola* se obično koriste da, zavisno od stanja u kome se nalaze, spreče ili omoguće neke operacije ili da se odredi put signala. Na slici 253. prikazana je osnovna shema dvostabilnog kola. Ovo kolo se sastoji od bistabilnog multivibratora, čiji je jedan tranzistor zakočen, dok je drugi u zasićenju. Ako je u početku tranzistor T_1 u zasićenju, a tranzistor T_2 zakočen, dovođenjem pozitivnog impulsa na ulaz A izazvaće se promena stanja, tj. prebacivanje kola. Dovedeni impuls prolazi kroz diodu D_1, stiže na kolektor tranzistora T_1, zatim preko sprežnog kondenzatora C_1 dolazi na bazu tranzistora T_2. Usled ovog impulsa tranzistor T_2 počinje da provodi struju, njegov kolektor postaje praktično spojen na masu, tako da baza tranzistora T_1 postaje negativna, usled čega se tranzistor T_1 koči. Baza tranzistora T_2, pošto je vezana za kolektor tranzistora T_1, nalazi se na pozitivnom naponu koji održava tranzistor T_2 u provodnom stanju čak i posle završetka upravljačkog impulsa. Kondenzator C sprečava prolaz jednosmerne struje koja bi mogla da potiče iz izvora impulsa. Diode D_1 i D_2 sprečavaju da negativan deo impulsa proizvede ponovnu promenu stanja kola. Štaviše, one sprečavaju da se nagle promene napona kolektora, koje nastaju za vreme prebacivanja, pojave u tački A i time utiču na red različitih upravljačkih kola.

Organi memorije. Računari obavezno sadrže organe nazvane »memorija«, koji se koriste za smeštaj informacija, za njihovo beleženje i uspostavljanje u pravom momentu. U praksi, ove memorije su gotovo uvek magnetnog tipa. Ipak treba napomenuti upotreba dinamičkih memorija ili *linije za kašnjenje* sa ultrazvukom. One su obrazovane od štapića nikla ili kvarca, ili pomoću živinih cevi u kojima se električni impulsi pretvaraju u ultrazvučne impulse koji se kreću relativno smanjenom brzinom. Impulsi mogu da pređu liniju za kašnjenje više puta. Tako je moguće uskladištiti pojedinačne rezultate da bi se kasnije uzeli u proračun.

Postoje različiti tipovi magnetnih memorija: trake, diskovi, doboši ili jezgra. Osnovni element se sastoji od fero-magnetnog materijala, koji može da se namagnetiše na dva različita stabilna stanja; jedno od mogućih stanja predstavlja nulu, a drugo jedinicu. Tako svaki element može da čuva jedan bit informacije.

Magnetna traka. Ove trake se koriste kao pomoćne memorije. Njihovo vreme pristupa je reda nekoliko sekundi. Magnetna traka dužine 100 m ima kapacitet smeštaja nekoliko desetina miliona bita (20 bita po milimetru) i do trideset kanala po širini trake. Brzina kretanja trake može da dostigne 5 m/s.

Magnetni diskovi. Ovi diskovi, čiji broj može da dostigne više desetina u savremenom računaru, imaju debljinu 1 — 2 mm i prečnik 60 — 90 mm. Obe njihove strane prevučene su magnetnim slojem. U svaki disk može se smestiti 600 000 bita. Vreme pristupa informacije je reda 800 ms.

Magnetni doboši. Prečnik ovih doboša može da iznosi 100 — 400 mm, a visina 100 — 600 mm. U njih se može smestiti nekoliko miliona bita. Vreme pristupa kreće se od nekoliko mikrosekundi do nekoliko desetina mikrosekundi.

Magnetna jezgra. Feritna jezgra sa spoljašnjim prečnikom oko 2 mm koriste se za pravljenje kvadratnih ili pravougaonih matrica. Namotaji se prave jednostavnim provlačenjem žica kroz jezgra, poređana u redove i kolone matrice. Žica, nazvana *žica za čitanje*, prolazi redom kroz sva jezgra i

omogućava da se pri ispitivanju matrice sazna stanje svakog jezgra (*sl.* 254). Stanje nekog jezgra se saznaje jednovremenim dovođenjem negativnog impulsa na odgovarajući red u kolonu matrice. Ako je jezgro u stanju 0, ne indukuje se nikakav napon u žici za čitanje. Naprotiv, ako je jezgro u stanju 1, ono naglo prelazi u stanje 0 i brza promena njegovog fluksa indukuje napon u žici za čitanje. Vidi se da čitanje stanja 1 menja ovo stanje, i da se ono mora obnoviti ako informaciju treba sačuvati. Prave se matrice sa nekoliko hiljada jezgara, sa vremenom pristupa reda mikrosekundi. Veliki računari, zahvaljujući feritnim memorijama sa brzim pristupom, mogu imati kapacitet smeštaja od milion bita.

Izlazni organi. Posle izvršenog računanja, dobijene rezultate treba eventualno pretvoriti u decimalne brojeve i dostaviti korisniku u vidu perforirane kartice ili trake ili neposredno u jasnom obliku odštampati na hartiji pomoću mašine koja se naziva *teleprinter* ili *štampač*. Binarno-decimalna konverzija obavlja se posredstvom potprograma i signali dobijeni posle konverzije upravljaju radom teleprintera, često posredstvom perforatora trake. Vrlo velika brzina rada organa za računanje zahteva, takođe, brz rad izlaznih organa. To je razlog što su napravljeni posebni štampači. Snabdeveni binarno-decimalnim dekoderom, ovi štampači primaju izlazne binarne impulse računskih organa, pretvaraju ih u decimalne cifre ili u slova azbuke i »kucaju« ih pomoću šiljaka koji dolaze u dodir sa elektroosetljivom hartijom. Najmodernije mašine ove vrste mogu odštampati 300 karaktera u sekundi.

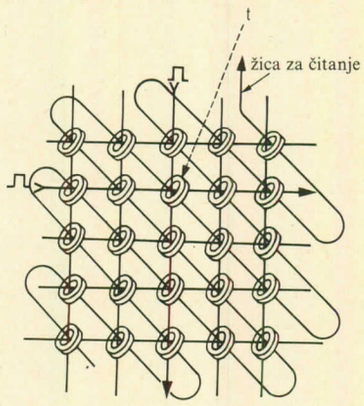
PRIMENA NUMERIČKIH RAČUNARA. Numerički računari imaju sve veći značaj usled univerzalnosti svojih primena. Naime, smatra se da se oni mogu upotrebiti u najraznovrsnijim oblastima, bilo da su to matematički, tehnički, statistički ili ekonomski proračuni. S druge strane, primenama koje se nisu predviđale u početku, moglo se pristupiti samo zahvaljujući posebnim osobinama logičkih kola. I zaista, ova kola se ponašaju kao da imaju neku vrstu *veštačke inteligencije* koja izvanredno brzo daje rezultate upoređivanja velikog broja podataka.

Upravljanje industrijskim procesima. Digitalni računar, zajedno sa elementima za analogno-digitalnu i digitalno-analognu konverziju, omogućuje da se obezbedi neprekidna kontrola procesa proizvodnje, u stanju je da iskaže vrednost različitih promenljivih, da brzo obavi složene proračune i da izda svrsishodna naređenja zavisno od programa koji često sadrži i više promenljivih. On obezbeđuje automatski rad, koji trenutno reaguje na promene različitih promenljivih. Na ovaj način, ostvaruje se *optimizacija* nekog procesa proizvodnje. Termičke centrale, fabrike hemijskih proizvoda mogu da budu upravljane pomoću ordinatora, koji postaju bitni elementi za proširenje automatizacije u širokom industrijskom području.

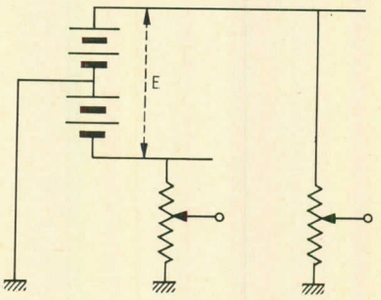
Automatska dokumentacija. Računari se mogu iskoristiti za biranje informacija i traženje dokumenata. Kartoteke na izbušenim karticama mogu se potpuno ispitati za nekoliko minuta. Najvažnije kartoteke mogu se preneti na magnetnu traku i »pročitati« brzinom od 60 000 slova u sekundi. Tako se, posle ispitivanja više hiljada referenci za nekoliko minuta dobijaju sređene bibliografske liste.

Bibliografska istraživanja. Ordinatori se koriste za analizu teksta, posebno za pravljenje pregleda upotrebljenih izraza, određujući koliko se puta pojedina značajna reč u nekom delu ponavlja i u kojim odeljcima. Na taj način se može sagledati neka važna karakteristika stila pojedinih autora. Upoređenje ovakvih indeksa različitih izdanja omogućuje da se utvrdi njihovo poreklo i njihova hronologija. Može se, takođe, ispitivati skup reči u nekom izdanju, što predstavlja veliku korist za proučavanje stranih tekstova i olakšava obnavljanje teksta koji je bio izmenjen čestim prepisivanjem.

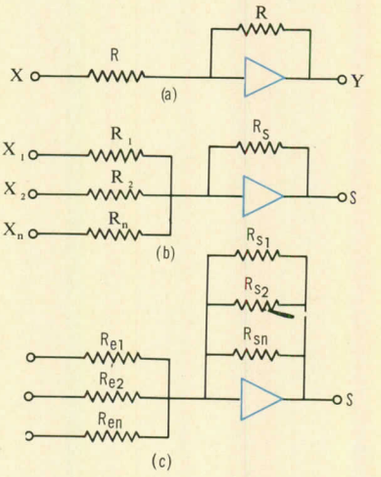
Prevođenje sa različitih jezika. Američki ordinator je 1954. prevodio jedan ruski tekst na engleski jezik,



Sl. 254. — Matrična memorija sa feritnim jezgrima.



Sl. 255. — Napajanje potenciometra za zadavanje podataka stabilisanim izvorom napona E.



Sl. 256. — Osnovna kola operacionog pojačavača: X — ulaz pojačavača; Y — izlaz pojačavača; R — otpornost ulaznog kola; R_S — otpornost povratne sprege. (Elementi X_1, X_2,..., X_n, R_1, R_2,..., R_n, R_{S_1}, R_{S_2},..., R_{Sn} odgovaraju različitim komponentama koje čine pojačavač.)

pri čemu je koristio rečnik od 250 reči. Dobijeni rezultat, mada veoma daleko od savršenstva, dozvolio je da se smatra da je moguće automatsko prevođenje. Savremene mašine za prevođenje daju zadovoljavajuće rezultate. Pomoću elemenata nađenih u rečniku i pravila sintakse koje imaju u memoriji, one vrše pravu logičku analizu izraza koje prevode, pri čemu u prevodu obrazuju logičke rečenice. Takve mašine daju prevod tehničkog teksta koji je odmah upotrebljiv. Međutim, u današnje vreme, izgleda da nije moguće pomoću računskih mašina izvršiti dobar prevod literarnih i poetskih tekstova.

ANALOGNI RAČUNARI

Fizika nastoji da pojave različitih priroda koje proučava predstavi u matematičkom vidu. Kad su dve pojave opisane sličnim matematičkim izrazima, odnosno kada između njih postoji analogija, u proučavanoj pojavi mogu se očekivati analogne osobine druge pojave. Računari ili analogne mašine ostvaruju matematičke modele fizičkih sistema, koji omogućuju njihovo proučavanje. Fizičke veličine su predstavljene pomoću srazmernih električnih napona i struja, i matematičke operacije se obavljaju na električnim veličinama pomoću pogodnih električnih ili elektronskih kola. Da bi se rešio neki sistem jednačina, elementi upotrebljenih kola se biraju i povezuju tako da rad ovih kola bude analogan radu fizičkog sistema koji je određen istim sistemom jednačina.

STRUKTURA ANALOGNIH RAČUNARA. Analogni računar sadrži skup kola koja omogućuju sledeće operacije:

— zadavanje problema,
— kontrolu kola,
— izvršenje računa,
— dobijanje rezultata.

Zadavanje problema. Ulazi i izlazi pojačavača povezani su na jednu ili više komandnih tabli, na koje se mogu postaviti promenljivi elementi (potenciometri, otpornici, kondenzatori) sa podesno izabranim vrednostima. Posebni gajtani omogućuju međusobno povezivanje različitih elemenata računara, čime se obrazuje kolo za računanje. Veličine koje određuju podatke, predstavljene su naponima potenciometra za zadavanje vrednosti. Ovi potenciometri se napajaju iz stabilisanog izvora napona E, čija je srednja tačka obično vezana za masu (*sl.* 255). Na taj način, unapred usvojeni naponi na klizačima potenciometra mogu biti pozitivni ili negativni u odnosu na masu.

Kontrola kola. Aparati za merenje, preklopnici i svetlosni signali omogućuju brzu kontrolu vrednosti električnog napona u različitim tačkama kola za računanje.

Izvršenje računa. Bitne elemente kola za računanje čine jednosmerni pojačavači, nazvani *operacioni pojačavači*. Ulazi i izlazi ovih pojačavača sadrže po dva izvoda, od kojih je jedan vezan na masu. Ulazna impedansa operacionog pojačavača mora da bude vrlo velika, a izlazna impedansa vrlo mala, tako da je ulazna struja zanemarljiva, a izlazni napon praktično nezavisan od struje kola opterećenja.

Pojačavanje pojačavača treba da bude vrlo veliko, reda 10^6, ali je njegova bitna osobina linearnost pojačanja. Simbol operacionog pojačavača prikazan je na slici 256 a. Tri osnovne sheme sa operacionim pojačavačem prikazane su na slici 256. Dobijeni izlazni naponi za ove tri sheme dati su u sledećoj tabeli.

Kombinovanjem operacionih pojačavača i pasivnih elemenata ostvaruju se kola sposobna da obavljaju različite računske operacije. Mali računar sadrži desetak pojačavača, dok ih veliki mogu imati i nekoliko stotina.

• *Sabiranje*. Operacija sabiranja se obavlja pomoću kola čija je shema prikazana na slici 256 b, ali se za različite ulaze koriste potenciometri za zadavanje koeficijenata k_1, k_2, k_3 (*sl.* 257). Izlazni napon je dat izrazom:

$$Y = -\frac{1}{k}\left(X_1 k_1 \frac{R_s}{R_{e1}} + \ldots + X_n k_n \frac{R_s}{R_{en}}\right),$$

gde je k unapred usvojen deo napona na potenciometru opterećenja P.

SHEMA	NAPON NA IZLAZU Y
a	$S = -E \cdot \frac{R_S}{R_e}$
b	$S = -\left(E_1 \frac{R_S}{R_{e1}} + E_2 \frac{R_S}{R_{e2}} + \ldots + E_n \frac{R_S}{R_{en}}\right)$
c	$S = -\left(\frac{E_1}{R_{e1}} + \frac{E_2}{R_{e2}} + \ldots + \frac{E_n}{R_{en}}\right) \cdot \frac{1}{\frac{1}{R_{S1}} + \frac{1}{R_{S2}} + \ldots + \frac{1}{R_{Sn}}}$

• *Promena znaka.* Za promenu znaka koristi se shema data na slici 256 a, u kojoj je ostvareno Rs=R — R. U tom slučaju Y= — X, odnosno izvršena je promena znaka.

• *Integriranje.* Stavljajući kondenzator u kolo povratne sprege operacionog pojačavača, ostvaruje se shema integratora (*sl.* 258). Izlazni napon je dat izrazom:

$$Y = -k \frac{1}{RC} \int X \, dt .$$

• *Diferenciranje.* Ako u shemi na slici 258. otpornik R i kondenzator C promene mesta, dobija se kolo za diferenciranje (*sl.* 259). Otpornost *r* se dodaje radi stabilizacije kola, koje bi inače imalo težnju da osciluje. Povezivanjem osnovnih operatora, praktično je moguće rešiti sistem linearnih, algebarskih ili diferencijalnih jednačina.

Dobijanje rezultata. Rezultati računanja mogu se očitati ili pomoću mernih aparata ili su najčešće, zabeleženi na papiru. Neki računari koriste kao izlazni organ osciloskop, na kome se prikazuje kriva proučavane jednačine. Kad je rezultat proračuna jednostavna numerička vrednost, ona može biti prikazana pomoću numeričkog (digitalnog) voltmetra, koji je ponekad povezan sa štampačem.

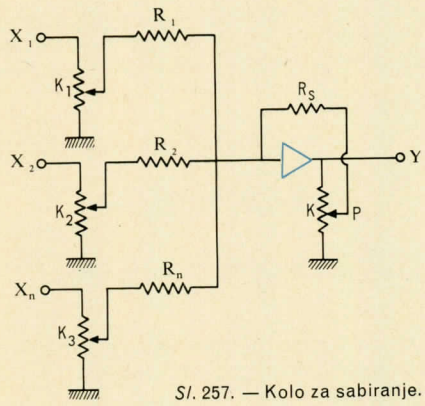
PRIMENE ANALOGNIH RAČUNARA. Analogni računari posebno su podešeni za proučavanje dinamičkog ponašanja složenih sistema, među kojima treba navesti:

— proučavanje servomehanizama i sistema za regulaciju;

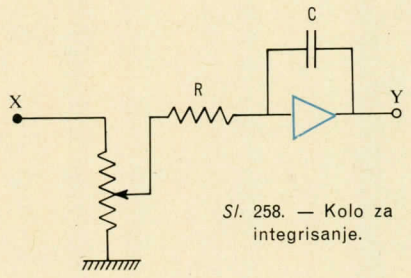
— proučavanje dinamike hemijskih reakcija, a posebno dinamike procesa nuklearnih reaktora;

— proučavanje mreža prenosa i raspodele električne energije;

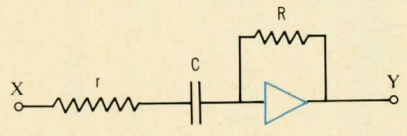
— proučavanje problema vešanja i prigušenja elastičnih sistema.



Sl. 257. — Kolo za sabiranje.



Sl. 258. — Kolo za integrisanje.



Sl. 259. — Kolo za diferenciranje.

TAČNOST ANALOGNIH RAČUNARA. Uprkos svim naporima pri proizvodnji potenciometara, oni ipak ne mogu biti strogo linearni. Isti je slučaj i sa pojačanjem pojačavača. Karakteristike pojačavača uvek odstupaju od njihove teorijske definicije: ulazna impedansa nikada nije beskonačna, a izlazna impedansa nije nikada jednaka nuli. Iz ovoga proizlazi da je tačnost analognih računara uvek ograničena i da zavisi od osobina upotrebljenih kola. U praksi se može smatrati da je tačnost analognih računara reda 1%, što je za većinu primena potpuno dovoljno.

SIMULATORI

Povezivanje realnih elemenata i računara omogućuje ostvarivanje simulatora, budući da su stvarni elementi svoja sopstvena analogija u računskom lancu. Na taj način se može proučiti ponašanje nekog složenog uređaja pre nego što bude napravljen. Delovanjem na izvesne promenljive elemente moguće je izvršiti eksperimentalno podešavanje mehanizama, čije bi teorijsko proučavanje bilo suviše složeno ili suviše dugotrajno. Najzad, simulatori omogućuju da i osoblje sa manjim stručnim obrazovanjem može da obavlja složenije poslove. Ovi uređaji se sve više koriste i u industriji, gde donose znatnu uštedu vremena i sredstava, pri podešavanju uređaja sa višestrukim parametrima.

BUDUĆNOST RAČUNARA

Razvoj mikrominijaturizacije prouzrokuje i brz razvoj tehnologije računara. Zamena klasičnih komponenata mikrokomponentama omogućuje izgradnju modula koji izvršava posebnu funkciju. Sledeći korak je zamena modula *integrisanim kolima*, čija se tehnika zasniva na pravljenju celog kola na jednoj silicijumskoj pločici. Pomoću fotografskih maski, različiti aktivni delovi se, postupkom difuzije primesa, pretvaraju u diode, trazistore ili otpornike. Novija tehnika, u toku razvoja, sastoji se u nanošenju komponenata, veza i otpornika u obliku tankog sloja na izolatorski omotač, budući da su mikrotranzistori već napravljeni na istom nosaču. Ove nove tehnike omogućuju, smanjivanjem dužina veza, da se postigne izvanredno velika brzina prebacivanja koja je, npr., reda nanosekunde ili čak desetog dela nanosekunde.

Automatizovana proizvodnja integrisanih kola ima za posledicu osetno smanjivanje cene ovih elemenata, a time i cene računara, čija se oblast primene sve više proširuje.

Preveo **Nenad Milojević** **Jean DUSAILLY**

Telekomunikacije

UVOD

Prema definiciji Međunarodne konvencije o telekomunikacijama, oblast telekomunikacija obuhvata »svaki prenos, predaju ili prijem znakova, signala, pisanih informacija, slika, zvuka ili svih vrsta obaveštenja ostvarenih žičnim putem, radio-prenosom, optičkim ili nekim drugim elektromagnetnim sistemima«. Mada ovako definisana oblast obuhvata tehnike radio-difuzije, televizije, radara itd., ipak ove tehnike više pripadaju poglavlju posvećenom elektronici i ovde će se razmatrati samo problemi koji se odnose na telefoniju i telegrafiju, uključujući i prenos slika i razvoj prenosa podataka, još nove tehnike, ali sa velikom perspektivom. Prema tome, ovde će biti razmatrani problemi u užem, klasičnijem smislu pojma »telekomunikacije«. Uostalom, potrebno je navesti da se telefonija i telegrafija već davno oslanjaju na elektroniku i da elektronika, čiji značaj postaje sve veći, predstavlja važan činilac u njihovom razvoju.

Telefonija, telegrafija, a danas i prenos podataka, u stvari predstavljaju paralelne tehnike koje se nalaze u neprekidnom razvoju koristeći različita sredstva: širenje automatske komutacije, razvoj tehnike prenosa pomoću koaksijalnih kablova i radio-relejne veze, ostvarivanje veza pomoću veštačkih satelita itd. Sa više od 180 miliona telefona u upotrebi na celoj Zemljinoj kugli krajem 1964. telefonija ostaje najznačajnije sredstvo veze i prenosa, na koje se oslanjaju tri pomenute tehnike. Danas kao i u prošlosti, telefonija nastavlja sa neprekidnim razvojem, što joj obezbeđuje vodeće mesto u oblasti telekomunikacija.

Telefonija

TELEFONSKI APARAT

Telefonski aparat ima dvojaku ulogu: da vrlo malu akustičnu energiju govora pretvori u električnu energiju i, obrnuto da, kao prijemni organ, električnu energiju pretvori u akustičnu energiju, koja stiže do uha pretplatnika.

Za kvalitet telefonske veze osnovni značaj imaju dva faktora: *osetljivost* svih elemenata koji učestvuju u ostvarenju prenosa, kao i osetljivost samog prenosa, i *vernost*, odnosno sposobnost prenosa zvuka bez izobličenja bar unutar frekventnog spektra govornih učestanosti. Iako je čovečje uho obično osetljivo na zvuk učestanosti 15 000 Hz, ipak se ostvaruje izvanredna vernost reprodukcije glasa prenosom učestanosti od 150 Hz do 5 000 Hz, pošto je u ovom opsegu koncentrisana gotovo celokupna energija čovečjeg glasa. Štaviše, eksperimentalno je pokazano da je dovoljno ispravno preneti frekventni opseg između 300 i 3 400 Hz da bi se ostvarila odlična telefonska veza, što, uostalom, i preporučuje Međunarodni savetodavni komitet za telefoniju i telegrafiju, C. C. I. T. T. (Comité consultatif international téléphonique et télégraphique). U stvari, prenos frekventnog opsega od 300 do 2 600 Hz već obezbeđuje razumljivu komercijalnu telefonsku vezu (npr., službene veze u železnici), što, naravno, nije dozvoljeno u javnom telefonskom saobraćaju.

ISTORIJAT I PRINCIPI TELEFONIJE. Amerikanac Gream Bel (Graham Bell) je 1876. godine usavršio prvi telefonski aparat. Na slici 1 prikazana je shema jednog od prvih aparata. Svaka od vibrirajućih membrana M_1 i M_2 nalazi se ispred permanentnog magneta. Kad korisnik govori ispred membrane M_1, ova vibrira i tako proizvodi promene magnetnog fluksa, koje u namotaju oko magneta indukuju struju govornih učestanosti. Prolazeći kroz namotaj oko magneta sagovorničkog aparata, ova struja stvara promenljivu magnetomotornu silu, koja deluje na membranu M_2 i prouzrokuje njeno vibriranje u ritmu membrane M_1, što izaziva reprodukciju govora prvog sagovornika. Oba uređaja su identična i očigledno imaju reverzibilne osobine, što znači da svaki od njih može naizmenično da služi kao predajni i prijemni organ. Vernost reprodukcije zvuka ovih aparata je veoma visoka, ali kako su dobijene promene fluksa veoma male, to se prenos može obezbediti samo na vrlo kratkim rastojanjima.

Zatim je, radi povećanja rastojanja prenosa, usvojeno rešenje koje se sastoji u prenosu struje govornih učestanosti nastale usled promene otpornosti otpornika samog kola, a ne usled promena magnetnog polja. Predajni organ ili *mikrofon*, u kome se proizvode ove promene struje, razlikuje se od prijemnog organa ili *slušalice*, čiji je princip ostao isti. Od tada su telefonski aparati sačuvali ovaj princip i proizvode se sa različitim mikrofonom i slušalicom (magnetnim i elektromagnetnim).

Savremeni mikrofoni podsećaju na model mikrofona sa čvrstim kontaktima, koji je Hjuz (Hughes) usavršio već 1877. godine. Slika 2 pokazuje shemu kola u kome se nalaze mikrofon ovog tipa i slušalica. Mikrofon i slušalica su priključeni na pretplatnički vod preko koga su napajaju jednosmernom strujom iz baterije E.

Ako ugljeni štapić, učvršćen između dva nosača od istog materijala, vibrira pod dejstvom zvuka, ova vibriranja izazivaju promene pritiska u tačkama dodira, odnosno promene u kolu. Struja govornih učestanosti se superponira sa jednosmernom strujom i samo promene struje izazivaju vibriranje membrane posredstvom promena fluksa u elektromagnetu slušalice. Međutim, ovakav mikrofon je nesavršen usled malog broja dodirnih tačaka. U savremenim mikrofonima (*sl.* 3) koriste se ugljena zrnca koja omogućuju znatno veći broj dodirnih tačaka. Ovaj mikrofon ima veliku osetljivost i relativno malu nabavnu cenu. I pored toga, zbog nelinearnosti njegove frekventne karakteristike u govornom opsegu od 300 do 3 4000 Hz, sve više ga potiskuju kvalitetniji mikrofoni, na primer, magnetodinamički i poluprovodnički.

PRINCIP RADA MIKROFONA. Pri uprošćenom razmatranju mikrofon se može posmatrati (*sl.* 4) kao generator naizmenične struje otpornosti r (srednja vrednost otpornosti), koji napaja potrošača radne otpornosti R (pretplatnički vod i slušalica). Promena pritiska na membrani prouzrokuje promenu dr otpornosti r, što za jačinu struje datu izrazom

$$I = \frac{E}{(R+r)}$$

odgovara promeni struje izraženoj sa

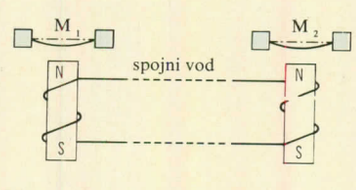
$$dI = -\frac{E}{(R+r)^2}\,dr.$$

Vodeći računa o vrednosti struje I, može se pisati:

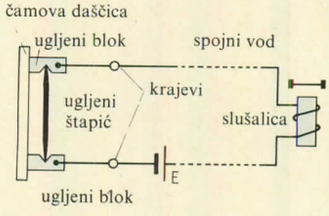
$$dI = -\frac{I}{R+r}\,dr.$$

I zaista, promene struje su proporcionalne promenama otpornosti mikrofona. Može se smatrati da slušalica praktično predstavlja otpornost potrošača R. U ovom slučaju, snaga primljena u slušalici jednaka je $R\,(dI)^2$, što, imajući u vidu gornji izraz za dI, daje:

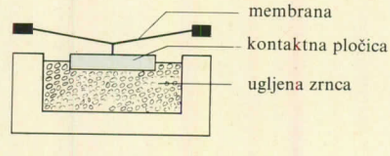
$$\frac{RI^2}{(R+r)^2}\,dr^2$$



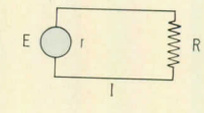
Sl. 1. — Belov telefonski aparat.



Sl. 2. — Hjuzov mikrofon.



Sl. 3. — Mikrofon sa ugljenim zrncima.



Sl. 4. — Električna shema mikrofona.

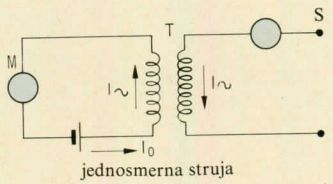
ili:

$$\frac{I^2}{\left(R+\frac{r}{R}\right)^2}dr^2.$$

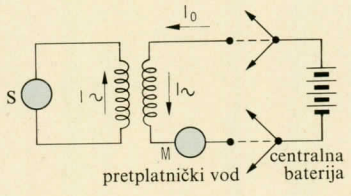
Snaga je maksimalna kad imenitelj ima najmanju vrednost, što znači kada je $r = R$. Ovde se ponovo sreće opštepoznata činjenica: da bi generator imao najveći stepen korisnog dejstva, njegova unutrašnja impedansa mora biti jednaku impedansi potrošača. Iz ovih razloga se umetanjem transformatora (induktivnog namotaja) vrši prilagođenje impedansi pretplatničkog voda i mikrofona. Bar u slučaju telefonskog aparata sa *lokalnom baterijom*, kod kojih se mikrofon napaja iz baterije (obično 3 V) koja se nalazi kod samog pretplatnika, prisustvo induktivnog namotaja potrebno je uostalom i iz drugih razloga. I zaista, ako se koristi dugačak vod čija otpornost nije zanemarljiva, mikrofon će se napajati vrlo malom strujom. Osim toga, postoji opasnost da baterije dva aparata koja su povezana bez transformatora, budu u opoziciji.

Za telefonski aparat sa *lokalnom baterijom* koristi se shema pokazana na *sl.* 5. Jednosmerna struja iz baterije moduliše se u ritmu govora pod dejstvom mikrofona M i samo tako nastala struja govornih učestanosti teče u pretplatnički vod, pri čemu induktivni namotaj T ima zadatak odvajanja i eliminisanja jednosmerne komponente. Kroz slušalicu, obično sa stalnim magnetom, ne protiče jednosmerna struja koja bi mogla da ga razmagnetiše.

U telefonskim aparatima sa *centralnom baterijom (sl.* 6) mikrofon se napaja pomoću baterije obično 48 ili 60 V, koja se nalazi u telefonskoj centrali. I u ovom slučaju, usled prisustva induktivnog namotaja, kroz slušalicu S protiču samo struje govornih učestanosti, dok kroz mikrofon M protiče i jednosmerna komponenta.



Sl. 5. — Principska električna shema telefonskog aparata sa lokalnom baterijom.

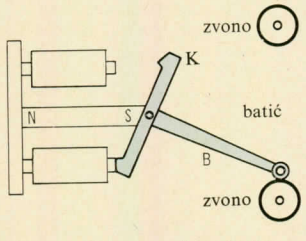


Sl. 6. — Principska električna shema telefonskog aparata sa centralnom baterijom.

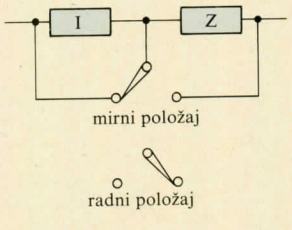
OPIS TELEFONSKOG APARATA. Telefonski aparati, prikazani na slikama 5 i 6, međusobno se povezuju posredstvom telefonskih centrala pretplatničkim vodovima koji se sastoje od po dva provodnika od bronze ili bakra.

Kod telefonskih aparata sa lokalnom baterijom pozivanje centrale ostvaruje se posredstvom »induktora« — generatora struje pozivne učestanosti. Posredstvom ručice okreće se rotor induktora između polova permanentnih magneta, čime se proizvodi naizmenična struja učestanosti od 16 do 25 Hz. Ova pozivna struja, preko pretplatničkog voda, pobuđuje u centrali odgovarajući posebni organ, tzv. *pozitivni rele*, koji poseduje svaki pretplatnik. Ovim se obaveštava osoblje u centrali o upućenom pozivu. Po prijemu poziva, telefonistkinja poziva traženog pretplatnika pomoću *polarizovanog zvona (sl.* 7), kojim je opremljen svaki telefonski aparat. Batić B povezan je sa kotvom K, koja je polarizovana pomoću stalnog magneta NS, na čije je polne nastavke postavljen namotaj vezan sa pretplatničkim vodom. Svaka poluperioda struje izaziva promenu smera magnećenja ovih polova, tako da svaki pol naizmenično privlači i odbija kotvu koja upravlja pomeranjem batića. Induktor I i zvono Z telefonskog aparata povezani su na red (*sl.* 8). Poseban prekidački uređaj omogućuje da se induktor isključi iz kola kada se telefon nalazi u stanju mirovanja i da se zvono kratko spoji kada se koristi induktor. Viljuška slušalice obično vrši ulogu ovog prekidača. U isto vreme ona zatvara ili otvara kolo baterije, već prema tome da li se aparat nalazi u radu ili ne. U slučaju aparata koji radi sa centralnom baterijom, jednostavnim »dizanjem« slušalice prouzrokuje se napajanje mikrofona, tj. prolazak struje kroz pretplatnički vod, što u telefonskoj centrali ima za posledicu paljenje lampice, odnosno pozivanje centrale.

Prvi telefonski aparati imali su odvojen mikrofon i slušalicu. U Francuskoj je razvijen model »slušalice« koja mehanički povezuje oba organa, gradeći »mikrotelefonsku kombinaciju«. (Uostalom, vrlo često se sreće dodatna nezavisna slušalica). Kad aparat ne radi, slušalica je obešena o kukicu ili je položena na viljušku. Podizanjem slušalice deluje se na opruge kojima se uspostavljaju različiti kontakti.



Sl. 7. — Princip rada polarizovanog zvona.



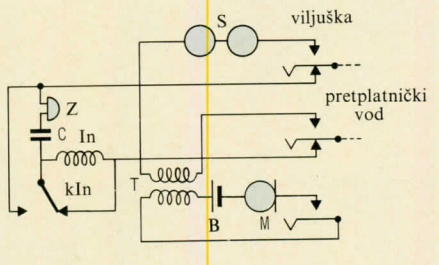
Sl. 8. — Shema induktora i zvona.

Tri opruge za upravljanje kontaktima aparata sa lokalnom baterijom predstavljene su u mirnom položaju na desnom delu slike 9. U posmatranom slučaju, samo je zvono Z vezano na oba provodnika pretplatničkog voda, pošto kondenzator C propušta samo naizmeničnu struju. Pri okretanju induktora In, dovodi se kontakt kIn u radni položaj, čime se omogućuje slanje pozivne struje preko pretplatničkog voda, dok je zvono Z kratko spojeno. Podizanjem slušalice, tri desne opruge dolaze u radni položaj, čime se na pretplatnički vod uključuje slušalica, a posredstvom transformatora T i mikrofon M, dok se induktor i zvono isključuju.

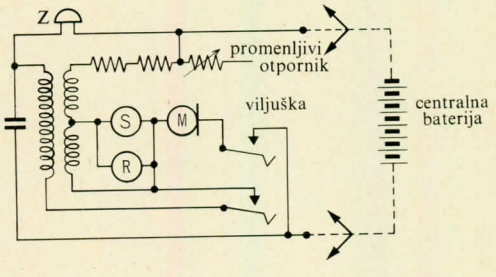
Telefonski aparati napajani iz lokalne baterije postepeno iščezavaju, dok se sve više koristi napajanje iz centralne baterije. Na slici 10 prikazana je shema takvog aparata. Kontakti viljuške prikazani su u mirnom stanju. Slušalica sa elektromagnetom ne sadrži permanentni magnet, već namotaj kroz koji teče jednosmerna struja. Podizanjem slušalice zatvaraju se kontakti viljuške, usled čega jednosmerna struja iz centralne baterije prolazi kroz mikrofon M i slušalicu S. Promenljivi otpornik, nacrtan na shemi, obezbeđuje pogodnu vrednost struje napajanja, nezavisno od dužine pretplatničkog voda. Transformator ovde ne služi za razdvajanje, već ima zadatak da prilagodi impedansu aparata sa impedansom pretplatničkog voda. Transformator sadrži tri namotaja, od kojih je jedan namenjen stvaranju »antilokalnog efekta«, što znači da sprečava da slušalica, ili slušalice, bude pod dejstvom efekta mikrofona ispred koga govori pretplatnik.

Pretplatniku koji je priključen na automatsku centralu (pri čemu se uvek koristi sistem sa napajanjem iz centralne baterije) treba omogućiti da prenese centrali *pozivni broj* pretplatnika s kojim želi da stupi u vezu. Prvi pretplatnik se naziva *pozivajući*, a drugi *pozvani*. Ova veza se uspostavlja podizanjem slušalice, pri čemu će se kroz liniju poslati ritmički impulsi jednosmerne struje. Svakoj cifri pozivnog broja odgovaraće broj uzastopnih prekida na pretplatničkom vodu, čiji je broj ravan biranoj cifri, pri čemu nuli uvek odgovara deset prekida. Korisniku se ne bi moglo poveriti stvaranje impulsa ručnim pokretanjem viljuške aparata, pošto bi ovako stvoreni impulsi bili neujednačeni po svom trajanju i pauzama između dva impulsa, što bi moglo da ima za posledicu da se umesto dve poslate cifre primi samo jedna cifra, koja odgovara njihovom zbiru (npr., cifre 2 i 5 mogu biti registrovane kao 7) ili bi se moglo dogoditi da jedna jedinstvena cifra bude primljena kao dve uzastopne cifre koje bi bile njeni sabirci (npr., da se 5 registruje kao 2 i 3).

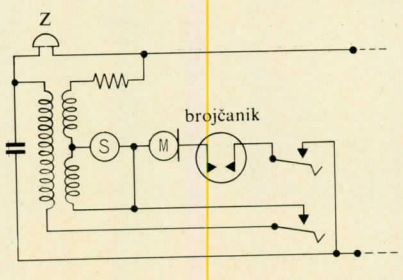
Prema tome, pretplatničkom aparatu je pridodat *brojčanik (sl.* 11) čiji je zadatak da cifre koje treba preneti pretvori u odgovarajuće povorke impulsa, pogodnog ritma i da svaku povorku impulsa odvoji od prethodne dovoljnim pauzama. U osnovi, brojčanik se sastoji od dve opruge postavljene na red sa linijom, tako da u mirnom stanju omogućuju proticanje struje. Okretanjem brojčanika zapinje se posebna opruga, čime se obezbeđuje vraćanje brojčanika u mirno stanje konstantnom rotacionom brzinom. Pri vraćanju brojčanika, s njim se okreće i zupčanik posebnog oblika, koji svojim delovanjem na opruge prekida



Sl. 9. — Shema telefonskog aparata sa lokalnom baterijom. (Kontakti su nacrtani u mirnom položaju.)



Sl. 10. — Shema telefonskog aparata sa centralnom baterijom. (Kontakti su nacrtani u mirnom položaju.)

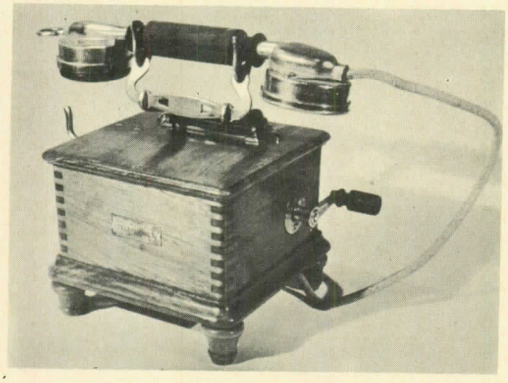


Sl. 11. — Shema telefonskog aparata sa centralnom baterijom sa pozivnim brojčanikom.

strujno kolo u određenom ritmu, stvarajući povorku impulsa koji odgovara samo jednoj cifri traženog broja.

Na slikama 12, 13. i 14. prikazani su neki tipovi telefonskih aparata koji pripadaju različitim vremenima i označavaju određene etape u evoluciji njihovog oblika.

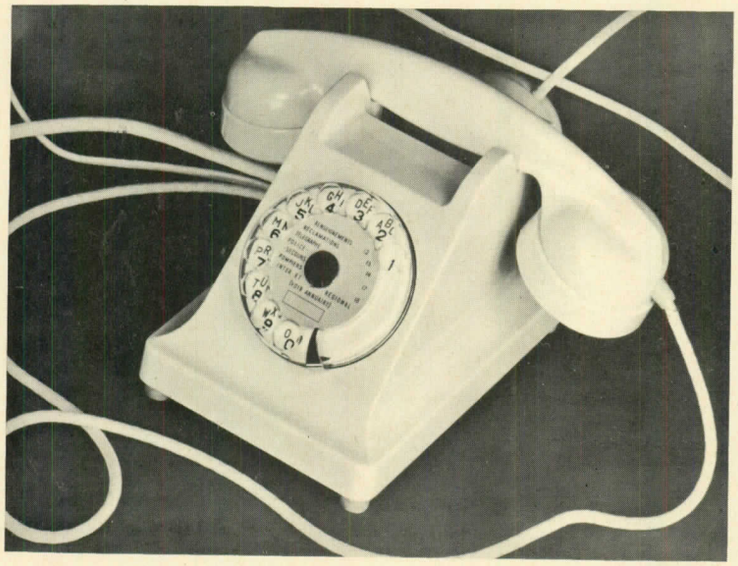
Na slici 15. prikazan je telefonski aparat namenjen za automatsku telefonsku mrežu nove koncepcije. Brojčanik je zamenjen tastaturom, pri čemu svaka dirka odgovara jednoj cifri, što omogućuje, po cenu znatne složenosti uređaja u centrali, razlikovanje raznovrsnih cifara pozivnih brojeva. Ovaj tip telefona se već unekoliko koristi a koristiće se još i više kada u većoj meri budu u upotrebi automatske centrale. Ovim će se omogućiti lakše i, posebno, brže biranje pozivnog broja.



Sl. 12. Model telefonskog aparata iz 1910.



Sl. 13. Prenosni telefonski aparat sa brojčanikom, model 1924.



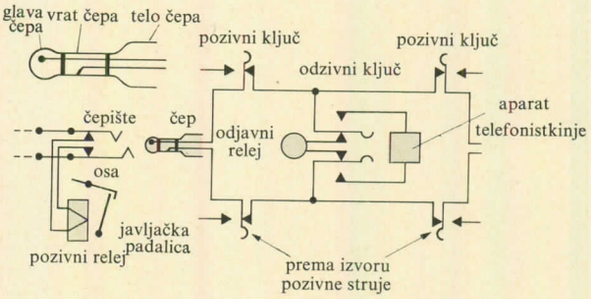
Sl. 14. — Prenosni telefonski aparat, model 1943.



Sl. 15. — Prenosni telefonski aparat sa tastaturom.

RUČNE TELEFONSKE CENTRALE

CENTRALE SA LOKALNOM BATERIJOM. Telefonski aparati sa lokalnom baterijom koriste se za telefone koji se, kako je već nagovešteno, napajaju električnom strujom iz baterija koje se nalaze kod samih korisnika. Pretplatnički vodovi dolaze do telefonske centrale, a dva pretplatnika povezuje telefonistkinja koja radi u *centrali*. Dva provodnika pretplatničkog voda završavaju se u centrali na dva kontaktna pera nejednake dužine, koji zajedno čine *čepište* (*sl.* 16), na koje je priključen *pozivni rele*, obično sa padalicom. Za povezivanje pretplatnika telefonistkinja se služi *dvožičnim gajtanima* koji se završavaju *čepovima*. Čepovi se sastoje od dva metalna, međusobno izolovana dela, od kojih je svaki povezan na jednu od žica dvožičnog gajtana; duži deo naziva se glava, a kraći vrat. Pomoću dvopolnog preklopnika, nazvanog *odzivni ključ*, telefonistkinja može svoj aparat da priključi na izvode svakog dvožičnog gajtana kojim raspolaže. Na isti način, kada joj je potrebno da pozove pretplatnika, posredstvom *pozivnog ključa* pripojiće svoj induktor na dvožični gajtan.



Sl. 16. — Princip rada centrale sa lokalnom baterijom.

Pozivno rele vezano za svaki pretplatnički vod, sastoji se od elektromagneta malih dimenzija koji, čim primi pozivnu struju izazvanu induktorom pozivaoca, privlačenjem svoje kotve prouzrokuje privlačenje i pad padalice. Ovaj signal, obično praćen zvučnim signalom, privlači pažnju telefonistkinje, koja ubacuje čep jednog od slobodnih dvožičnih gajtana u čepište pozivaoca, obara svoj odzivni ključ i tako stupa u vezu sa pozivajućim pretplatnikom koji joj saopštava traženi broj. Potom telefonistkinja ubacuje drugi čep iz istog para gajtana u čepište pozvanog pretplatnika i svojim pozivnim ključem, koji je u grani induktora, poziva traženog pretplatnika. Posle javljanja pozvanog pretplatnika, telefonistkinja ispravlja svoj odzivni ključ, čime je uspostavljena veza ova dva pretplatnika. Vraćanjem ključa — preklopnika u neutralni položaj omogućuje se prijem signala o završetku razgovora. Ovaj signal se prima pomoću *odjavnog relea* priključenog za ključ — preklopnik.

Skup svih radnji potrebnih da se uspostavi veza između dva pretplatnika naziva se *komutacija*; ona se ovde naziva *ručna* pošto u centrali zahteva neophodan rad telefonistkinje.

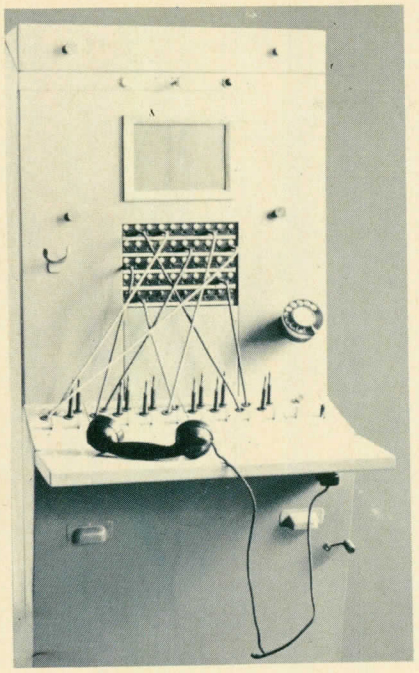
Pozivna relea i čepišta različitih pretplatnika, dvožični gajtani i pridruženi ključevi grupisani su na radne stolove, odnosno *radna mesta*, koji se ponekad nazivaju standardi (*sl.* 17). Najčešće se koriste centrale za opsluživanje 50 ili 100 pretplatnika. U slučaju većeg broja pretplatnika potrebno je više radnih mesta, pri čemu treba predvideti i njihovo međusobno povezivanje. Korišćenje centrala ove vrste postaje praktično nemoguće čim broj pretplatnika pređe nekoliko stotina. Mada usavršene i snabdevene posebnom opremom (zamena padalice signalnom lampicom itd.), centrale ovog tipa se praktično više ne koriste u javnom saobraćaju. Na slici 18. prikazana je centrala tipa 8 + 40, koja omogućuje da 40 korisnika raspolaže sa 8 linija vezanih na telefonsku mrežu.

CENTRALE SA CENTRALNOM BATERIJOM. Centrale sa centralnom baterijom, pomoću multiplikacionih polja, omogućuju opsluživanje broja pretplatnika koji, kod velikih centrala, može dostići 10 000. *Multiplikaciono polje* omogućuje svakoj telefonistkinji da bez učešća svojih koleginica može

Fot. Photothèque P.T.T.

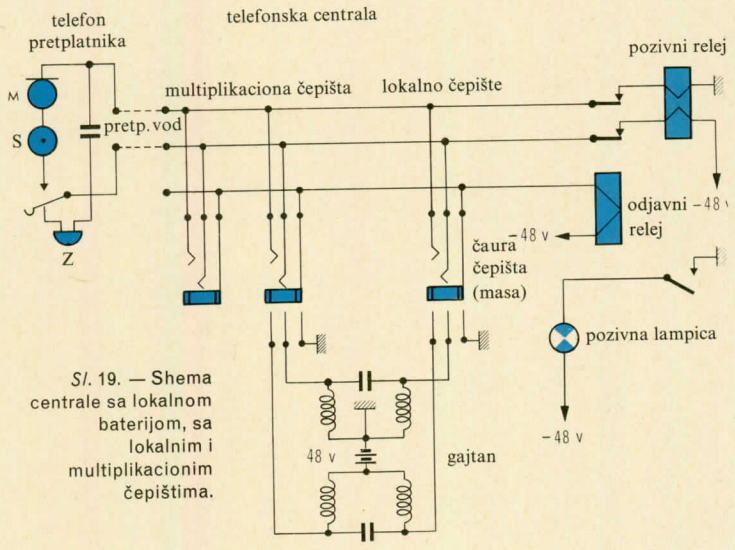


Sl. 17. — Radno mesto telefonistkinje u centrali sa lokalnom baterijom.



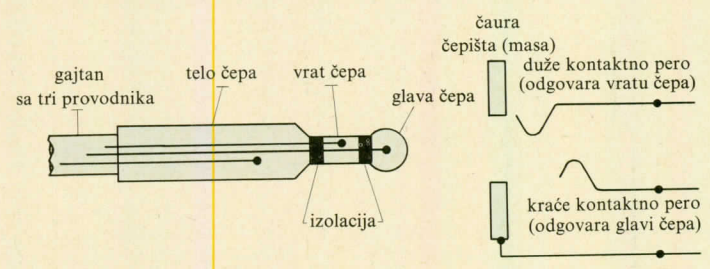
Sl. 18. — Telefonska centrala 8+40.

pozvati sve pretplatnike centrale, ali ipak da sama opslužuje samo ograničeni broj pozivajućih pretplatnika. Pretplatnički vodovi završavaju se na čepištima, nazvanim *lokalna čepišta*, koja su opremljena pozivnim lampicama. Svaka telefonistkinja se stara o određenoj grupi pozivalaca. Telefonistkinja može dosegnuti i do drugih čepišta, nazvanih *multiplikaciona čepišta*, koja ne sadrže pozivne lampice i odgovaraju svim pretplatnicima centrale (do 10 000). Ova čepišta su obično grupisana na vertikalnim panoima, koji se nalaze ispred telefonistkinje i njene dve susetke. Pošto velika centrala sadrži mnogo više od tri radna mesta, multiplikaciona čepišta se uzastopno ponavljaju onoliko puta koliko je potrebno. Svaki pretplatnički vod se završava, s jedne strane, lokalnim čepištem pretplatnika i, s druge strane, sa onoliko multiplikacionih čepišta koliko to zahteva veličina centrale. Na slici 19. prikazana je principska shema *centrale sa centralnom baterijom i lokalnim i multiplikacionim čepištima.* Podiznanjem slušalice, isključuje se zvonce Z i jednosmerna struja iz centralne baterije od 48 V počinje da teče preko pozivnog relea kroz pretplatnički vod i aparat. Usled ove struje aktivira se pozivni rele[1], koji, privlačeći svoju kotvu, izaziva paljenje pozivne lampice vezane za lokalno čepište pozivaoca, čime se osoblje obaveštava o upućenom pozivu. Telefonistkinja odgovara na poziv stavljanjem



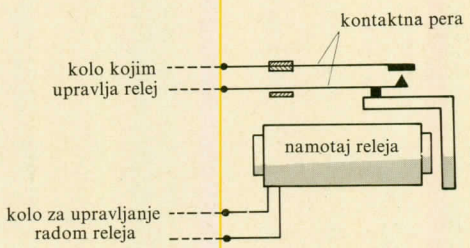
Sl. 19. — Shema centrale sa lokalnom baterijom, sa lokalnim i multiplikacionim čepištima.

čepa u ovo čepište. Gajtani sadrže i treću žicu koja je vezana uz telo čepa, što je prikazano na *sl.* 21. Unutar centrale, pored dve žile pretplatničkog voda, postoji i treća žiła, nazvana *ispitna žila*, koja povezuje bakarne čaure svih čepišta ovog pretplatnika *(sl.* 22). Raspored čepišta i postojanje ispitne žile omogućuju telefonistkinji da odredi da li je pretplatnik kome treba da se uputi poziv slobodan. Stoga telefonistkinja pristupa »ispitivanju«, odnosno glavom čepa slobodnog para gajtana dodiruje na svom panou čauru multiplikacionog čepišta, koje odgovara pozvanom pretplatniku. Ako je traženi pretplatnik već zauzet, treća žila, koja povezuje različita čepišta, spojena je sa masom, i telefonistkinja će u svojoj slušalici čuti »tak«. U slučaju da je pretplatnik slobodan, telefonistkinja će ubaciti čep u ispitano čepište, pristupiti pozivanju i uspostaviti vezu između dva pretplatnika. Čim se čep gajtana umetne u lokalno čepište pozivajućeg pretplatnika, pobuđuje se rele za prekidanje (*sl.* 19), usled čega se napajanje preko pozivnog relea zamenjuje napajanjem preko napojnih mostova smeštenih u gajtanski par. I zaista, ako se za vreme razgovora zadrži napajanje preko pozivnog relea, sve telefonske struje bi se zatvarale preko baterije i međusobno izmešale. Kada se napajanje vrši preko napojnih mostova, naizmenična komponenta struje lako prolazi kroz kondenzatore, kao što je prikazano na slici 19, dok namotaji sprečavaju njihovo mešanje, a ujedno propuštaju jednosmernu struju napajanja. Vrlo uprošćena shema na slici 19. ne sadrži oznake ključeva — preklopnika, pozivnog uređaja pozivajućeg pretplatnika itd. Na slici 23. prikazano je radno mesto sa multiplikacionim poljima.



Sl. 21. — Čep sa tri provodnika.

Sl. 22. — Čepište sa tri provodnika.



Sl. 20. Shema telefonskog releja.



Sl. 23. — Izgled radnog mesta sa multiplikacionim poljima.

1 Telefonska postrojenja sadrže veliki broj relea. Relej (*sl.* 20) je napravljen od elektromagneta malih dimenzija, koji, privlačeći svoju kotvu, uspostavlja kontakt između dva kontaktna pera ili više kontaktnih pera uzetih dva po dva. Ovo omogućuje otvaranje ili zatvaranje jednog ili više kola povezanih na ova pera. Upotreba relea za izazivanje padanja pozivne padalice u centralama sa lokalnom baterijom već je pomenuta.

Fot. Fotothèque PTT.



Sl. 24. — Sala oblasnog telefonskog centra u Parizu.

U velikim gradovima postoji više centrala, i potrebno je pretplatnicima različitih centrala omogućiti da međusobno razgovaraju. Prema tome, na radnom mestu telefonistkinje ne završavaju se samo pretplatnički vodovi, već i spojni vodovi između centrala. Na isti način, da bi se omogućile međumesne veze, međumesni vodovi stižu do telefonistkinje koja raspolaže potrebnim spojnim vezama. Pozivi se ostvaruju naizmeničnom, a ne jednosmernom strujom, pošto ova ne bi mogla da se prenese savremenim međumesnim sistemima, pri čemu princip rada ostaje isti, ali je realizacija obično složenija. Na slici 24. predstavljena je sala oblasnog telefonskog centra u Parizu.

AUTOMATSKE TELEFONSKE CENTRALE

Mada se ručno uspostavljanje veze znatno koristi, ipak vodeće mesto pripada *automatskom uspostavljanju veze*, čije su prednosti neosporne (brzina, sigurnost i kvalitet usluga). Ideja o automatskoj telefoniji potiče iz doba izgradnje prvih telefonskih postrojenja, i već 1881, na izložbi posvećenoj elektricitetu, održanoj u Parizu, prikazana je automatska telefonska centrala koja je opsluživala osam pretplatnika. Međutim, predloženi sistemi, koji su zahtevali upotrebu više od dva provodnika po pretplatniku, bile su suviše složeni i suviše skupi za široku primenu. Tek uoči prvog svetskog rata izgledalo je, najzad, da je ostvareni napredak omogućio izgradnju pravih automatskih centrala. U Francuskoj je takva centrala puštena u rad u Nici 1914. Razvoj je ponovo nastavljen posle rata i 1928. započinje automatizacija pariske telefonske mreže izgradnjom automatske centrale Karno (Carnot).

Razvijeno je i pušteno u rad više sistema automatske telefonije, među kojima se naročito ističu:

— *sistem Straudžer (Strowger)*, američkog porekla, najstariji i, koji je nesumnjivo, bio najrasprostranjeniji u svetu, ali je svuda kao i u Francuskoj već na putu da nestane;

— *sistem Panel* i *sistem Rotari (Rotary)*, takođe američkog porekla, od kojih su drugim opremljene mreže Pariza, Marseja, Nanta, Anžera, sa izuzetkom centrala izgrađenih posle 1964. godine;

— *sistem R6*, francuskog porekla, kojim je u Francuskoj opremljena većina centrala u unutrašnjosti;

— *sistemi Krosbar (Crossbar)*, kojima su u Francuskoj *(sistem Pentaconta* i *CP* 400) opremljene sve nove centrale, i *švedski Krosbar sistemi* (ARF 50, ARF 101, ARK 30, ARM 20, ARM 50), koji se primenjuju u većini zemalja.

Ovi različiti sistemi mogu se podeliti u dve osnovne kategorije: na *sisteme sa direktnim biranjem*, odnosno direktnim uspostavljanjem veze, gde pretplatnik brojčanikom svog aparata neposredno upravlja radom uređaja koji uspostavljaju vezu, i na *sisteme sa indirektnim biranjem*, kod kojih se posredstvom brojčanika uključuju u rad pomoćni uređaji, da bi se ostvarila željena veza. Na primer, sistem Straudžer je sa direktnim, a sistem R6 je sa indirektnim uspostavljanjem veze.

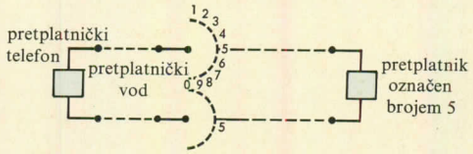
Pored ove klasifikacije, može se izvršiti podela na *sisteme bez registara* i *sisteme sa registrima*. U sistemima bez registara korisnik biranjem deluje na uređaje ili baš na same pomoćne organe. U sistemima sa registrima biranje se »registruje« posrednim pomoćnim uređajem, koji zatim zamenjuje korisnika pri upravljanju radom birača.

Pored već pomenutih sistema, u toku je nagli razvoj i korišćenje elektronskih ili poluelektronskih sistema, zasnovanih na najsavremenijim dostignućima nauke i tehnike.

SISTEM STRAUDŽER. Najstariji automatski telefonski sistem pronašao je Amerikanac Straudžer, koji je nastojao da se radnje koje obavlja telefonistkinja u ručnoj telefoniji, ostvare elektromehaničkim putem.

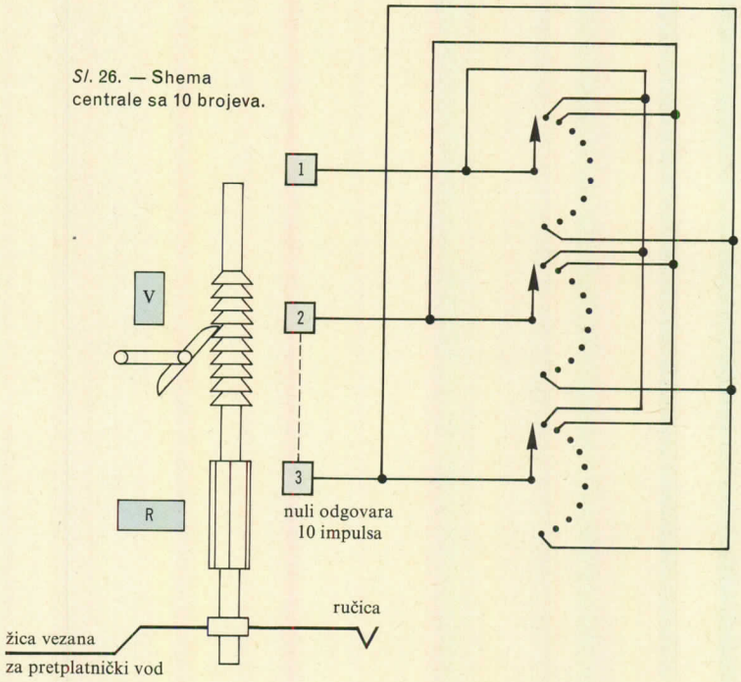
Centrala sa 10 brojeva. Centrale sa 10 brojeva imaju teorijski značaj, ali njihovo proučavanje omogućuje uprošćeni prilaz nekim osnovnim principima telefonskih sistema. Biranjem neke cifre pomoću brojčanika, npr., cifre 5, šalje se na pretplatnički vod niz od 5 impulsa. Ova serija impulsa aktivira mehanizam koji pomera i postavlja u željeni položaj ručice na kojima se završavaju pretplatnički vodovi. U datom primeru ručica se pomera za pet koraka, čime je ostvarena veza sa pretplatnikom sa pozivnim brojem pet (*sl.* 25). Ručice se kreću po jednom kružnom segmentu obrazovanom od deset kontaktnih lamela koje su respektivno vezane za svakog od deset pretplatnika. Pošto svakom pretplatniku treba omogućiti da dobije vezu sa svim drugim pretplatnicima centrale, svaki od njih biće »multipliciran« na kontaktne lamele obrtnih birača. Potreba da se odredi da li je neki pretplatnik slobodan ili je zauzet, zahteva postavljanje ispitne žile u centrali, kao i treće ručice i trećeg venca kontaktnih lamela. Treba predvideti i dodatne uređaje, kao rele za slanje poziva, rele za brojanje impulsa itd. Na slici 26. prikazana je shema centrale sa 10 brojeva. Skup od tri žile, koje u centrali odgovaraju jednom pretplatniku, ovde je prikazan samo jednom linijom. Ova centrala sadrži 10 obrtnih birača pomoću kojih se uspostavlja veze između pozivajućih i pozvanih pretplatnika.

Centrala sa 100 brojeva. Prema osnovnoj ideji sistema Straudžer, centrala sa 100 brojeva može da se ostvari povezivanjem dest identičnih centrala sa 10 brojeva. Pošto nula odgovara slanju 10 impulsa, to će pozivni brojevi pretplatnika u prvoj desetici biti 11, 12, 13, ... 19, 10; u drugoj 21, 22, ... 29, 20; i desetoj 01, 02, ... 09, 00. Deset vodova koji pripadaju istoj desetici raspodeljeni su na 10 grupa kontaktnih lamela koje su polukružno postavljene na istom horizontalnom nivou, odnosno koraku. Različite grupe sadrže po 3 lamele za svaki pretplatnički priključak, od kojih se dve odnose na provodnike govornog kola a treća na ispitnu žilu. Prema tome, postoji 10 nivoa kontaktnih lamela postavljenih jedan iznad drugog. Pokretni uređaj, upravljan brojčanikom pozivajućeg pretplatnika, treba da se pri slanju prve cifre (cifra desetice) podigne za odgovarajući broj koraka, a zatim, pri slanju druge cifre, koja odgovara jedinici, da obavi obrtno kretanje dok ne nađe pozvanog pretplatnika. Na ovom principu radi linijski birač u sistemu Straudžer *(sl.* 27). Dok je centrala sa 10 brojeva zahtevala samo jedan elektromagnet za obrtno kretanje, u ovom slučaju je potreban jedan elektromagnet za podizanje (P) i jedan za rotaciono kretanje (R). U toku pauze, koja odvaja slanje dve cifre, isključuje se P, a uključuje R.

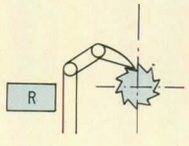


Sl. 25. — Princip automatske komutacije.

Sl. 26. — Shema centrale sa 10 brojeva.



Sl. 27. — Kretanje linijskog birača u sistemu Straudžer.



Fot. Fotothèque PTT.

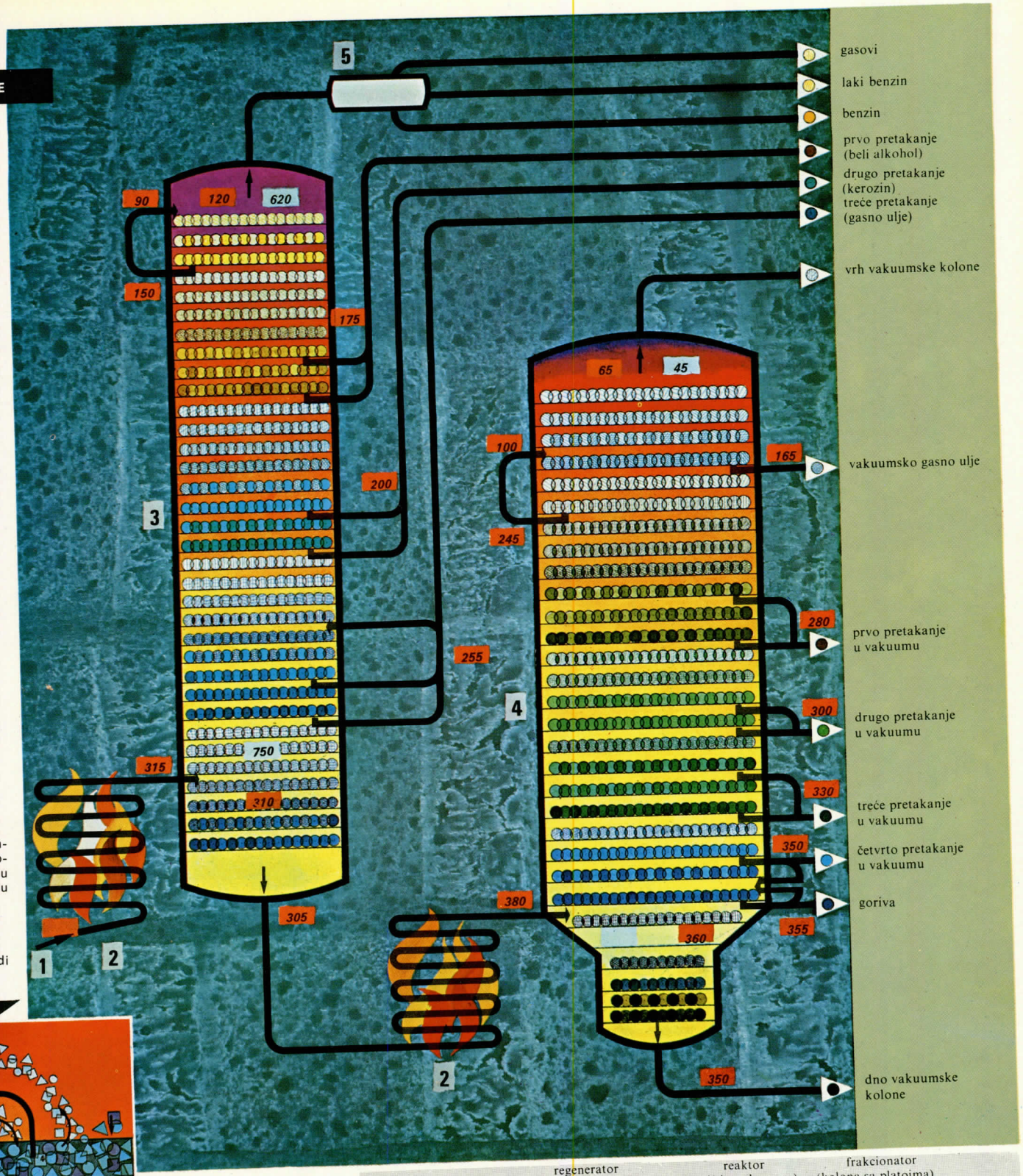
RAFINACIJA NAFTE

PRVA DESTILACIJA

1. Dovod prethodno zagrejane sirove nafte.
2. Peći.
3. Kolona za atmosfersku destilaciju.
4. Kolona za vakuumsku destilaciju.
5. Separacija benzina i gasova.

185 Temperatura (°C).

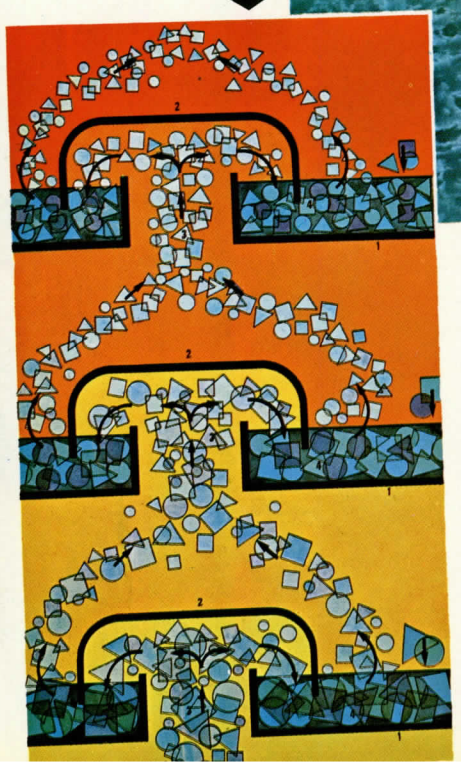
750 Pritisak (mm živinog stuba).



KALOTE ZA BARBOTIRANJE

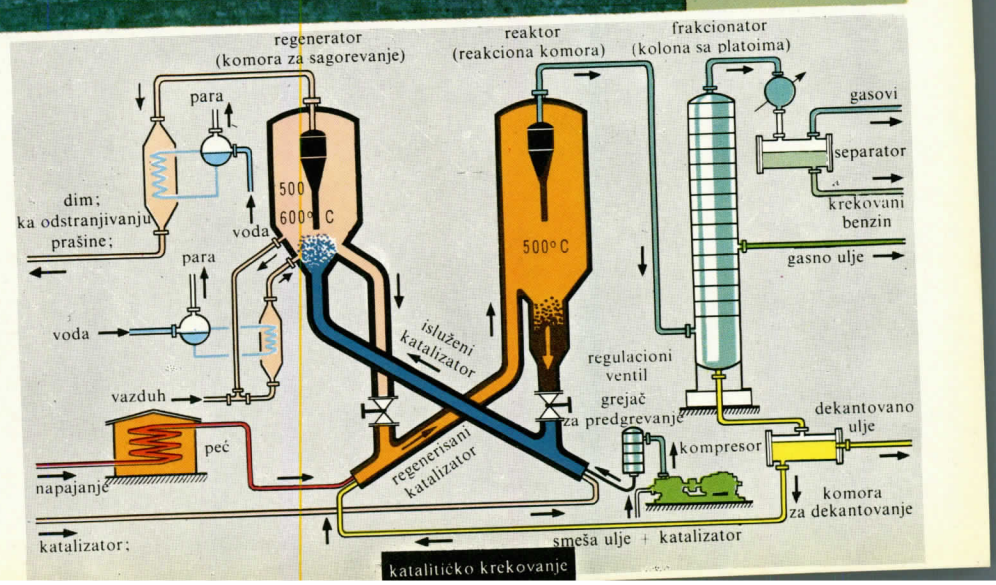
(pare ugljovodonika su simbolično predstavljene geometrijskim slikama koje su utoliko manje ukoliko su frakcije nafte lakše).

1. Platoi
2. Kalote
3. Ispareni proizvodi
4. Kondenzovani proizvodi koji se odvode.



KREKOVANJE. — Posle prve destilacije ostaje mnogo teških proizvoda. Postupak krekovanja, pri kome dolazi do cepanja velikih molekula, omogućuje da se dobiju laki destilati; tako se dobija benzin sa visokim oktanskim brojem.

Doc. E. S. S. O., Larousse.



katalitičko krekovanje

TRANSPORT NAFTE



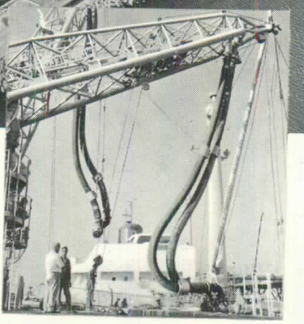
Naftovodi i rezervoari



»Motalica« pri postavljanju podzemnog naftovoda (posle višestrukog omotavanja platnenim trakama i tretiranja bitumenom).

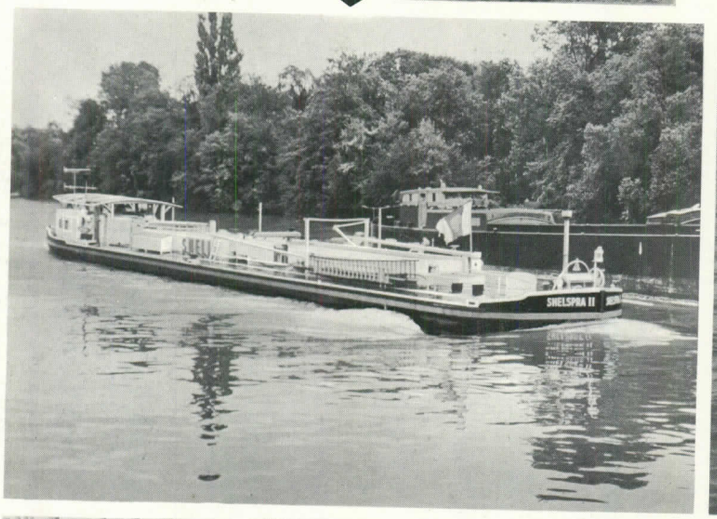


Tanker »Magdala« pri istovaru



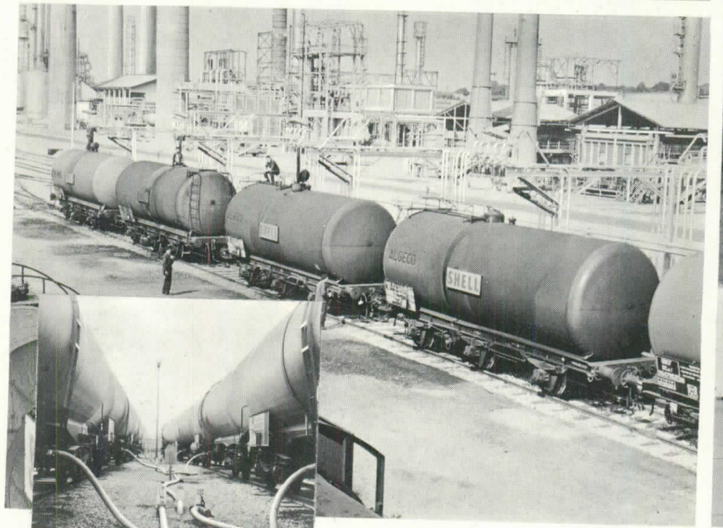
Cevi za utovar tankera

Rečni transport brodom-tankerom



Rečni transport konvojem





Transport vagonima-cisternama
Istovar vagona



Drumski transport

Fot. B. P., Shell. Sogestran, Esso.

Proučavanjem telefonskog saobraćaja određuje se potreban broj linijskih birača koje treba ugraditi, da bi se obezbedili optimalni uslovi rada i izbeglo nepotpuno iskorišćenje birača. Na primer, za centralu sa 100 brojeva, iskustvo pokazuje da broj jednovremenih razgovora gotovo nikad nije veći od petnaest. Prema tome, dovoljno je ugraditi 15 linijskih birača, koji su pristupačni svakom od 100 pretplatnika centrale, pri čemu bi postojala samo mala verovatnoća da neki pretplatnik, pri traženju veze, ne nađe nijedan slobodan birač.

Da bi se pozivajućem pretplatniku obezbedio slobodan linijski birač, koriste se dve tehnike. Po prvoj, svakom pretplatniku centrale odgovara poseban obrtni birač, nazvan *predbirač*, koji, već podizanjem slušalice aparata pozivajućeg pretplatnika, počinje da se okreće tražeći slobodni linijski birač. Poseban zvučni signal, nazvan »znak slobodnog biranja«, obaveštava pretplatnika da je nađen linijski birač, tj. da može početi sa biranjem cifara traženog pretplatnika.

Prema drugoj tehnici, pokreću se *tražioci poziva*, koji se sastoje od obrtnih birača, pri čemu su svi pretplatnici centrale »multiplicirani« na svaki tražilac poziva. Ovih tražilaca poziva ima 15 i svaki od njih je vezan na jedan od 15 linijskih birača. Podizanjem slušalice počinje okretanje svih tražilaca poziva koji su priključeni na slobodne linijske birače, bez obzira na njihov početni položaj. Ovo kretanje prestaje kada jedan od njih zauzme vod pozivajućeg pretplatnika. Tek tada se pretplatnik obaveštava zvučnim signalom da može početi sa biranjem. Na slici 28. prikazane su, za svaku usvojenu tehniku, osnovne sheme centrale sa 100 brojeva. Broj ugrađenih organa dat je ispod oznake svakog organa. Očigledno je da dati broj organa predstavlja samo primer, pošto se, u stvari, određuje računom verovatnoće zavisno od saobraćaja.

Centrale sa 1 000 i 10 000 brojeva. Centrala sa hiljadu brojeva može se posmatrati kao skup od 10 centrala sa 100 brojeva, označenih od 1 do 10 (10 se predstavlja cifrom 0). Na primer, pozivati 728, ovde znači pozivati pretplatnika 28 koji pripada centrali 7.

U centrali sa 1 000 brojeva ponovo se sreću već primenjeni principi i organi korišćeni u centralama sa 100 brojeva. Međutim, u shemama se pojavljuje jedan novi birački organ. Tako na shemi na slici 29, koja odgovara centrali sa predbiračima, ispred stepena linijskih birača nalaze se organi nazvani *birači*. Okretanjem brojčanika šalje se prva serija impulsa koja odgovara cifri stotine željenog pretplatnika, pri čemu se birač prinudno postavlja na određeni korak dizanja. Posle toga, birač menja način kretanja, te počinje automatsko okretanje, pri čemu se vrši ispitivanje i biranje jednog slobodnog linijskog birača. Kako se ovo obrtno kretanje vrši slobodno — automatski (nije dirigovano serijama impulsa sa brojčanika), to se ono naziva slobodnim biranjem. Traženje se završava na prvom slobodnom linijskom biraču.

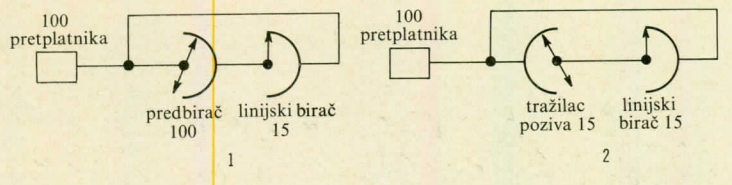
Centrala sa 10 000 brojeva izvodi se iz prethodnih, ali se ovde pojavljuje novi birački stepen, koji odgovara traženju željene cifre hiljada. Na slici 30. predstavljena je shema centrale sa 10 000 brojeva sa tražiocima. Prema principima rada poznatim već kod centrala sa 1 000 brojeva, *prvi grupni birači* obezbeđuju traženje cifre hiljada a *drugi grupni birač* traženje cifre stotina, dok se preko linijskih birača biraju cifre desetica i jedinica.

Dijagram na *sl.* 30. napravljen je uz pretpostavku da je centrala opremljena tražiocima sa 100 kontaktnih lamela, odnosno izlaza, kojih bi, prema podacima saobraćaja, trebalo da bude 16 po grupi od 100 pretplatnika, što ukupno čini 1 600 tražilaca na 10 000 pretplatnika. Broj prvih grupnih birača jednak je broju primarnih tražilaca, ali ovaj broj je mnogo veći od onog koji bi bio stvarno potreban za dobro obavljanje telefonskog saobraćaja. U velikim centralama, tražioci poziva se mogu posmatrati kao sami pretplatnici, pa se iza njih, a ispred prvih grupnih birača umeću *drugi tražioci poziva (sl.* 32), ili predbirači, koji sa postojećim tražiocima poziva obrazuju *dvostruke tražioce (sl.* 31).

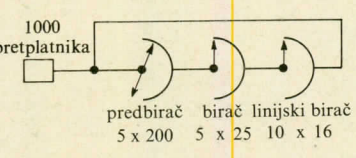
SISTEM R6 BEZ REGISTRA. U ovom sistemu, birači i linijski birači su vrsta obrtnih birača sa 100 trostrukih kontaktnih lamela *(sl.* 33). Takav birač radi kao linijski birač kada je predviđen da omogući pristup jednoj pretplatničkoj stotini. On radi kao grupni birač kada je povezan tako da omogućuje pristup za deset grupa od po deset organa ili, još opštije, ma kom broju grupa od kojih svaka sadrži neki broj organa, pod uslovom da je ukupni broj organa uvek jednak stotini.

Sistem R6 je sistem sa indirektnim upravljanjem, a impulse odaslane pomoću pretplatničkog brojčanika prima *organ za upravljanje* ili *orijenter (sl.* 34). Ovaj organ upravlja radom grupnih birača ili linijskih birača tako što određeni potencijal dovodi na treću žilu kontaktne lamele, koja odgovara zahtevu pretplatnika. U slučaju linijskog birača, ovaj potencijal određuje tačku gde bi mehanizam za postavljanje ručice trebalo da se zaustavi, a u slučaju grupnog birača, tačku iz koje ovaj mehanizam treba da započne traženje slobodnog organa. Preimućstvo ovog indirektnog upravljanja zasniva se na činjenici da sam upravljački organ obavlja osetljive i skupe funkcije koje proističu iz uspostavljanja veze. Dakle, dok u sistemu Straudžer birač ili linijski birač ostaju zauzeti celo vreme trajanja razgovora, dotle se u sistemu R6 upravljački organ isključuje, čim izvrši svoj zadatak oko uspostavljanja veze, te je spreman za uspostavljanje sledeće veze. Na slici 35. shematski je predstavljena centrala R6 sa 100 brojeva, opremljena tražiocima poziva. Tri upravljačka organa su dovoljna da opslužuju 16 linijskih birača.

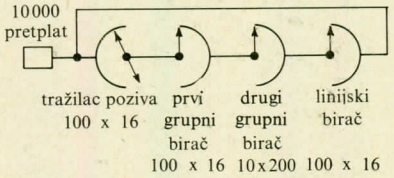
Centrale sa 1 000 i 10 000 brojeva izvode se iz prethodne, pri čemu se kao birači koriste obrtni birači. U centrali sa 10 000 brojeva *(sl.* 36) uvedeni su u upotrebu dvostruki tražioci. Zadržavajući usvojeni princip rada sistema R6, na više dvostrukih tražilaca priključen je poseban upravljački organ, nazvan *distributor*, npr., dva distributora za 10 — 15 dvostrukih tražilaca. Ovi upravljački organi



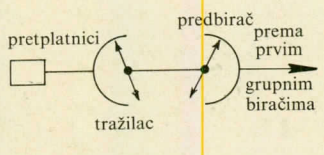
Sl. 28. — Automatska centrala sa 100 brojeva sa predbiračima (1) ili sa tražiocima poziva (2).



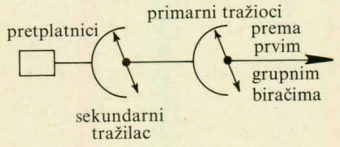
Sl. 29. — Dijagram centrale sa 1 000 brojeva.



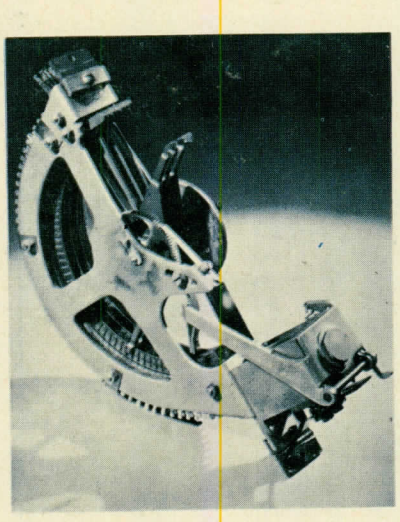
Sl. 30. — Dijagram centrale sa 10 000 brojeva.



Sl. 31. — Dvostruki tražilac.

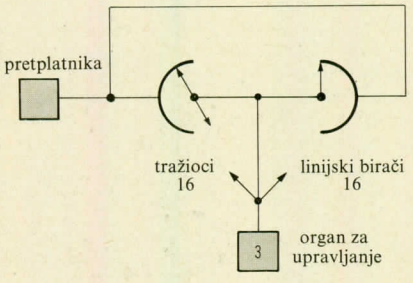


Sl. 32. — Primarni tražilac i sekundarni tražilac.

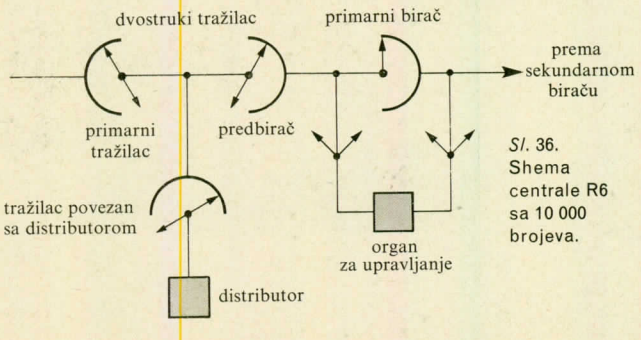


Sl. 33. — Obrtni birač R6

Sl. 34. — Organ za upravljanje položaja linijskog birača.



Sl. 35. — Shema centrale R6 sa 100 brojeva.



Sl. 36. Shema centrale R6 sa 10 000 brojeva.

Fot. X.

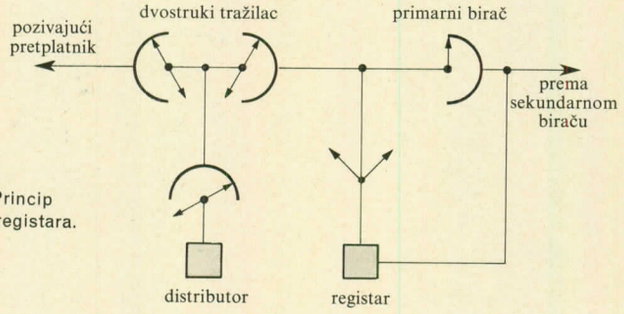
O. E. L. III — 56.

omogućuju koncentrisanje značajnih funkcija na najmanji broj organa. Na isti način, izvestan broj prvih grupnih birača biće povezan sa vrlo malim brojem upravljačkih organa, koji postavljaju određeni potencijal na prvu od kontaktnih lamela iz niza koji odgovara traženoj cifri. Pokretni mehanizam zatim automatski prelazi taj niz, dok ne nađe slobodnu liniju prema drugim grupnim biračima itd.

SISTEM R6 SA REGISTRIMA. U slučaju vrlo velikih centrala, što se posebno odnosi na vrlo velike gradove, koji poseduju različite automatske centrale, pogodno je zameniti sistem bez registra, koji je okarakterisan velikom krutošću u ostvarivanju veze, sistemom R6 sa registrima. U stvari, ako pretplatnički broj neke centrale sadrži 7 cifara, kao u Parizu, gde prve tri cifre predstavljaju karakterističan broj same centrale, potrebno je, kod prethodnog sistema, preći uzastopno pet biračkih stepena da bi se stiglo do linijskog birača. Ali, ako su pozivajući i pozvani pretplatnik vezani na istu centralu, do linijskog birača bila bi dovoljna samo tri biračka stepena: jedan koji određuje baš tu centralu i druga dva za cifre hiljada i stotina. S druge strane, razume se, da bi bilo poželjno odmah pri polasku iz određene centrale, usmeriti saobraćaj istim putem prema određenom broju centrala.

Organ koji se naziva *registar — pretvarač* omogućuje da se u željenom pravcu poboljšaju mogućnosti sistema R6. Ovaj organ prima impulse pretplatnika, *registruje* ih i pretvara u nove povorke impulsa koji odgovaraju željenom pravcu. U odsustvu pretvarača, jednostavan registar, zavisno od zahteva pretplatnika, upravlja odašiljanjem impulsa prema biračima. Osim toga, u toku biranja, a u nedostatku slobodnog birača, registar nastavlja da ispituje snop prema željenom biračkom stepenu onoliko koliko je potrebno. Od pretplatnika se ne bi moglo tražiti da tako postupa. Sistem R6 bez registra predstavlja *sistem sa izgubljenim pozivima*, a R6 sa registrima *sistem sa čekanjem*.

Shema sa slike 37. pokazuje kako registar obavlja zadatak upravljačkog organa za prve grupne birače, počev od kojih će veza biti upravljena ili prema pretplatnicima svoje centrale ili prema spojnim vodovima ka drugim centralama. Pošto izvrši svoj zadatak registar se oslobađa i stoji na raspolaganju za uspostavljanje novih veza. Dakle, u sklopu jedne centrale dovoljan je mali broj ovih organa, a njihove prednosti su tolike da se danas koriste i u centralama sa 10 000 brojeva.

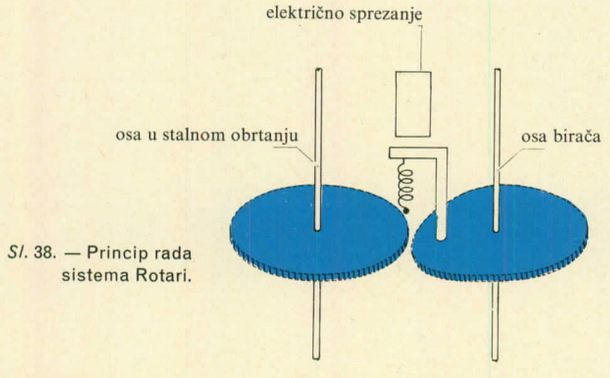


Sl. 37. — Princip upotrebe registara.

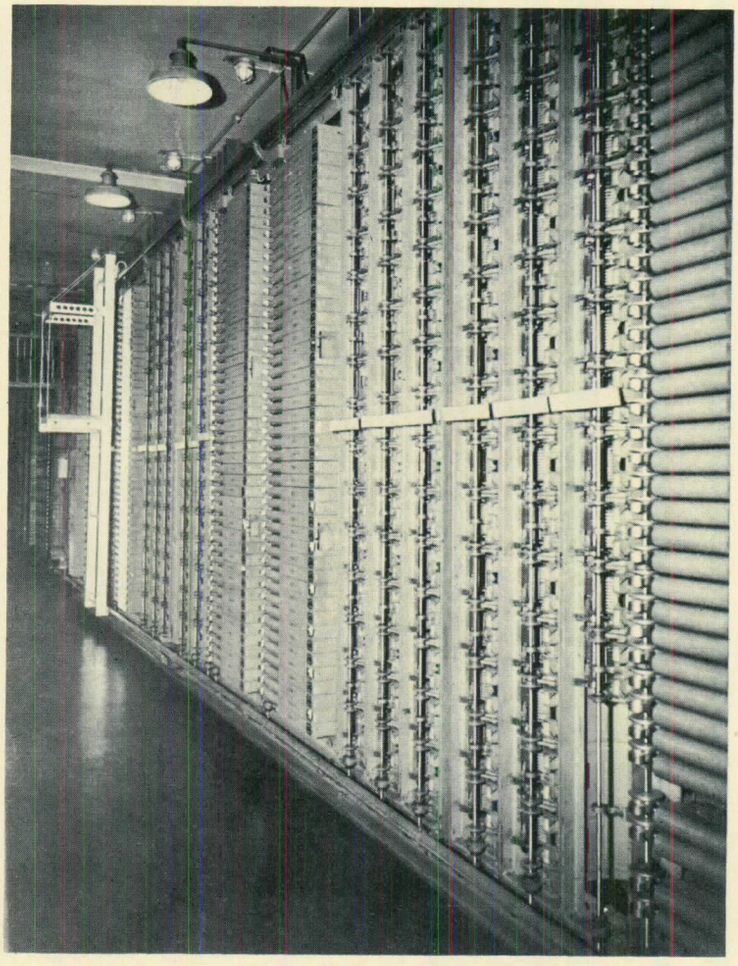
SISTEM ROTARI. Ovim sistemom opremljene su sve centrale u Parizu puštene u rad pre 1964. godine.

U prethodno opisanim sistemima, pomeranje biračkih organa (dizanje i okretanje za Straudžer, samo okretanje za R6) obavlja se »korak po korak«, odnosno, pokretni mehanizam se kreće od kontakta do kontakta, pod dejstvom elektromagneta.

Na slici 38. predstavljena je shema načina rada usvojenog u sistemu Rotari. Paralelno osi aparata za upravljanje (ovde, birač) nalazi se osovina sa zupčanikom, koja se neprekidno okreće. Na osi birača prema ovom zupčaniku nalazi se nazubljen savitljiv kotur, koji je u mirovanju savijen usled težine kotve elektromagneta za sprezanje. Kada se elektromagnet pobudi, on privlači svoju kotvu, kotur birača se ispravlja i spreže sa zupčanikom koji se nalazi u okretanju. Registar, koji se može uporediti s onim u sistemu R6, prima zahtev pozivajućeg pretplatnika i označava tačku u kojoj treba da se zaustavi okretanje birača. Kada se dostigne ova tačka, kotva elektromagneta za sprezanje ponovo pada, usled čega prestaje kretanje birača. Registar izaziva pobuđivanje elektromagneta, ali birač u toku svog obrtanja šalje registru impulse. Iz ovog razloga sistem Rotari se naziva sa »inverznim impulsima«. Registar broji impulse i kada primi dovoljan broj prestaje rotaciono kretanje usled prekida napajanja elektromagneta za sprezanje. Na slici 39. prikazan je opšti izgled centrale Rotari.



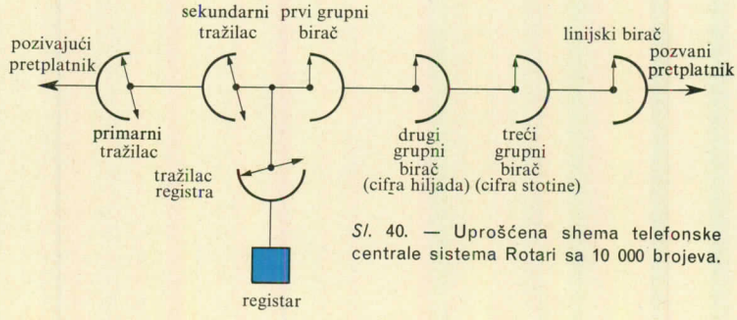
Sl. 38. — Princip rada sistema Rotari.



Sl. 39. — Izgled telefonske centrale sistema Rotari.

Na slici 40. prikazan je princip rada centrale Rotari sa 10 000 brojeva. Shema odgovara slučaju veze između dva pretplatnika iste centrale. Prvi grupni birač može isto tako da usmeri vezu prema drugim centralama istog grada, kao i prema ručnim ili automatskim međumesnim centralama itd.

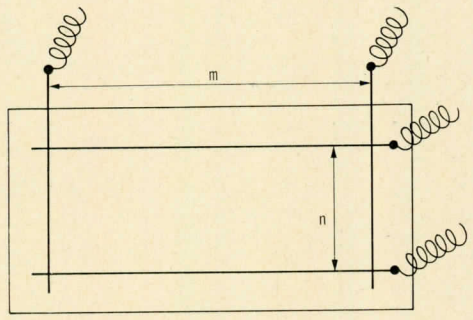
SISTEM KROSBAR. Svi do sada proučavani sistemi koriste pokretne mehanizme koji usled svoje relativno velike težine zahtevaju znatno vreme za izvršenje kretanja određene amplitude. S druge strane, električni spojevi se obezbeđuju kretanjem kliznih ručica po kontaktnim površinama, što prouzrokuje njihovo znatno trošenje tokom rada i zahteva brižljivo održavanje, pošto bi se inače pojavili parazitni šumovi. Sistemi nazvani »crossbar« ili »sa ukrštenim polugama«, zbog načina njihovog izvođenja, u upotrebi su već desetak godina i otklanjaju ove nedostatke. U prethodnim sistemima »tačke spojeva« su ostvarivane »kliznim kontaktima«, dok su kod krosbar-sistema zamenjene kontak-



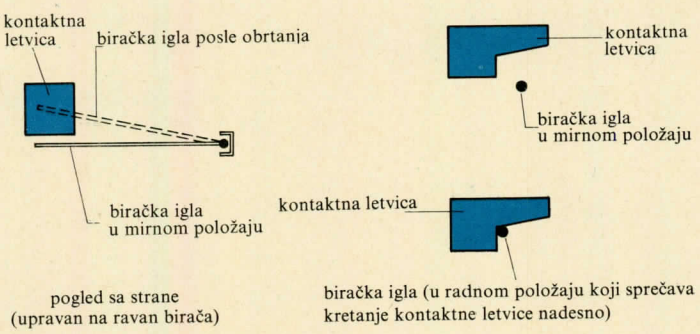
Sl. 40. — Uprošćena shema telefonske centrale sistema Rotari sa 10 000 brojeva.

tima sličnim kontaktima releja, odnosno ostvarenim pomoću dve pastile od plemenitog metala, od kojih jedna vrši vrlo malo pomeranje da bi uspostavila kontakt sa drugom.

Bitni organi sistema krosbar sastoje se od vertikalnih i horizontalnih poluga, čijim se podesnim kretanjem određuje traženi električni spoj u jednoj od tačaka ukrštanja (*sl.* 41). Mehaničko izvođenje »krosbar-birača« omogućuje uspostavljanje jedne veze, odnosno električnog spoja samo u jednoj tački od svih mogućih tačaka spojeva između niza »horizontalnih« i niza »vertikalnih« poluga. To se vrši na sledeći, očigledno veoma uprošćen i shematizovan način. Horizontalne poluge su snabdevene u svakoj tački ukrštanja savitljivim metalnim perom, nazvanim »birački igla«, koje je postavljeno upravno na ravan birača. Pod dejstvom upravljačkog elektromagneta horizontalne poluge mogu da stupe u rotaciono kretanje, vrlo male amplitude, oko svoje ose. Usled privlačenja elektromagneta jedne horizontalne poluge, višestruki slog kontaktnih pera u tom horizontalnom redu vrši lako kretanje oko ose. Zatim se pod dejstvom svog upravljačkog elektromagneta pokreće i vertikalna poluga, čime se obezbeđuje samo jedan električni spoj pomoću birački igle višestrukog sloga i kontaktnih letvica. Ostale kontaktne letvice posmatrane vertikalne poluge, pošto nisu pridržavane pomoću birački igle, nisu u mogućnosti zbog svog trenutnog položaja da ostvare električni spoj *(sl.* 42). Pošto je ostvaren električni spoj, birački igla ostaje učvršćena između kontaktnih letvica i vertikalne poluge, te može prestati napajanje upravljačkog elektromagneta horizontalne poluge. Ovaj električni spoj postoji za celo vreme razgovora, dok preostali deo birača ostaje slobodan za uspostavljanje drugih veza. Tek posle završetka telefonskog razgovora vertikalna poluga se oslobađa, a birački igla se sama vraća u miran položaj.



Sl. 41. — Shema krosbar birača sa *m* vertikalnih i *n* horizontalnih poluga.

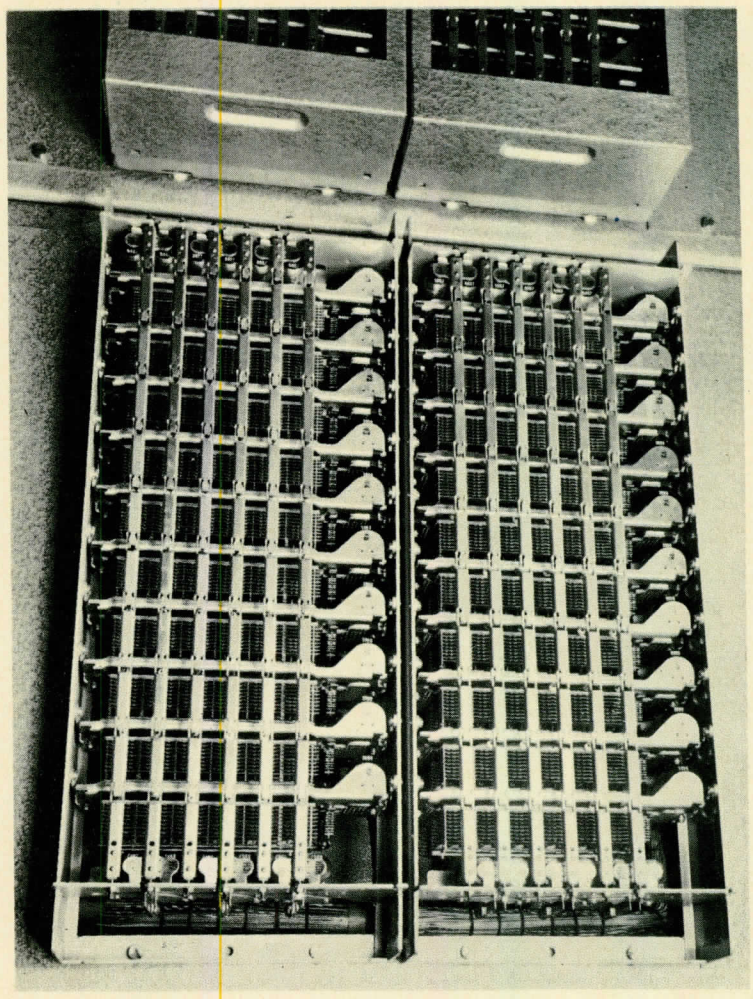


Sl. 42. — Princip krosbar birača.

Pored toga što omogućuju veću brzinu uspostavljanja veza i poboljšanje njihovog kvaliteta, sistemi krosbar *(sl.* 43) manje su glomazni i jeftiniji od prethodnih sistema, te su ih zamenili gde god je to bilo moguće. Krosbar-sistemi su podjednako dobro prilagođeni uslovima za uspostavljanje veza u automatskoj telefoniji, kako u mesnom tako i u međumesnom i međunarodnom saobraćaju. Može se smatrati da oni predstavljaju drugu generaciju automatskih telefonskih sistema, dok elektronski i poluelektronski sistemi, koji počinju osetno da se primenjuju, čine najnoviju, odnosno treću generaciju.

ELEKTRONSKI SISTEMI. U svim savremenim telefonskim sistemima, naročito u sistemima krosbar, razlikuju se upravljački organi (registri, distributori, markeri itd.), koji vrše delikatne i vrlo složene funkcije, od organa za povezivanje (razne vrste birača), koji predstavljaju jednostavne izvršne organe upravljačkih organa. Razumljivo je da se pojavila ideja da se elektromehaničko uspostavljanje veze zameni elektronskim, i to za obe naznačene vrste funkcija. I zaista, elektronskom računaru se može poveriti zadatak da obezbedi funkcije registrovanja, pretvaranja, upravljanja itd. I funkcije povezivanja mogle bi se takođe ostvariti elektronskim sredstvima, pri čemu bi povezivanje bilo ostvareno pomoću gasne diode ili skupa tranzistora.

Međutim, pri savremenom stanju tehnike, sistemi krosbar omogućuju da se povezivanje ostvari isto tako dobro kao elektronskim sredstvima. Prema tome, proučavanje je usmereno na *poluelektronske centrale*, koje koriste elemente krosbar-sistema pri prosleđivanju veze, dok su, naprotiv, sve ostale upravljačke funkcije koje se odnose na sistem poverene elektronskim sredstvima. Ovakvi sistemi se sve više uvode u upotrebu za sve vrste telefonskih centrala (mesne, međumesne, međunarodne).



Sl. 43. — Birač sistema krosbar.

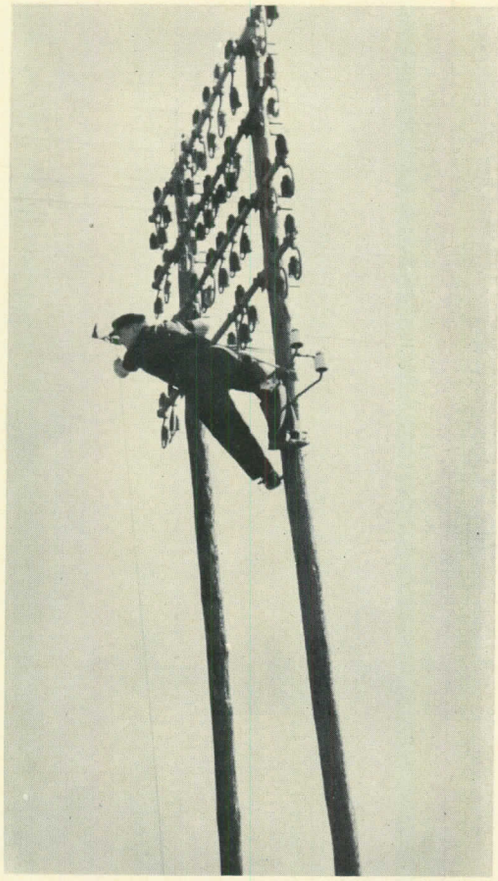
PRENOSNI SISTEMI

NADZEMNI I PODZEMNI VODOVI. Prve telefonske veze bile su jednostavno ostvarivane pomoću vazdušnih vodova sa gvozdenom žicom i zemljom kao povratnim vodom. Takvi vodovi su se već koristili u telegrafiji. Vrlo brzo je uočeno da je potrebno, radi izbegavanja međusobnog razgovora, koristiti dvostruke metalne provodnike, i to bakarne, da bi se ostvario zadovoljavajući domet i kvalitetan prenos razgovora. Ovi bakarni provodnici su napravljeni od gole žice, tj. bez izolacije. Prema tome, telefonske mreže koje su tako izgrađene, sačinjene su od vazdušnih linija, postavljenih obično na drvene stubove *(sl.* 44).

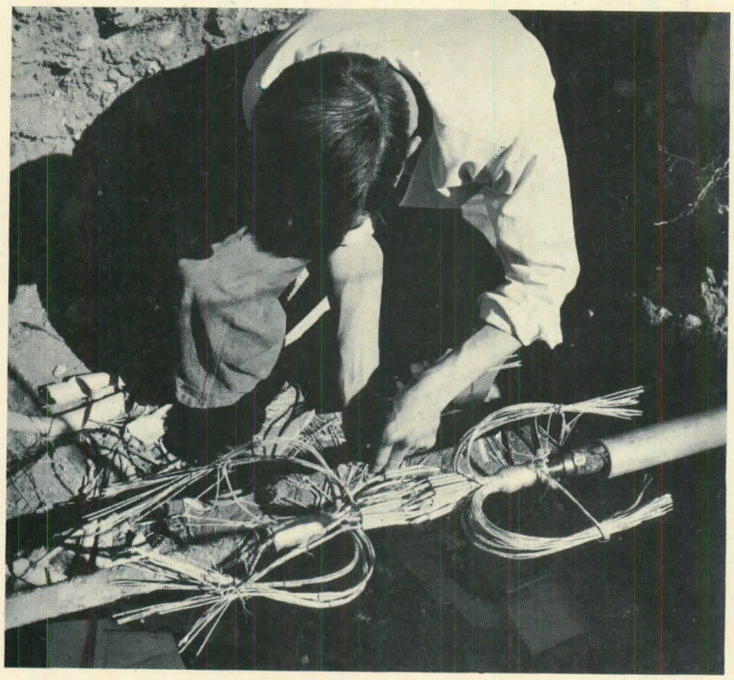
Međutim, ne može se beskonačno povećati broj provodnika od gole žice na istom vazdušnom pravcu, s obzirom da su tako napravljene linije vrlo osetljive na nepogode, kao i na smetnje iz visokonaponskih električnih mreža. Stoga se već odavno prešlo na korišćenje telefonskih kablova u gradskim mrežama, gde vrlo veliki broj pretplatničkih vodova treba da ide istom trasom kao i za važnije međumesne vodove. U telefonskim kablovima *(sl.* 45), ispod zaštitnog olovnog omotača (u novije vreme vinil-hlorida) nalaze se parice ili četvorke bakarnih žila, međusobno izolovane papirom (ili, u novije vreme, plastičnom materijom, politenom). Uobičajeni prečnik žile iznosi 0,5 — 1,3 mm, a jedan kabl može sadržati 900 parica, čak i više, u slučaju mesnih kablova. Kablovi se obično polažu u zemlju, i u velikim gradovima se postavljaju u posebne kanale ili cevi, dok se duž puteva polažu neposredno u zemlju. U ovom drugom slučaju, kabl je zaštićen čeličnim omotačem.

Fantomni vodovi. Odavno je poznato da se kapacitet vazdušnih vodova ili kablova može povećati za 50% primenom *kombinovanih vodova*, odnosno, slikovito rečeno, *fantomnih vodova*.

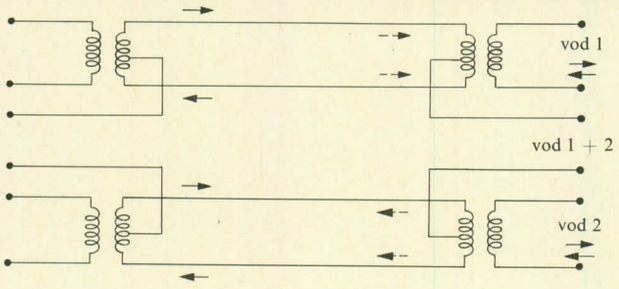
Fantomni vod *(sl.* 46) sačinjen od dva realna voda 1 i 2, često se označava kao vod 1+2. On se ostvaruje uzimanjem za provodnik dve žile voda 1, u paraleli, za jedan provodnik, i dve žile voda 2, takođe u paraleli, za drugi provodnik. Na taj način se dobijaju odlazna i povratna »žila« fantomnog voda. U primeni, vodovi 1 i 2 na svojim krajevima imaju translatore, tj. transformatore sa prenosnim odnosom 1. Prema tome, fantomni vod se dobija uzimanjem srednjih tačaka namotaja translatora, za tačke koje obrazuju krajeve novog kola. Ako su



Sl. 44. Vazdušne linije na drvenim stubovima.



Sl. 45. Spajanje telefonskih kablova.



Sl. 46. — Kombinovani ili fantomni vod.

provodnici i translatori savršeno identični, i ako se »srednje tačke« translatora nalaze tačno na sredini namotaja, *fizički* ili *realni* vodovi i pomoću njih ostvaren fantomni vod, potpuno su nezavisni. I zaista, struja fantomnog voda teče u suprotnom smeru kroz dve polovine namotaja svakog translatora i neće, prema tome, indukovati nikakvu struju u fizičkim vodovima. Isto tako, i struja koja protiče kroz fizički vod ima istu vrednost, a suprotan smer, u svakoj tački dve žile, što daje, s obzirom da se ove žile nalaze u paraleli, nultu vrednost rezultujuće struje fantomnog voda.

Karakteristike vodova. Slabljenje. Sa stanovišta prenosa, homogeni vod se karakteriše svojom *otpornošću* R i *induktivnošću* L (longitudinalne konstante), svojom *kapacitivnošću* C i svojim *gubicima* ili *odvodnošću* G. Ove veličine se izražavaju po jedinici dužine voda. Odvodnost G se na vazdušnim vodovima svodi na recipročnu vrednost otpornosti izolacije, a za kablove u dobrom stanju može se zanemariti.

U telefonskom prenosu, u kome se koriste samo vrlo mali naponi, gubici na vodu su znatni. Sa povećanjem dužine voda l znatno opada jačina primljenog signala. Za homogeni vod, vrednost struje I opada sa dužinom voda po sledećem eksponencijalnom zakonu:

$$I = I_0 e^{-\alpha_1 l} \qquad (1)$$

gde je I_0 početna vrednost struje, a α *relativno slabljenje* voda po jedinici dužine. Ukupno slabljenje voda dužina l je

$$\alpha l = \log \frac{I_0}{I}. \qquad (2)$$

Ovo slabljenje se izražava u *neperima* (Np), da podseti da se prethodna formula odnosi na Neperove (prirodne) logaritme. Ako se umesto jačine struja (ili napona) upoređuju predata snaga P_0 i primljena snaga P, tada je slabljenje snage, izraženo u neperima, jednako

$$\frac{1}{2} \operatorname{Log} \frac{P_0}{P}.$$

Često se, naročito u anglosaksonskim zemljama, koristi druga jedinica, *bel*, definisana pomoću decimalnih, umesto prirodnih logaritama. Za prelaz sa vrednosti izražene u belima (ili decibelima) na vrednost izraženu u neperima koristi se veza:

$$1 \text{ bel} = 1{,}151 \text{ neper},$$

i obrnuto:

$$1 \text{ neper} = 0{,}868 \text{ bela}.$$

Za homogenu liniju, ako se sa $\omega = 2\pi f$ označi kružna učestanost koja odgovara učestanosti f, u slučaju voda male reaktanse ωL (slučaj kablova korišćenih u mesnim mrežama), slabljenje je jednako:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega CR}{2}}. \qquad (3)$$

Za vodove sa velikom reaktansom (slučaj pupinovanih kablova), slabljenje je dato sa:

$$\alpha = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}. \qquad (4)$$

Tako u prvom slučaju, za pretplatničke kablove sa prečnikom provodnika 0,6 mm, slabljenje na 800 Hz iznosi 0,12 neper/km. Slabljenje voda dužine 10 km preći će vrednost od jednog nepera. Pošto je razgovor već pri slabljenju od 3 nepera veoma otežan, vidi se da ne može biti govora o korišćenju kablova ovog tipa za uspostavljanje međumesnih veza, utoliko pre što slabljenje raste sa učestanošću, kako pokazuje formula (3). Uostalom, i prema preporukama C. C. I. T. T., ukupno dozvoljeno slabljenje između ma koja dva pretplatnika nacionalne telefonske mreže iznosi 3,6 Np, gde je, pored slabljenja vodova, uključeno slabljenje svih posrednika (telefonske centrale i oba pretplatnička aparata) koji učestvuju u ostvarivanju date telefonske veze.

Dok se raspolagalo samo takvim kablovima (korišćenim u mesnim mrežama), međumesni vodovi su se sastojali od vazdušnih linija sa golom žicom dosta velikog prečnika, čije je slabljenje znatno manje (α = 0,005 neper/km za bakarnu žicu prečnika 2,5 m, često korišćenu u Francuskoj, i 0,002 neper/km za bakarnu žicu prečnika 4,5 mm, koja je, pre uvođenja kablova za velika rastojanja, služila za izgradnju dugih vodova).

Pupinovani kablovi. Pupinizacija. Međutim, usled nedostataka vazdušnih vodova i prednosti koje imaju kablovski vodovi, vrlo brzo se pristupilo traženju mogućnosti da se kablovski vodovi koriste za velika rastojanja, odnosno da se otkloni suviše veliko slabljenje koje su oni unosili.

Kao što se vidi iz izraza (4), slabljenje se smanjuje sa povećavanjem induktivnosti L. Vaši i Hevisajd (Vaschy, Heaviside) nastojali su da povećaju »konstantu« L datog kabla dodavanjem samoinduktivnih kalemova postavljenih na red. Prvi rezultati nisu bili zadovoljavajući, pa je tek Mihajlo Pupin, 1899, pokazao da je potrebno umetnuti samoinduktivne kalemove u pravilnim razmacima, malim u odnosu na talasnu dužinu signala koji se prenosi. Nađeni razmak nazvan je

Fot. X (1), P.T.T.

Pupinov korak. Između dva rata, pupinovani vodovi (*sl.* 47) imali su osnovnu ulogu u razvoju veza na velikim rastojanjima. Korak pupinizacije p u Francuskoj iznosi 1830 m ili 915 m. Samoinduktivnost L_p kalemova je, npr., 177 mH (teška pupinizacija) ili 44 mH (laka pupinizacija), gde je H simbol za henri, jedinicu električne induktivnosti.

Ekvivalentna shema pupinovanog voda može se predstaviti kolom na slici 48, pri čemu se ima u vidu da je sopstvena induktivnost kabla vrlo mala i da se može zanemariti. Data shema odgovara »niskopropusnom filtru«, tj. skupu otpornosti, kapacitivnosti i induktivnosti postavljenih tako da propuštaju samo učestanosti niže od takozvane »granične učestanosti«. Pokazuje se da je vrednost granične učestanosti pupinovanog voda jednaka

$$\frac{1}{\pi \sqrt{L_p \cdot C \cdot p}}.$$

Kod pupinovanog voda, gde su, npr., $p = 1830$ m i $L_p = 177$ mH (teška pupinizacija), granična učestanost je 2 700 Hz, tako da se ne prenosi ceo govorni opseg potreban za veran prenos glasa. S druge strane, pokazuje se da je brzina prostiranja V u takvom vodu

$$V = \frac{p}{\sqrt{L_p \cdot C \cdot p}}$$

Prema tome, brzina prostiranja opada sa povećavanjem stepena pupinizacije, i u navedenom primeru ona iznosi samo 16 500 km/s (umesto otprilike 200 000 km/s za nepupinovani kabl). U toku trajanja veze na velikom rastojanju proteklo bi primetno vreme pre nego što pretplatnik koji govori primi odgovor svog sasagovornika i ovo kašnjenje bi ometalo razgovor. Iz ovih razloga, uprkos svojim prednostima, pupinizacija ne omogućava da se ostvare zaista vrlo dugi vodovi. Rastojanja od 100 km predstavlja praktičnu granicu njenog dometa.

Pojačavači i pojačavačke stanice. Pojava *pojačavača* prilagođenih potrebama telefonije, zajedno sa prednostima pupinizacije, koja tada može da bude i lakša, omogućuje izgradnju vodova čiji bi domet bio onoliki koliko je to potrebno.

Prvi pojačavači bili su napravljeni sa *triodama*. Kasnije, pojava *pentode* donela je nov napredak. Savremeno razvijeni uređaji u najvećoj meri koriste *tranzistore* i *integrisana kola*.

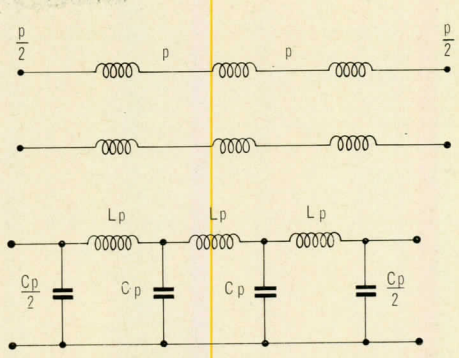
Pojačavači se postavljaju na kablovskom vodu na određenim rastojanjima (50 do 100 km), što zavisi od karakteristika kabla. Uređaj koji ostvaruje pojačanje u oba smera na istom vodu obično se naziva *pojačavač*. Pojačavači istog kabla postavljaju se u zajednička postolja u takozvanim »pojačavačkim stanicama«.

Kako pojačavač prenosi energiju koju pojačava samo u jednom smeru, stanica sadrži po jedan pojačavač za svaki smer (*sl.* 49). Povezivanje svakog smera pojačanja ostvaruje se pomoću *diferencijalnog transformatora*, transformatora sa tri namotaja, pri čemu dva imaju pristupačne srednje tačke. Ova dva namotaja vezana su jednim krajem na vod, a drugim na skup otpornosti, induktivnosti i kapacitivnosti, čija je impedansa, u opsegu korišćenih učestanosti, jednaka impedansi voda i služi za prilagođenje impedanse, a naziva se balansni ili ravnotežni vod. Sa sheme na slici 49. vidi se da se struje, pojačane u smeru AB, dele na dva jednaka dela, od kojih jedan ide na vod B, a drugi u ravnotežni vod B, tako da se u trećem namotaju ne proizvodi nikakva struja. U slučaju pojave struje u trećem namotaju i njenog pojačanja u smeru BA i nadalje, moglo bi doći do oscilovanja, čime bi uređaj postao neupotrebljiv, tj. ne bi bila obezbeđena stabilnost veze.

S obzirom da je prosečno rastojanje između pojačavačkih stanica reda 75 km, na drugom vodu bilo bi više stanica. Kako ravnotežni vodovi ne mogu imati impedansu potpuno jednaku impedansi voda, pojaviće se struje povratne sprege, koje mogu da izazovu oscilovanje sistema, odnosno zviždanje. U svakom slučaju, ovo nedopustivo izobličenje nastaje utoliko lakše, ukoliko ima više pojačavačkih stanica.

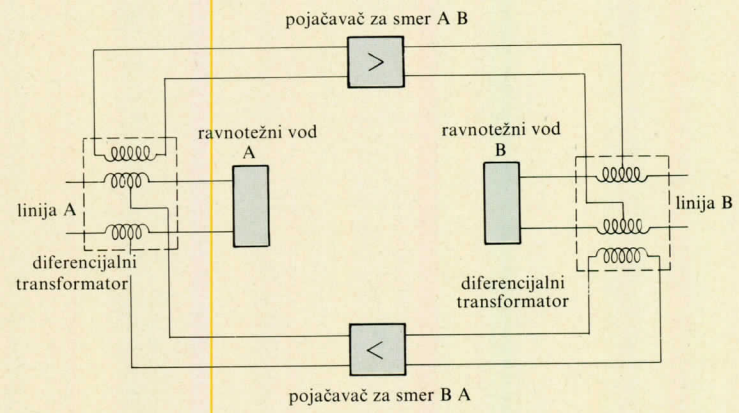
Ipak je moguće ostvariti »dvožični prenos« sa pet ili šest pojačavačkih stanica, što znači sa dometom blizu 500 km, u slučaju provodnika dovoljno velikog prečnika. Međutim, u primeni se nastoji da se pri dvožičnom prenosu broj ovih međupojačavača ograniči na dva ili tri. Da bi se ostvario veći domet i bolja stabilnost veze, koristi se »četvorožični prenos«, u kome se za svaki smer prenosa koriste dvožična kola, tako da su oba smera pojačanja u istoj pojačavačkoj stanici potpuno odvojeni (*sl.* 50). U ovom slučaju diferencijalni transformator se naziva *krajnji transformator* i postoji samo na svakom kraju voda.

Sa stanovišta mogućnosti započinjanja oscilovanja, četvorožično kolo ponaša se kao jedan pojačavač u dvožičnom prenosu bez obzira na broj pojačavačkih stanica. Domet ovakvog kola je mnogo veći od dometa pri dvožičnom prenosu i ograničen je pojavom odjeka. U stvari, ravnotežni vod ne može potpuno da zameni bilo koji dvožični pretplatnički vod koji je na njega priključen. Ovo izaziva pojavu struje refleksije, koja se vraća ka osobi koja govori. Ako je vreme prostiranja dovoljno veliko, uho će osetiti vrlo neugodan, jasno odvojen odjek izgovorenih reči. Pojava će utoliko više smetati ukoliko su vodovi jače pupinovani, usled čega je smanjena brzina prostiranja ovih vodova. Stoga se, po cenu povećanja broja i veličine pojačavačkih stanica, vrlo brzo odustalo od jače pupinovanih vodova, koji su zamenjeni lakše pupinovanim vodovima ($L_p = 44$ mH, brzina prostiranja 48 500 km/s). U ovim uslovima uspostavljene su dobre veze na rastojanju većem od 1 000 km. Osim toga, na vrlo dugim vodovima može se koristiti uređaj za *prigušivanje odjeka*. Dok se razgovor obavlja u jednom smeru, prekinuta je veza u drugom smeru. Ovi uređaji su vrlo efikasni, ali su veoma složeni i zahtevaju savršeno podešavanje.

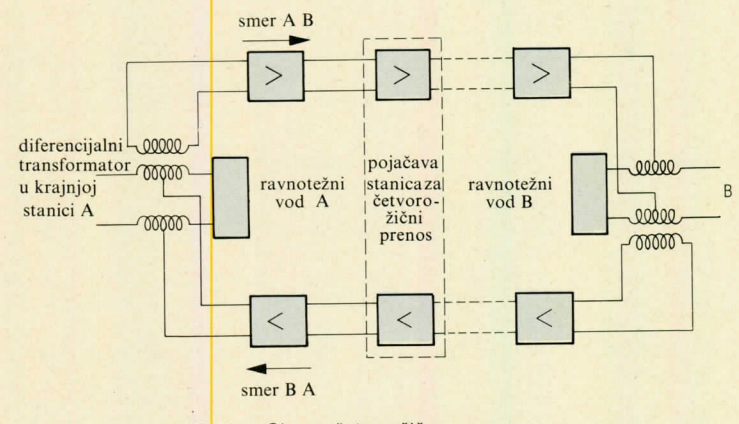


Sl. 47. — Pupinovani vodovi.

Sl. 48. — Ekvivalentna shema pupinovanog voda.



Sl. 49. — Shema pojačavačke stanice u dvožičnom prenosu.



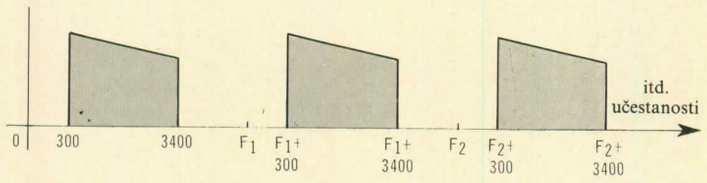
Sl. 50. — Shema četvorožičnog prenosa.

TELEFONIJA SA NOSEĆIM STRUJAMA. VF TELEFONIJA. Dostignuća u oblasti pojačanja omogućila su sve veću kompenzaciju slabljenja na kablovskim vodovima. Iz ovog proističu dve mogućnosti, koje se, uostalom, uporedo koriste: s jedne strane, to je smanjivanje prečnika provodnika, što predstavlja značajnu uštedu, i, s druge strane, to je smanjivanje stepena pupinizacije, što ima za posledicu povećanje granične učestanosti i brzine prostiranja, odnosno smanjenje izobličenja i odjeka. U ovim uslovima pristupa se ostvarivanju veza koje prenose sve šire frekventne opsege, koji su između ostalog, mnogo širi, od opsega 300—3 400 Hz, koji omogućava kvalitetan prenos razgovora. Prema tome, moguće je izvršiti superponiranje više jednovremenih telefonskih razgovora po istom vodu, premeštanjem opsega govornih učestanosti u opsege koji slede jedan za drugim svakih 4 000 Hz. Pošto se ova transpozicija postiže postupkom *modulacije*, pri prijemu se mora izvršiti *demodulacija*, koja ponovo uspostavlja govorne učestanosti. S druge strane, potrebno je još pre demodulacije razdvojiti različite frekventne opsege, što je omogućeno upotrebom »filtera«.

Ako se *amplituda* struje vrlo visoke učestanosti F, koja se naziva *noseća učestanost*, menja u ritmu učestanosti f, dobija se rezonantna struja, koja je zbir tri struje čije su učestanosti $F - f$, F i $F + f$. Tako nastaje *modulacija amplitude noseće struje učestanosti* F, modulacionom strujom učestanosti f. Usled ove modulacije, pored noseće učestanosti F, pojavljuje se i niža učestanost $F - f$ i viša učestanost $F + f$. Ako se, posredstvom filtera, prenosi, npr., samo učestanost $F + f$, i ako se pri prijemu ovoj struji superponira nova struja F, dobiće se tri učestanosti $F - (F + f)$, F i $F + (F + f)$. Ovim postupkom demodulacije sačuvana je samo

prvobitna učestanost *f*, odnosno modulaciona učestanost. Ova *amplitudna modulacija* predstavlja najednostavniji postupak modulacije.

Ako se F moduliše opsegom učestanosti od 300 do 3 400 Hz, preporučenim za telefonske razgovore, dobija se gornji bočni opseg od F + 300 do F + 3 400 Hz i donji bočni opseg F — 300 do F — 3 400 Hz. Sve telefonske učestanosti sadržane su u svakom od ova dva opsega, pa je dovoljno prenositi samo jedan od njih, npr., gornji opseg, što se postiže filtriranjem proizvoda modulacije. Obično se više ne prenosi ni noseća učestanost F. Prema tome, na liniji se nalaze frekventni opsezi prikazani na slici 51, gde su F_1, F_2 itd. noseće učestanosti.



Sl. 51. — Učestanosti koje se prenose u sistemu sa nosećim strujama.

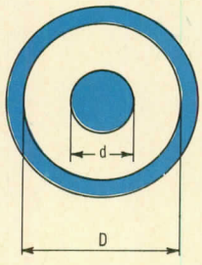
Kablovi sa simetričnim paricama. U stvari, VF-tehnika počela je prvobitno da se koristi na vazdušnim vodovima, pošto ovi prenose vrlo širok opseg učestanosti. Međutim, električne karakteristike vazdušnih vodova su veoma nestabilne zbog osetljivosti na nepogode i povećane opasnosti od *dijafonije* (preslušavanja), što znači mešanja razgovora usled pojave uzajamne indukcije između vodova. Upotreba vazdušnih vodova je ograničena, bar u tehnički razvijenim zemljama, i VF-telefonija se uglavnom razvijala usavršavanjem nepupinovanih kablova (kablova sa simetričnim paricama). Budući da ovi kablovi nisu pupinovani, potrebno je povećati broj pojačavača sa velikim pojačanjem, npr., postavljati ih na svakih 15 km. Tako su u Francuskoj, jedan za drugim, postavljani sistemi sa dva kanala (obično četvorke pupinovane sa 22mH, granična učestanost 8 000 Hz), sistemi sa četiri kanala (parice prečnika 1,4 mm, pupinovane sa 2,8 mH, granična učestanost 23 000 Hz), zatim sistemi sa 12 ili 24 kanala (simetrične parice nepupinovane, prečnika 0,9 mm, pojačavači svakih 15 km). U ovom poslednjem slučaju ne može se više govoriti o graničnoj učestanosti, već jednostavno ukazati da, počev od 120 Hz, slabljenje dosta brzo raste sa učestanošću. Pri ovoj učestanosti brzina prostiranja je 212 000 km/s.

Bliže određivanje uslova rada usaglašeno je međunarodnim normama: razmak između pojedinih nosećih učestanosti je 4 kHz, pa za prenošenje dvaneast kanala ukupni opseg učestanosti zauzima 48 kHz, te se i noseće učestanosti biraju tako da ovaj opseg bude smešten između 12 i 60 kHz.

Kaoksijalni kablovi. Nekoliko godina pre drugog svetskog rata preduzeta su proučavanja, radi nalaženja ekonomičnijih rešenja za ostvarivanje velikog broja telefonskih veza i prenosa širokih opsega učestanosti naophodnih za televiziju. Proučavanja su ukazala na potrebu za novim tipom kabla koji može da obezbedi prenos frekventnog opsega širine više hiljada kiloherca. Za ovako visoke učestanosti, kablovi sa simetričnim paricama imali su doista nedopustivo veliko slabljenje. Problem je rešen stvaranjem *koaksijalnog kabla*, koji omogućuje prenos vrlo širokog opsega učestanosti.

Kaoksijalni kabl, ili kaoksijalna parica (*sl.* 52), sastoji se od centralnog provodnika *d*, koji je okružen spoljašnjim provodnikom u obliku cevi unutrašnjeg prečnika D, pri čemu oba provodnika imaju istu osu. Ovakvom konstrukcijom se ne stvara nikakvo magnetno polje van kabla, što znači da su gubici energije usled zračenja pri vrlo visokim učestanostima praktično jednaki nuli. U Francuskoj se koriste sledeće standardne dimenzije za koaksijalni kabl: $d = 2{,}6$ mm, $D = 9{,}5$ mm. Provodnici su od bakra. Izolacija se ostvaruje pomoću polietilenskih diskova postavljenih u jednakim razmacima na centralni provodnik. Sve se to nalazi u čeličnoj zaštiti koja je i sama obavijena izolujućim papirom, pa je sve zajedno okruženo olovnim omotačem i oklopom. Prema principu četvorožičnog prenosa, obično se koriste dve koaksijalne parice, i to za svaki smer po jedna. Sa ovom vrstom kabla, koristeći pojačavače postavljene na svakih 9 km, jednovremeno se prenosi 960 veza, smeštenih u opseg učestanosti u granicama od 60 do 4 000 kHz.

Savremena dostignuća u proizvodnji pojačavača omogućuju da se, postavljanjem pojačavačkih stanica na svaka 4,5 km, jednovremeno prenosi do 2 700 veza, pri čemu se koristi opseg učestanosti od 60 kHz do 12 000 kHz. Brzina prostiranja je vrlo velika: 274 400 km/s za 60 kHz, 286 300 km/s za 3 000 kHz.

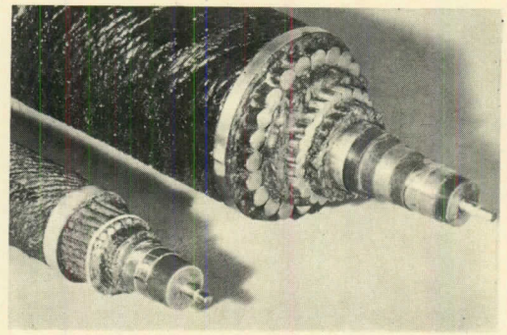


Sl. 52. — Koaksijalna parica.

Podmorski kablovi. U međukontinentalnom prenosu, radio-veze su učinile i još čine značajne usluge, ali korišćenje podmorskih kablova ima takve karakteristike i prednosti (veća stabilnost, mogućnost ostvarenja velikog broja veza) koje nameću njihovu široku upotrebu i obezbeđuju im vodeću ulogu, naročito na pravcima sa jakim saobraćajem.

Prvi postavljeni podmorski kablovi bili su isključivo telegrafski kablovi, koji su sadržavali samo jedan provodnik, sa morem kao povratnim vodom. Prvi transatlantski kabl ovog tipa potiče iz 1886.

Postavljanje prvih podmorskih koaksijalnih telefonskih kablova je relativno skorijeg datuma i prvi transatlantski telefonski kabl potiče iz 1956. Sastav podmorskih koaksijalnih kablova je sličan sastavu podzemnih kablova, ali je prostor između unutrašnjeg i spoljašnjeg provodnika, radi veće mehaničke čvrstoće, potpuno ispunjen polietilenskim izolatorom (*sl.* 53). Podmorski telefonski kablovi snabdeveni su podvodnim pojačavačima, koji se napajaju iz krajnjih stanica i čija je izgradnja bila moguća tek stvaranjem vakuumskih cevi dugog veka. Ovi pojačavači se zamenjuju potpuno tranzistorizovanim pojačavačima. Podmorski telefonski kablovi omogućavaju svojim karakteristikama da se uspostavi 36—80 telefonskih veza, ali se sa razvojem tehnike taj broj povećava.

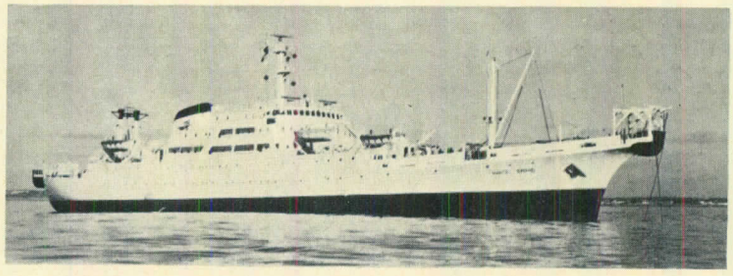


Sl. 53. — Podmorski kabl sa koaksijalnim parom (kabl Marsej-Alžir: *desno*, kabl za priobalno područje: *levo*, kabl za velike dubine).

Tako drugi kabl Francuska—Sjedinjene Države, čije je polaganje počelo 1964. i koji je pušten u rad krajem 1965, obezbeđuje više od sto telefonskih veza, zahvaljujući usavršavanju strukture kabla. U stvari, da bi se povećao broj veza, treba povećati ukupni frekventni opseg koji se prenosi. Da bi se smanjilo slabljenje, potrebno je povećati dimenzije provodnika, što vrlo brzo dovodi do nedozvoljeno velike težine i cene. No, usled *površinskog* (skin) *efekta*, što znači usled neravnomerne raspodele struja visokih učestanosti u punom provodniku, odnosno usled povećanja gustine struje prema njegovoj periferiji, povećanjem prečnika bakarnog provodnika, njegov centralni deo bi pri visokim učestanostima bio sve slabije iskorišćen. S druge strane, čelični oklop kabla pri velikim dubinama služi samo zato da podnese velika mehanička naprezanja koja nastaju za vreme polaganja ili izvlačenja kabla. Zbog toga se centralni provodnik pravi od čeličnog užeta, dovoljno jakog da podnese mehanička naprezanja, oko koga je postavljen bakarni omotač koji jedini služi za prenos električnih veličina. U ovom slučaju, oklop se ne koristi, osim za kablove koji se polažu u male dubine, pošto su, usled kretanja mora, podvrgnuti neprekidnom trenju.

Polaganje podmorskih kablova zahteva korišćenje posebnih brodova. Francuski brod ove vrste je »Marsel-Bejar« (Marcel-Bayard) (*sl.* 54), porinut 1961, dug 121,2 m, širok 15,6 m, koji u svojim skladištima može poneti 3 300 tona koaksijalnog kabla uobičajene vrste, što mu omogućava da samo pri jednom putovanju postavi kabl Perpinjan—Oran (Perpignan—Oran).

Prenos pomoću talasovoda. Ako se odstrani centralni provodnik koaksijalnog kabla, dobija se *talasovod*, što znači uređaj sa dielektrikom, iz koga bi se, pri izrazito visokim učestanostima, mogla dobiti struja pomeraja, čija bi longitudinalna komponenta u smeru voda imala dovoljno veliku vrednost. Slabljenje pri visokim učestanostima je veoma malo, pa i ovo slabljenje, u nekim slučajevima, može još opasti ako učestanost postane vrlo visoka. U početku talasovodi su imali primenu kao antenski fideri (uvodnici antena) u nekim radio-relejnim i predajnim televizijskim stanicama. Njihova korist u telefoniji je očigledna, jer se pomoću njih mogu prenositi ekstremno široki opsezi učestanosti (hiljade megaherca), što odgovara stotinama hiljada telefonskih kanala.



Sl. 54. — Brod za polaganje kablova Marsel-Bejar.

Fot. X.

PRENOS RADIO-PUTEM. RADIO-RELEJNE VEZE. Radio-veze igraju važnu ulogu u telefoniji. Međutim, one zavise od vrednosti usvojene noseće učestanosti. Mnoge veze su ostvarene pomoću nosećih talasa čija se učestanost nalazi između 2 i 30 MHz. Ovi talasi imaju prednost da se mogu prostirati na velika rastojanja, refleksijom od jonosferskih slojeva atmosfere. Međutim, oni su veoma osetljivi na radio-električne smetnje, i, s druge strane, s obzirom na tehničke uslove eksploatacije, može se raspolagati samo ograničenim brojem kanala. Uprkos ovim teškoćama, oni se i dalje koriste za daleke interkontinentalne veze, npr., prema Južnoj Americi i Dalekom istoku.

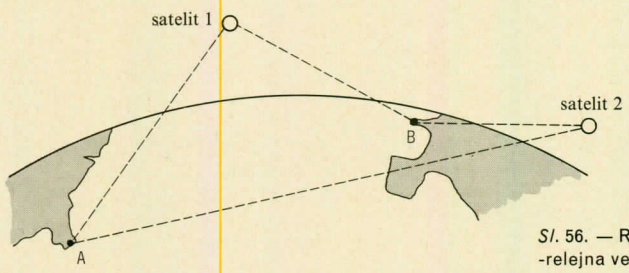
Opseg centimetarskih talasa ima vrlo široku primenu. To je oblast »radio-relejnih veza« (Hercovi talasi). Ovako ostvarene telfonske veze predstavljaju deo međumesne mreže, i zamenjuju kablove na velikim rastojanjima, te se često, uostalom nepravilno nazivaju »Hercovi kablovi«.

Noseća učestanost koja se koristi za radio-relejne veze je reda 4 000 MHz, što odgovara talasnoj dužini od 8 cm. Upotreba takvog talasnog opsega dozvoljava prenos opsega učestanosti čija širina (reda 10 MHz ili više) omogućuje emitovanje televizijskih programa i uspostavljanje mnogih telefonskih kanala. Međutim, centimetarski talasi ne mogu zaobilaziti prepreke i njihov koristan domet je posebno ograničen okruglinom Zemlje, koja izaziva na svakih 50 km razliku nivoa od oko 200 m. Dakle, usmerene veze se koriste u dometu »neposrednog vidika«, što znači da se njihova energija obnavlja u relejnim stanicama koje su postavljene na međusobnom rastojanju optičke vidljivosti i nalaze se na istaknutim tačkama tla *(sl.* 55). Srednja udaljenost ovih »radio-relejnih tornjeva«, koji obezbeđuju prijem, pojačanje i emitovanje, je reda 70 km.

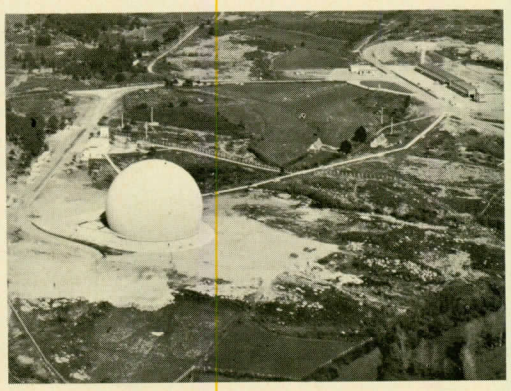
Savremene radio-veze sadrže više telefonskih kanala (svakom odgovara tri stotine veza) i jedan televizijski kanal. Radio-relejni snop Francuska—Velika Britanija sadrži tri odlazna i povratna televizijska kanala i tri telefonska kanala sa po šest stotina veza. U bliskoj budućnosti ostvarivaće se kanali i sa po dve hiljade veza.

Koristeći prelamanje centimetarskih talasa pri prolasku kroz različite slojeve troposfere, može se uspostaviti veza između stanica koje su van dometa neposredne vidljivosti. Ovo povećanje dometa ostvaruje se po cenu velikog povećanja pojačanja, i ove »transhorizontne veze pomoću troposferskog prostiranja« u suštini se koriste u predelima gde, zbog teških uslova održavanja veze, dolaze do izražaja prednosti ovog povećanja rastojanja između stanica, npr., Sahara.

PRENOS POMOĆU VEŠTAČKIH SATELITA. Prenos pomoću veštačkih satelita omogućava relativno veliki broj primena, koje su danas prešle čisto eksperimentalne okvire. Ukoliko raspolaže samo jednim pogodno opremljenim veštačkim satelitom, on bi se mogao koristiti za bežičnu vezu između dve tačke A i B *(sl.* 56) sve dok se nalazi u zajedničkom vidnom polju obe stanice i ovo vreme će biti utoliko kraće ukoliko je njegova orbita bliže Zemlji. Da bi se ostvarila dugotrajna veza, trebalo bi upotrebiti čitav skup satelita koji bi se uzastopno koristili. Tako bi za orbite na visini 2 000—6 000 km bilo potrebno dvadesetak satelita na koje bi sukcesivno bile usmerene antene takvih stanica kao Plemer-Bodu (Pleumeur-Bodou) u Francuskoj *(sl.* 57).



Sl. 56. — Radio-relejna veza pomoću satelita.

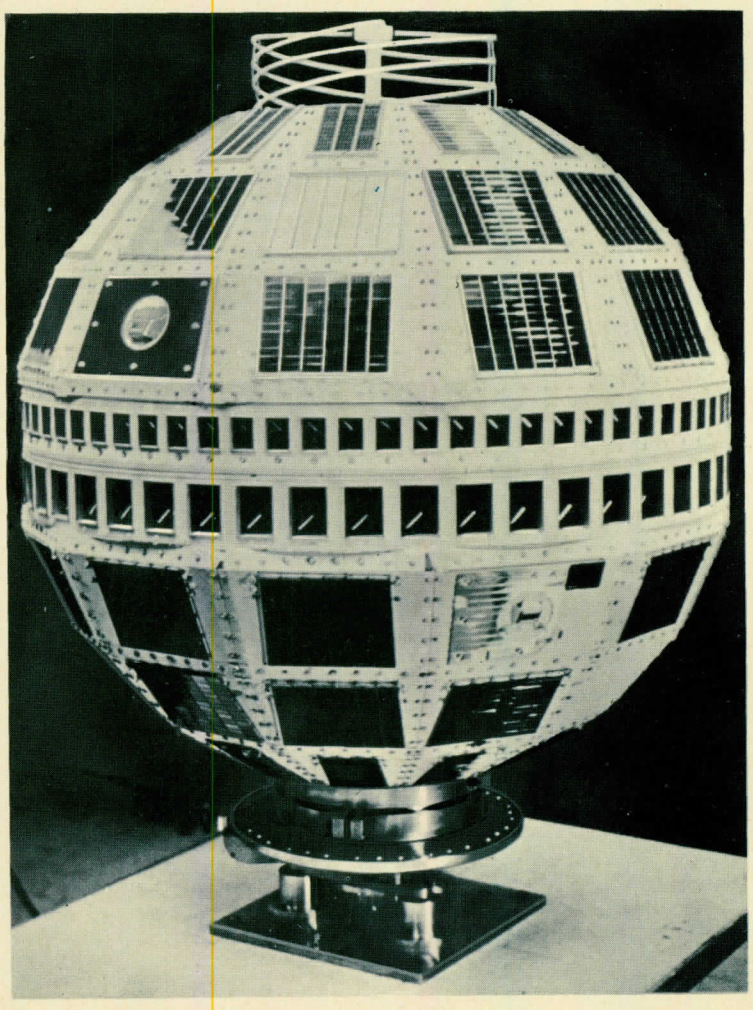


Sl. 57. — Radio-relejna stanica Plemer-Bodu izgrađena posebno za veze sa telekomunikacionim satelitima. Plastični svod zaklanja antenu.



Sl. 55. — Radio-relejni toranj u Medonu.

Fot. P.T.T. Alain Perceval, X.



Sl. 58. — »Telstar I«.

Ako se sateliti postave u ekvatorijalne orbite na visini od oko 36 000 km, trajanje njihovog obilaženja iznosilo bi 24 časa. Prema tome, oni bi izgledali nepokretni za posmatrača sa Zemlje i takav skup od tri satelita (sa 24-časovnim obilaženjem oko Zemlje) bio bi dovoljan da se ostvari telekomunikaciona mreža za celu Zemljinu kuglu.

Polazeći od prethodnih napomena, telekomunikacioni sateliti bi se mogli podeliti u tri osnovne grupe:

1. **Sateliti sa slučajnom — povremenom vezom**. Oni se kreću na visini manjoj od 36 000 km i putanje im nisu međusobno sinhronizovane. Potreban bi bio veliki broj ovih satelita da se ostvari telekomunikaciona mreža za ceo svet, ali su tehnički problemi koje treba rešiti, relativno jednostavni.

2. **Sinhronizovani sateliti**. Broj potrebnih satelita se smanjuje ako se postigne da se njihovo kretanje sinhronizuje, tako da u određenim vremenskim razmacima nadleću uvek iste tačke na površini Zemlje. Ove prednosti mogu se postići samo savlađivanjem znatnih tehničkih teškoća pri lansiranju.

3. **Stacionarni sateliti**. Oni prelaze svoje orbite za 24 časa i izgledaju nepokretni u odnosu na Zemlju. Broj satelita potrebnih za uspostavljanje telekomunikacione mreže za celu Zemlju smanjuje se, ali je njihovo lansiranje još složenije.

Takođe se razlikuju *pasivni sateliti* i *aktivni sateliti*. Prvi imaju jedino funkciju odbijanja radio-talasa i vraćaju prijemnoj stanici samo vrlo mali deo energije poslate iz predajne stanice. Nasuprot njima, aktivni sateliti sadrže uređaj za prijem, pojačanje i emitovanje.

Ostvarenje veza pomoću veštačkih satelita postavlja ozbiljne probleme. Napredak postignut u proizvodnji elektronskih sastavnih delova, naročito njihova minijaturizacija, ima ovde važnu ulogu.

Već je lansirano više telekomunikacionih satelita. Pasivni sateliti »Eho I« i »Eho II«, lansirani avgusta 1960. i jula 1962, imali su oblik velikih sferičnih balona (prečnika 30 i 42 m respektivno), prekrivenih aluminijumskim slojem. »Telstar I« *(sl.* 58), aktivni satelit koji može da se koristi za jedan televizijski kanal ili skup od 600 telefonskih kanala, lansiran je jula 1962, a »Telstar II« maja 1963. Decembra 1962. satelit »Relay I« postavljen je na višu orbitu nego »Telstar«. Stacionarni satelit »Syncom III«, sa ekvatorijalnom orbitom visine 36 000 km, i vremenom obilaženja Zemlje od 24 časa, lansiran je 1964. i omogućio je, između ostalog, izvanredan televizijski prenos. Posle prvih ostvarenih pokušaja, a vodeći računa o prikupljenim rezultatima, potpisan je 1964. sporazum između Sjedinjenih Država i više evropskih zemalja o realizaciji sistema komercijalnih veza. U skladu sa ovim sporazumom, aktivni stacionarni satelit *Early Bird* (Rana ptica) uspešno je lansiran aprila 1965, i njegova eksploatacija mogla je početi krajem juna iste godine.

Telegrafija

Za prenos pisanih poruka, telegraf koristi iste puteve kao i telefon. Međutim, prenos jedne telegrafske veze zahteva samo uzan opseg učestanosti, tako da se postupkom modulacije može prenositi više telegrafskih veza samo jednim telefonskim kanalom. Obično se prenosi osamnaest telegrafskih veza istim kanalom (što predstavlja princip harmonijske telegrafije).

MORZEOV TELEGRAFSKI APARAT

Električna telegrafija nastala je tek usavršavanjem Morzeovog (Morse) aparata čiji je princip rada prikazan na slici 59. Pri predaji, telegrafista propušta ili prekida struju kroz liniju. Pod uticajem prenete struje elektromagnet u prijemnoj stanici privlači svoju kotvu, usled čega kraj poluge pisača pritiska papirnu traku. Uređaj za pisanje ispisuje tačku ili crtu zavisno od vremena proticanja struje. Ova dva znaka, upotrebljena prema određenom alfabetskom kodu, omogućuju prenos poruka.

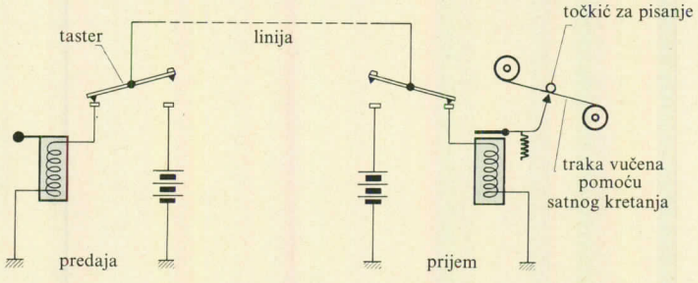
HJUZOV TELEGRAFSKI ŠTAMPAČ

Prenos telegrafske poruke Morzeovim aparatom bio je veoma spor, zbog čega je iskorišćenje linija, koje su predstavljale uglavnom najskuplji deo sistema, bilo loše. Posle Morzeovog aparata, Hjuzov (Hughes) telegrafski štampač predstavlja značajan napredak. U ovom aparatu svi signali imaju uvek isto trajanje. U tim određenim vremenskim intervalima signal se prepoznaje označavanjem trenutka u kome on započinje u odnosu na tačno određeni početak intervala. Shematski (*sl.* 60), Hjuzov aparat se sastoji od cilindrične kutije K, gde se nalazi dvadeset osam *zavrtanja* Z, od kojih svaki odgovara jednom znaku i koji se mogu podizati pomoću dirki jedne tastature. Jedna ručica se ravnomerno okreće iznad ove kutije. Ako je jedan od zavrtanja podignut, ručica se prebacuje i na liniji se uspostavlja struja. Pri prijemu, točak R_t, nazvan *štamparski točak*, na čijem su obodu slova koja odgovaraju pomenutim zavrtnjima, okreće se potpuno sinhrono sa ručicom predajnika. Kada se primi signal, pobuđivanjem elektromagneta E privlači se kotva A, usled čega se papirna traka p-p prislanja na štamparski točak koji na njoj štampa odgovarajući znak. Takođe se može preneti *signal inverzije*. Posle njegovog odašiljanja, preneti signali dobijaju drugačije značenje od onog koje su imali pre tog znaka (npr., cifre umesto slova). Na ovaj način se jednostavnim putem udvostručavaju mogućnosti tastature, odnosno broj prenetih znakova.

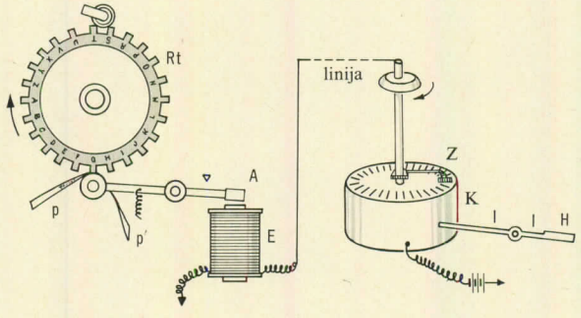
BODOOV APARAT

Iskorišćenje linija je poboljšano usavršavanjem uređaja koji omogućuju jednovremeni prenos izvesnog broja poruka na istoj liniji. *Sistem dupleks* omogućuje jednovremeni prenos dva telegrama u suprotnim smerovima na istoj liniji; *sistem dipleks* primenjuje se pri prenošenju dve poruke u istom smeru; povezivanje dupleks i dipleks-sistema vodi *sistemu kvadrupleks*, koji omogućuje jednovremeni prenos po dve poruke u svakom smeru. Naravno da je sistem nosećih struja znatno proširio mogućnosti jednovremenog prenosa. S druge strane, između dva signal iste poruke obično postoji mrtvo vreme. I ovo mrtvo vreme se može koristiti za prenos ako se usvoji sistem koji omogućuje da se linija sukcesivno ustupa većem broju operatora koji bi je zauzimali samo u vremenu potrebnom za emitovanje jednog signala. Budući da radi na ovom principu, Bodoov (Baudot) aparat, čija je uloga u razvoju telegrafije bila vrlo značajna, predstavlja »aparat sa momentima«, okarakterisan činjenicom da su svi signali istog trajanja, sami podeljeni na jednake intervale ili »momente«. Bodoov sistem predstavlja sistem sa pet momenata. Električnim putem se prenosi početak (ili kraj) ovih momenata.

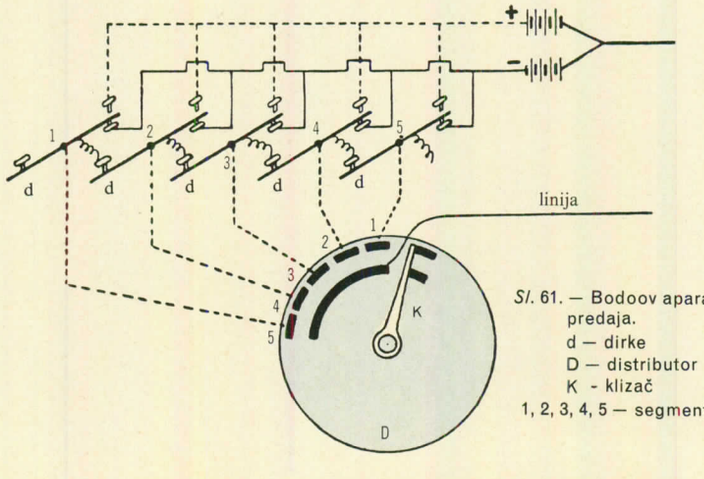
Praktično, Bodoov aparat za emitovanje *(sl.* 61) sadrži *predajnik* u obliku tastature sa 5 dirki *d*. Ove dirke su povezane sa pet segmenata (označenih na slici



Sl. 59. — Princip Morzeovog telegrafa.



Sl. 60. Princip rada Hjuzovog telegrafskog štampača.

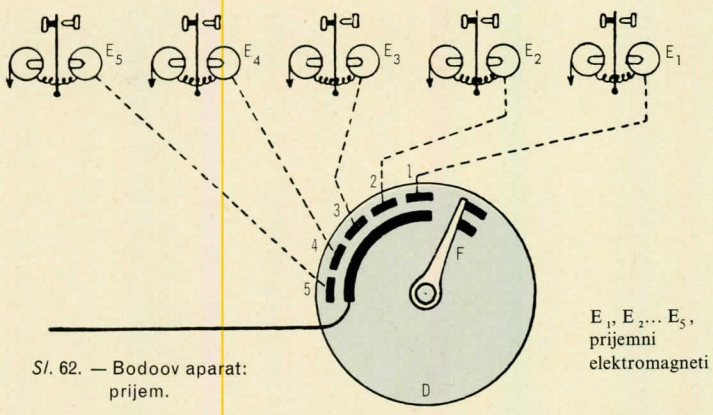


Sl. 61. — Bodoov aparat:
predaja.
d — dirke
D — distributor
K - klizač
1, 2, 3, 4, 5 — segmenti

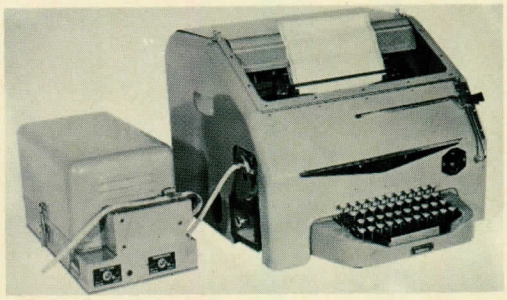
sa 1, 2, 3, 4 i 5) koji su raspoređeni po obimu kružnog *distributora* D, po kome klizi klizač K. Aparat je tako napravljen da dirka u normalnom stanju šalje u liniju struju suprotnog smera od struje koju šalje kada je pritisnuta. Jedan znak će biti okarakterisan položajem svake od ovih dirki i aparat omogućuje da se ostvari 2^5 kombinacija, što znači da se prenesu 32 različita signala. Uostalom, ovaj broj se udvostručava pomoću uređaja za inverziju, koji upravlja zamenom jednog niza znakova drugim. U prijemnoj stanici *(sl.* 62) nalazi se distributor identičan predajnom i po njemu klizi klizač savršeno sinhrono sa klizačem u predajnoj stanici. Kombinacija signala formirana u predajnoj stanici biće reprodukovana u prijemnoj stanici posredstvom elektromagneta E_1, E_2, E_3, E_4, E_5, vezanih za segmente prijemnog aparata, a mehanizam koji se naziva *pretvarač*, obezbeđuje štampanje štamparskog znaka koji, po Bodoovom kodu, odgovara ovoj kombinaciji.

S obzirom da je za predaju i prijem potrebno samo pet segmenata, po obodu distributora mogu se postaviti, npr., četiri niza od po pet segmenata, koji bi odgovarali grupi od četiri aparata koje uslužuju četiri operatora: ovo je »Bodoov kvadrupleks«. Postoji i »Bodoov sekstupleks«. U skladu sa ranije pomenutim principom, ista linija se sukcesivno stavlja na raspolaganje svakom operatoru.

Brzina telegrafskog prenosa izražava se u »bodima«, u znak priznanja Bodou. *Bod* odgovara broju jedinačnih elemenata (momenata) prenetih u sekundi u posmatranom telegrafskom kodu. Osamdest boda predstavlja prosečno prenos od sto reči u minuti. Jednostavan Bodoov aparat omogućuje da se postigne brzina saobraćaja reda 40 boda (pedest reči u minuti).



Sl. 62. — Bodoov aparat: prijem.



Sl. 63. Teleprinter. *Levo*, automatski bušač trake.

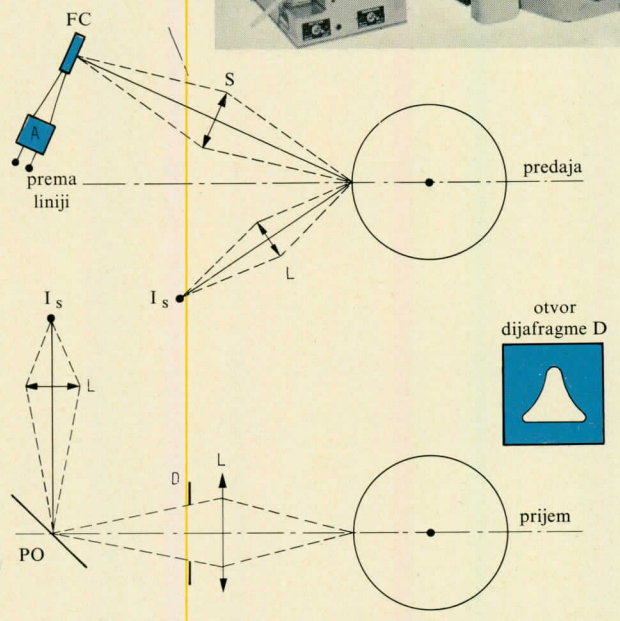
TELEPRINTERI. MREŽE TELEKSA

Opisanim aparatima može rukovati samo vrlo uvežbano osoblje. Oni su sada gotovo potpuno zamenjeni teleprinterima (*sl.* 63), pravim mašinama za pisanje na rastojanju, koje daktilografi mogu koristiti posle veoma kratke obuke. Pri prijemu, teleprinter (ili teleštampač) jasno štampa primljenu poruku, čak i u odsustvu operatora. Realizacija ovog aparata je dosta složena. Neke funkcije se sada mogu ostvariti elektronskim putem (elektronski teleprinteri).

Teleprinteri se mogu postaviti neposredno kod pretplatnika koji se povezuju posredstvom centrala, te mogu međusobno menjati poruke. Tako je stvorena i nastavlja da se razvija *mreža teleksa*, koja koristi slična sredstva za uspostavljanje veza kao i telefonija. U Francuskoj je mreža teleksa potpuno automatizovana i centrale su opremljene uređajima koji su neposredno proistekli iz uređaja automatskih telefonskih centrala.

FOTOTELEGRAFIJA

Za prenos na daljinu nepokretnih slika (fotografije, crteži, rukopisi itd) fototelegrafija koristi žični i bežični način. Kao posledica radova koje je u Francuskoj izvršio E. Belen (E. Belin) usavršen je uređaj sa sledećim principom rada. Prenošena slika je namotana na valjak kome su jednovremeno nametnuta dva kretanja konstantnom brzinom: translatorno kretanje duž ose i rotaciono kretanje oko ose. Prema valjku se šalje veoma uzan svetlosni snop koji, usled ovog dvostrukog kretanja, ispituje sliku po zavojnici sa vrlo malim korakom. Reflektovani svetlosni snop biće modulisan zavisno od osvetljaja uzastopnih elemenata površine ispitivane slike, pa će i promenljiva struja foto-ćelije na koju pada svetlosni snop biti modulisana u istom ritmu. Po prijemu, ova struja, slično galvanometru sa ogledalom, pomera svetlosni snop duž dijafragme sa otvorom zvonastog oblika, što znači da će i količina propuštene svetlosti koja zavisi od korisne širine dijafragme biti funkcija promene struje. Propuštena količina svetlosti deluje na fotoosetljivi papir namotan na valjak koji se sinhrono kreće sa valjkom predajnika, usled čega će se u prijemnom centru reprodukovati odaslana slika.



Sl. 64. — Princip fototelegrafije: kretanja dva cilindra su sinhrona.
Predaja: IS — izvor svetlosti; S — sočivo; FC — fotoelektrična ćelija; A — pojačavač.
Prijem: IS — izvor svetlosti; S — sočivo; D — dijafragma sa otvorom u obliku zvona; PO — pokretno ogledalo za modulisanje svetlosnog snopa.

Prenos podataka

Telegrafija omogućuje skoro trenutan prenos podataka između udaljenih korisnika i elektronskog računara, koji se koristi za rešavanje naučnih problema ili automatsku regulaciju procesa proizvodnje. Preneseni podaci sadrže kako informaciju o obrađivanom problemu tako i program za određivanje toka operacije. Ovi programi i podaci predstavljaju *ulazne informacije* elektronskog računara. Dobijeni rezultati, a ponekad i naredbe koje se prenose korisniku, nazivaju se *izlazne informacije* elektronskog računara.

Prenos informacija se obavlja njihovim pretvaranjem u određeni broj električnih znakova koji se modulišu pri predaji i demodulišu pri prijemu. Ovo pretvaranje u signale telegrafskog tipa, kao i recipročna operacija, ostvareni su posredničkim uređajima koji se nalaze u računskom centru pored računara i ponekad čine njegov sastavni deo.

Zbog brzine rada računara zahteva se znatno veća brzina prenosa informacija nego u klasičnoj telegrafiji, koja ovde može dostići hiljade boda. Usled toga se ne koristi uzan propusni opseg, dovoljan za prenos normalizovane telegrafske veze, već čitav telefonski kanal koji omogućuje slanje do oko dve hiljade boda ili, čak, skup nekoliko telefonskih kanala. S druge strane, računar za obradu podataka ne može prihvatiti stepen greške prenosa klasične telegrafije, koji, iako mali, ipak postoji i iznosi 1 : 10 000 ili čak više. Prema tome, potrebno je otkriti i ispraviti ove greške tako da se njihov broj svede na krajnje malu vrednost koja se može dozvoliti u elektronskim računarima. Metodom sravnjivanja, npr., pristupa se automatskom ponavljanju (često signala prijemne stanice, što je efikasnije) i upoređivanju signala dva prenosa. U slučaju neslaganja signala izaziva se nova provera pogrešnog dela. Druga metoda sastoji se u ispitivanju sastava signala u funkciji određene sheme, kojoj on mora da bude sistematski saglasan. Metoda sadrži, npr., određeni broj trenutaka u kojima uređaj šalje ili ne šalje struju. Primljeni signali, koji ne odgovaraju shemi, su pogrešni. Najzad, u nekim sistemima, signal je podeljen u blokove i svakom bloku prethodi poseban signal koji omogućuje postavljanje uređaja u sinhronizam i fazu. Svaki signal bloka karakteriše se šifrovanim podatkom i eventualne greške se otkrivaju sabiranjem svih ovih oznaka za skup bloka i upoređivanjem zbirova pri emisiji i prijemu. Uostalom, predloženi su ili su u toku proučavanja i drugi sistemi otkrivanja grešaka.

Preveo **Nenad Milojević**

Robert COSTE

NAFTA I NJENI DERIVATI

Istorija

Nafta je nesumnjivo bila poznata i u izvesnoj meri korišćena od nastanka čovečanstva, a dokumenti o tome spadaju među najstarije koji su do danas sačuvani.

U raznim oblastima Zemljine kugle postoje izvori ili površinske pojave različitog tipa, tako da su ranije otkrivene mogućnosti korišćenja nafte nego sama nafta. Biblijske priče pominju bitumen u Judeji i večite vatre koje i danas gore u Azerbejdžanu i Iraku. Herodot, između ostalih antičkih autora, detaljno i dosta tačno opisuje ove manifestacije prirodnog gasa. Kinezi su verovatno bili prvi, kao i u mnogim drugim oblastima, koji su praktično koristili naftu, i poznato je da im je ona tradicionalno služila kao gorivo za zagrevanje kuća, spremanje hrane i proizvodnju cigala, kao i za osvetljenje. Može se pretpostaviti da su i nekadašnji stanovnici Latinske Amerike koristili jezera bitumena u Venecueli.

U Evropi se najstariji podaci o korišćenju nafte odnose na podmazivanje točkova kola, a naročito na medicinu, gde je sve do relativno novijeg vremena postojala tendencija da se posebna lekovita svojstva pripisuju materijama koje su najegzotičnije i najteže se mogu naći. U Evropi se do nafte dolazilo u Pešelbronu (čije ime znači »bunar smole«) u donjem Alzasu i u Gabijanu, blizu Bezijea. To su slojevi koji izbijaju na površinu ili su dostupni u hodnicima rudnika male dubine.

Ulje ili bitumen su služili za pripremanje masti koje su apotekari smatrali za nenadmašne lekove protiv lumbaga, uboja i otoka; ova terapija, kojoj bismo se danas smejali, bila je možda manje štetna nego drugi lekovi biljnog, životinjskog, pa i ljudskog porekla koji su korišćeni u to doba.

POČECI INDUSTRIJE

Pretpostavljajući da jedna aktivnost postaje industrijska onda kada iziđe iz okvira prvobitnog zanatlijskog korišćenja nekog prirodnog bogatstva od strane lokalnog stanovništva, počeci industrije nafte datiraju iz XVIII veka u Alzasu, Škotskoj, Galiciji, Rumuniji i na Kavkazu: u to doba je počela, doduše primitivna, destilacija nafte da bi se dobilo jedno ulje za osvetljenje, koje je moglo odlično zameniti biljna ulja, kao i parafin sličan vosku i loju za izradu sveća. Potreba za jednim ekonomičnim sredstvom za osvetljenje, u doba kada su sveća i gasno osvetljenje bili dostupni samo najbogatijim pojedincima, čak i u civilizovanim zemljama, predstavljala je, u stvari, pokretačku silu ove industrije: uvođenje petrolejske lampe u Evropi 1860. je događaj podjednako značajan kao i bušenje prvih rudničkih okana, koje je prethodne godine izveo »pukovnik« Drejk u Titusvilu (Pensilvanija).

EKONOMSKI RAZVOJ

Po tradiciji, 1859. godina uzima se ipak kao početak industrije nafte, bar u Sjedinjenim Državama; tamo je gotovo od početka njom vladao Standard Ojl Dž. Rokfelera (1839—1937), čija je biografija uzbudljivija od mnogih romana: počeo je život kao crkvenjak u jednom gradiću u državi Njujork, a završio gotovo kao stogodišnjak sa reputacijom najbogatijeg i najplemenitijeg čoveka na svetu. Njegov trust, koji je kontrolisao 90% američke industrije nafte, progonjen je počev od 1887. zakonom protiv udruživanja, pa se najzad 1911. morao raspasti u Standard Ojl Nju Džersija (Esso), Njujorka (Sokoni), Indijane, Kalifornije, Kentakija itd.

Holanđani, koji su posedovali bogata nalazišta u Holandskoj Indiji, osnovali su 1890. Rojal Dač; ovaj konkurent Standard Ojla udružio se 1907. sa jednom engleskom kompanijom i postao grupa Šel, s kojom je povezano ime njenog velikog rukovodioca, ser Henrija Deterdinga (1866—1939).

Srednji istok je ušao u svet nafte tek 1909, posle otkrića prvog nalazišta u Iranu, sa osnivanjem Anglopersijske kompanije. God. 1914. zahvaljujući ser V. Čerčilu, tada prvom lordu admiraliteta, koji je predosetio vitalnu ulogu pogona ratnih brodova na mazut, britanska vlada je preuzela glavnu ulogu u ovoj kompaniji, koja danas postoji kao grupa BP.

Trebalo je da dođe do I svetskog rata da bi se u Francuskoj shvatio značaj nafte. Poznata je čuvena izreka Klemansoa: »Kap nafte vredi koliko kap krvi.« Francuska diplomatija je uspela da po ugovorima o miru dobije udeo u pravu na naftu u Iraku (konačno utvrđen na 23, 75%), koji je pre rata bio nemačko-turski.

Francuska kompanija za naftu, konstituisana 1924. radi eksploatacije ovog dela, počev od 1927. koristi i otkrivena bogata nalazišta Mosul-Kirkuka; sa svojom proizvodnjom sirove nafte na Srednjem istoku i u Sahari i rafinacijom i distribucijom u većini evropskih zemalja, ona danas predstavlja jednu od glavnih internacionalnih grupa.

Takođe treba pomenuti i belgijsku grupu Petrofina, osnovanu 1920, koja radi u 17 zemalja, i italijansku grupu ENI, koju kontroliše država i koja duguje za svoj prosperitet eksploataciji prirodnog gasa u dolini Poa posle II svetskog rata, a naročito je aktivna u oblasti rafinacije i petrohemije.

TEHNOLOŠKI RAZVOJ

Paralelno sa ekonomskom ekspanzijom, istorija nafte se može podeliti u 6 tehnoloških etapa, od kojih je svaka trajala po dvadesetak godina.

1860—1880. Period petroleja za osvetljenje. Ostali proizvodi destilacije sirove nafte nemaju nikakvu praktičnu primenu i uništavaju se sagorevanjem ili zakopavanjem.

1880—1900. Period ulja. Posle otkrivanja postupka proizvodnje dobrih mineralnih maziva polazeći od pensilvanijske sirove nafte, rafinat konkuriše sa sve više uspeha uljima biljnog porekla.

1900—1920. Period benzina i mazuta. Polet automobilizma, a zatim avijacije i prelaženje brodova na pogon gorivim uljem omogućuju bolje korišćenje niza proizvoda koji se dobijaju iz sirove nafte; potrebe za naftom otada rastu eksponencijalno.

1920—1940. Period velikog tehničkog napretka. Industrija nafte postaje jedna od najjačih u tehničkom pogledu zahvaljujući uvođenju naučnih metoda istraživanja i postupaka kontinualne rafinacije.

1940—1960. Period katalize i petrohemije. Ime francuskog inženjera Ežena Hudrija (1892—1962) vezuje se za otkrivanje katalitičkog krekovanja u toku drugog svetskog rata; danas se katalizatori koriste za reforming, odstranjivanje sumpora, hidrokrekovanje i mnoge druge postupke rafinacije nafte i hemije naftinih derivata.

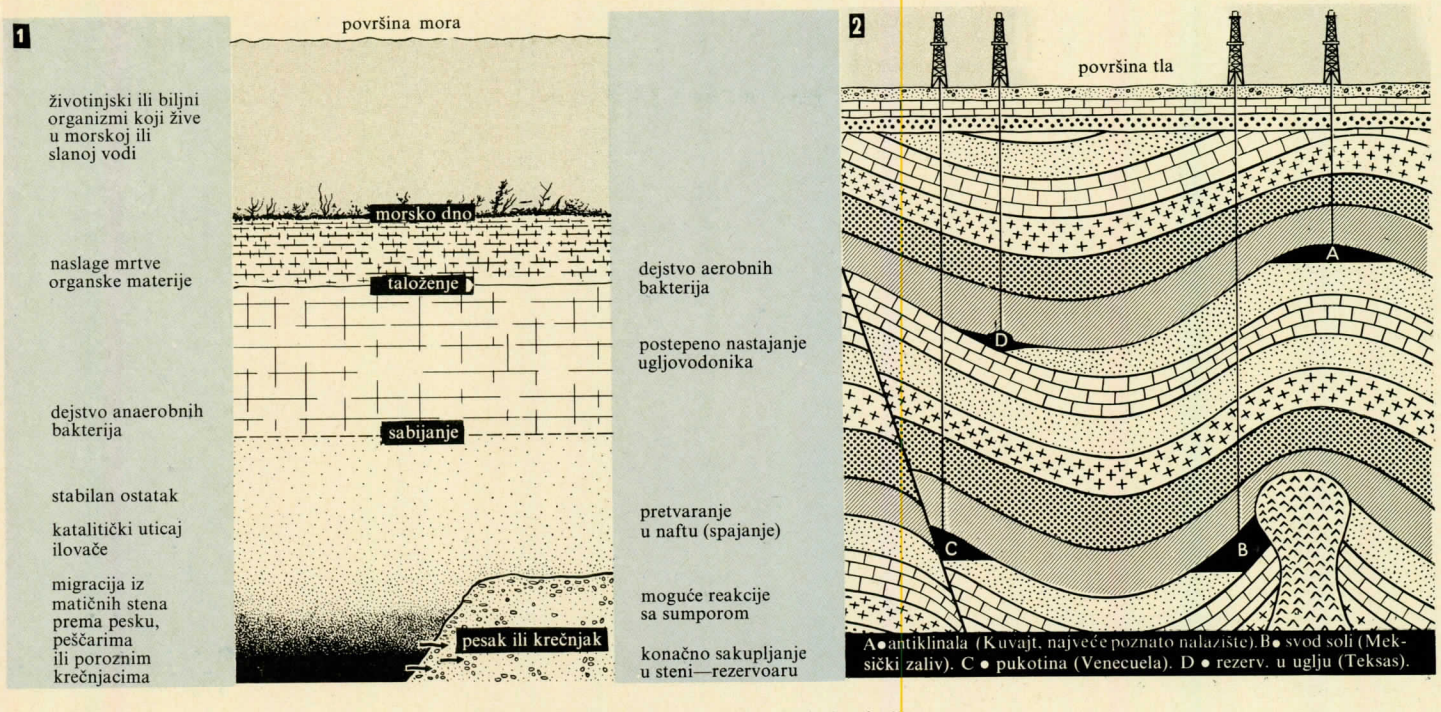
Posle 1960. Period elektronskih računara sa memorijom. Upotreba ovih mašina se brzo širi u industriji čija je karakteristika širina i sve veća složenost operacija.

Istraživanje i rezerve

Od svih mineralnih blaga skrivenih u zemlji, nafta je jedno od onih koja se najteže otkrivaju, jer nije poznato ni njeno tačno poreklo ni mehanizam njene migracije: rezerve akumulisane hiljadama godina najzad se mogu naći, zahvaljujući gasovitoj ili tečnoj prirodi ugljovodonika, tamo gde se mogu najmanje očekivati.

POREKLO NAFTE

Iako se dugo verovalo u čisto mineralno poreklo nafte, danas izgleda utvrđeno da je njen polazni materijal bio sastavljen od ostataka vodenih živih organizama: ameba, mikroskopskih algi i drugih životinja i biljaka koje žive na morskom dnu; geneza nafte, kako izgleda, počinje u doba kada su se na Zemlji pojavili ovi prvi oblici primitivnog života, a sa druge strane, nalazišta postoje samo u sedimentnim terenima. Postepeno transformisanje mrtve organske materije u ugljovodonike — a poznato je da su hiljade hemijskih materija koje čine naftu gotovo isključivo sastavljene od ugljenika i vodonika — vršilo se vekovima laganim procesom degradacije, koji je, istini za volju, slabo razjašnjen i koji dosad nije mogao da se reprodukuje u laboratoriji na zadovoljavajući način. Pritisak koji proizvode uzastopni slojevi sedimenata koji se jedan za drugim talože na dnu mora, eventualno dejstvo bakterija, izvesne hemijske reakcije koje se vrše sa sumporom, kiseonikom ili azotom i usled katalitičkog dejstva metala, to su neke od hipoteza kojima se pokušava objasniti skup izvanredno



Sl. 1. — Nalazišta nafte: shema nastajanja i nalazište.

složenih pojava. Ono što izgleda kao sigurno, jeste to da je nafta, ukoliko je više nastajala, imala sve veću tendenciju da se premešta u dubinama zemlje i da se malo-pomalo sakuplja u »rezervoarima«. Ova migracija je sigurno bila prouzrokovana razlikom pritisaka između stena gde su se formirali i sakupljali prvi proizvodi i onih gde je nastalo skladište ili »rezervoar« nafte pod pritiskom. Pretpostavlja se, takođe, da je voda, koja neprekidno cirkuliše u podzemnim tokovima, doprinela premeštanju nafte bilo povlačeći je sa sobom ili je rastvarajući.

NALAZIŠTA

Migracija smeša ugljovodonika objašnjava činjenicu da su izvori nafte mogli da se nađu u najrazličitijim geološkim formacijama, od početka primarne ere do sredine tercijarne, i da su nafta ili gas uvek lokalizovani u nekoj anomaliji zemljišta, gde su zarobljeni pod nekim nepropustljivim pokrivačem, koji se obično sastoji od sloja laporca ili ilovače. Ova singularna tačka može biti izbočina neke antiklinale, bočna strana jednog svoda soli, pukotina nastala klizanjem podzemnih slojeva, rezervoar u uglu (*sl.* 1). Pojave izbijanja na površinu, koje mogu varirati od slabih izvora gasa do jezera bitumena, kao na ostrvu Trinite, nastaju kada se nije našla nikakva klopka koja bi zaustavila migraciju ugljovodonika.

Za razliku od postojeće tendencije njihovog prikazivanja, izvori nafte se ne javljaju u obliku podzemnih jama, već u obliku meke i porozne stene — često krečnjaka ili peščara — impregnisane naftom pod visokim pritiskom, koji može da dostigne 175 bara, i pri različitim temperaturama; najdublje bušotine koje se u današnje vreme mogu načiniti dostižu slojeve između 7 000 i 8 000 m gde vlada temperatura od oko 150°C. Jedan rezervoar nafte ima obično ovalan oblik, više ili manje izdužen, čija dužina dostiže više desetina kilometara, kao u vrlo velikim nalazištima na Srednjem istoku ili u Sahari. Debljina impregnisane stene retko prelazi tridesetak metara. Proizvodni kapacitet jednog polja nafte najčešće se izračunava u tonama *utvrđene rezerve*, što je izraz koji označava količinu nafte koja se može dobiti na rentabilan način poznatim postupcima. Nalazišta sadrže jednu složenu smešu ugljovodonika, koja može biti tečna, gasovita ili čvrsta. U prvom slučaju reč je o klasičnom naftnom polju, a u drugom o izvoru prirodnog gasa. Što se tiče čvrstih rezervi, to su bitumeni deponovani u škriljcima ili u pesku; do danas praktično nedirnuti, jedva i popisani, ovi bitumeni imaju toliki značaj da predstavljaju ne samo strategijske rezerve već, verovatno, i glavni izvor ugljovodonika XXI veka.

ISTRAŽIVANJE NAFTE

Skup metoda koji se koriste za otkrivanje nalazišta nafte, bilo da je reč o geološkim ispitivanjima na površini zemljišta ili u dubinama mora, o geofizičkim merenjima i istražnom bušenju, naziva se *prospekcijom* ili *istraživanjem*.

GEOLOŠKA PROSPEKCIJA sastoji se u detaljnom proučavanju debljine, starosti i nagiba ili ugla slojeva koji izlaze na površinu, tako da se mogu dobiti strukturne karte koje će pomoći u identifikovanju podzemnih anomalija. Fotografisanje iz vazduha može takođe da bude veoma korisno u ovom preliminarnom stadijumu istraživanja, kao što su i tehnike podvodnog ronjenja koje je obnovio Kusto.

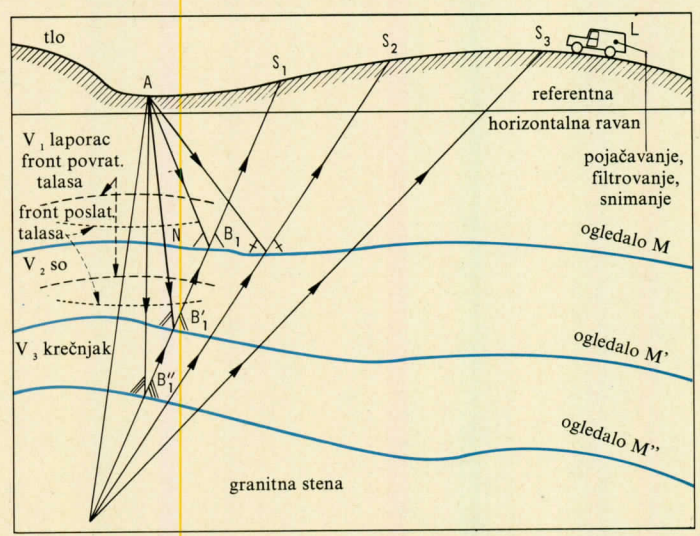
GEOFIZIČKI METODI omogućuju da se na površini ili u blizini površine mere razne veličine koje zavise od prirode zemljišta, uglavnom Zemljina teža, magnetizam ili udarni talasi stvoreni nekom veštačkom eksplozijom. Ovi metodi se nazivaju *gravimetrijski*, *magnetometrijski*, odnosno *seizmički*.

GRAVIMETRIJSKI METODI sastoje se u tome da se uz pomoć male prenosne torzione vage meri vrednost ubrzanja Zemljine teže *g*. Karta promena ove veličine daje dragocene indikacije o gustini sedimentnih slojeva koji se nalaze iznad podnožja.

MAGNETOMETRIJSKI METODI se često koriste uz pomoć aviona, a određuju oblik i približnu dubinu kristalnog podnožja sedimentnih stena, jer su ove obično nemagnetične; dovoljno je da se izmeri intenzitet vektora Zemljinog magnetnog polja da bi se dobila veličina zona ogromnih dimenzija i da bi se odatle našle značajne anomalije strukture.

SEIZMIČKI METOD nadoknađuje nepotpunost podataka koje daju magnetometrijski i gravimetrijski metod, čak i posle obrade, i koristi se neposredno reakcijama podzemnih stena: prostiranje elastičnih talasa, koji nastaju eksplozijom jednog eksplozivnog punjenja na maloj dubini i koji zatim bivaju uzastopno prelamani ili odbijani na raznim slojevima na koje nailaze, registruje se uz pomoć izvesnog broja prijemnih stanica. Na taj način se dobija detaljan oblik jedne strukture i presek zemljišta, što omogućuje da se izabere mesto bušenja.

Seizmička prospekcija refleksijom. Pri ovom metodu (*sl.* 2), koji se najviše koristi, potres izazvan u momentu O u nekoj tački A površine zemljišta proizvodi



Sl. 2. — Istraživanje seizmičkim metodom refleksije.

akustične talase koji se prostiru u zemljištu sa brzinama V_1, V_2, V_3, karakterističnim za pojedine geološke formacije. Ovi talasi, čiji je front gotovo sfernog oblika u izotropnoj sredini, delimično se reflektuju na mestima gde se dodiruju zemljišta sa različitim brzinama prostiranja zvučnih talasa. Kaže se da postoji *kontrast brzine*. Svaka površina kontakta ponaša se kao ogledalo — ogledala M, M′, M″ —, i reflektovana energija je utoliko veća ukoliko je veći kontrast brzine. Svako ogledalo prouzrokuje front povratnih talasa u tačkama B_1, B'_1, B''_1, čija se energija po dolasku na površinu hvata specijalnim mikrofonima S_1, S_2, S_3, koji se nazivaju »seizmofoni« i koji su raspoređeni u blizini tačke potresa na odgovarajući geometrijski način. Pokretna laboratorija L, koja se pomera posle svake serije merenja, u vezi je sa svakim seizmofonom. Ona pojačava primljene signale i snima ih na filmu ili magnetnoj traci. Jedan uređaj za filtrovanje omogućuje da se odstrane parazitne frekvencije, što poboljšava kvalitet snimka. Dovoljno je pratiti dva seizmička »zraka« AB_1S_1 i AB'_1S_1 da bi se videlo da su njihova vremena, potrebna za odlazak i povratak, takva da je

$$T_1=\frac{AB_1+B_1S_1}{V_1};$$

$$T_2=\frac{AN+B_1S_1}{V_1}+\frac{NB'_1+B'_1B_1}{V_2}$$

Dovoljno je, dakle, poznavati brzine V_1, V_2 i V_3 da bi se odredila dubina ogledala i pomerati uređaje da bi se pratio oblik jednog horizonta ogledala.

Potres zemljišta može se proizvesti, zavisno od metoda koji se koristi, bilo eksplozijom jednog eksplozivnog punjenja od 10 kg (refleksija) do 1 ili 2 t (prelamanje), koje eksplodira na površini ili na dnu jame duboke nekoliko desetina metara, bilo padom tereta od oko 3 t koji se nosi na kamionu i baca sa visine 2—3 m, što se ponavlja u pravilnim razmacima, bilo još vibratorima koji su u kontaktu sa zemljištem.

Podmorska seizmička prospekcija. Pošto su se metodi seizmičke prospekcije dobro pokazali na kopnu, adaptirani su i za podmorska istraživanja: naime, sedimentni tereni na ivici kontinenata i na dubinama manjim od 200 m, što predstavlja granicu dubine današnjih bušenja pod morem, procenjuju se na 10 miliona kvadratnih kilometara. Laboratorija i generatori talasa nalaze se na jednom ili na više brodova koji plove na pučini, na primer, u sredini Severnog mora. Prva teškoća je u preciznom poznavanju njihovog položaja u momentu potresa: ova se savlađuje uz pomoć navigacionih radioelektričnih uređaja koji su veoma usavršeni, tako da je njihova teorijska preciznost oko jednog metra za rastojanje od 300 km.

• *Klasični metod*. Princip radiolokalizacije (*sl.* 3) sastoji se u poređenju signala koji potiču iz tri emitera na zemlji: naime, da bi se odredio položaj pokretnog predmeta na površini mora, potrebno je meriti dve koordinate. Mreža radio-aparata mora, dakle, da obuhvati dva para, od kojih se svaki sastoji od sledećih uređaja:

1. dva radio-odašiljača koji šalju talase F_A i F_B u tačkama A i B;

2. jedan nepokretan kompenzacioni prijemnik R, koji prima ove talase i šalje impulse niske frekvencije F_R;

3. jedan nepokretan referentni odašiljač f, koji moduliše ove impulse;

4. jedan prijemnik na palubi broda.

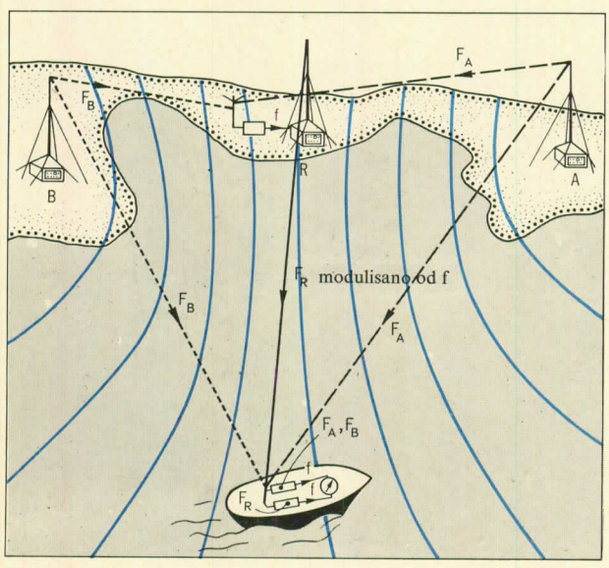
Svaki par daje mrežu hiperbola. Jednovremeno očitavanje dva indikatora faze koji se nalaze na palubi broda, određuje položaj broda u preseku dveju hiperbola. Lako je zamisliti složenost postavljanja ovog skupa radio-uređaja koji funkcionišu jednovremeno. Izbor položaja četiri odašiljača na zemlji, njihovo povezivanje sa geodetskom mrežom, postavljanje prijemnika na palubi — to su radovi koji prethode jednoj kampanji merenja. Kada su brodovi lokalizovani u odnosu na mrežu na tlu, treba još odrediti njihov tačan položaj prema dnu mora u momentu eksplozije. Ovaj podatak se registruje jednovremeno sa ostalim podacima zahvaljujući jednom meraču dubine pomoću odjeka, tipa *asdic*.

Podmorsko seizmičko istraživanje (*sl.* 4), u kome se potres proizvodi jednim eksplozivnim punjenjem postavljenim na maloj dubini (1—2 m), normalno zahteva dva broda. Laboratorija L, snabdevena svim radio-uređajima za registrovanje i lokalizaciju, ima zadatak da vuče seizmofone i da ih u momentu eksplozije zagnjuri. Brod — upaljač B, koji raspolaže magacinom municije i na čijoj se zadnjoj palubi nalazi Faradejev kavez za rukovanje eksplozivom, ima zadatak da eksploziv potopi i izazove eksploziju. Seizmofoni specijalnog tipa (hidrofoni) raspoređeni su duž jedne linije duge 1 200 m, koja se naziva *flauta* i sastoji se od nosećeg kabla i električnog kabla sa 24 provodnika i 192 seizmofona koji su povezani sa provodnicima u grupama po 8. Sve to se nalazi u zaštitnom omotaču i može se namotati na čekrk velikog prečnika koji se nalazi na zadnjem delu broda-laboratorije. Flauta je podeljena u šest sekcija koje su raspoređene na stranama jednog otvora veličine oko 100 m.

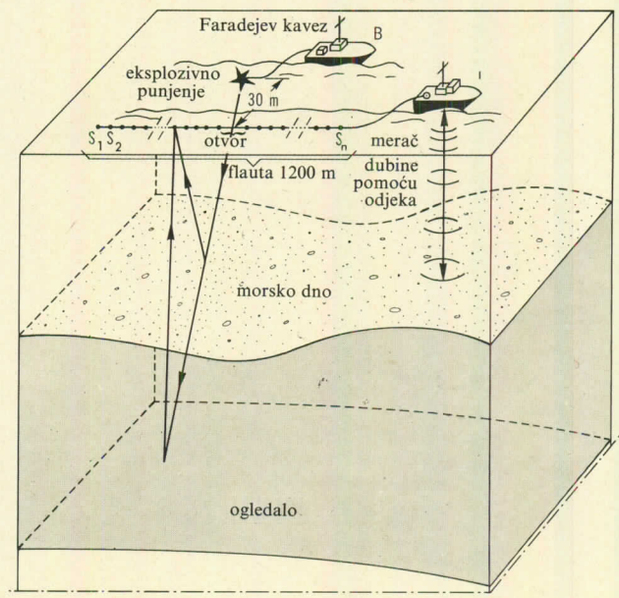
U »eksplozivnoj formaciji« brod-upaljač plovi iza broda-laboratorije na rastojanju od oko 750 m. On se nalazi u visini zadnjeg dela flaute i pomeren je tridesetak metara u odnosu na osu plovidbe broda-laboratorije. Eksplozija i merenje vrše se jednovremeno na sledeći način: brod-laboratorija usporava plovidbu i zatim se zaustavlja na stanici, flauta se umiri i seizmofoni se potope. Za to vreme brod-upaljač plovi duž flaute dok se ne nađe između dva crvena putokaza koji označavaju njen centar. Tada brod gasi motore i popušta konopac na čijem kraju se nalazi plovak za koji je obešen eksploziv i, kada se ovaj nađe na pedesetak metara iza broda, on izazove eksploziju. U normalnom radu svaka tri minuta vrši se po jedna eksplozija. Broj kilometara profila koji se mesečno može da obradi dostiže 1 000 u poređenju sa svega 50 do 200 na tlu (što zavisi od pristupačnosti istraživanih zona koje su često negostoljubive). Iz toga proizlazi da je cena istraživanja po kilometru mnogo niža kod podmorske seizmičke prospekcije nego kod seizmičke prospekcije na tlu. Nasuprot tome, korišćenje snimaka je znatno teže kada se radi o podmorskoj sredini, u kojoj se proizvode mnogi parazitni šumovi; među najčešćima treba pomenuti »mehurove« koji potiču od ponavljanog pulsiranja mehura gasa proizvedenog eksplozijom, kada je dubina na kojoj se eksploziv nalazi suviše velika. Ovi parazitni šumovi, na koje se nadovezuju šumovi mora i aparature (šumovi flaute), ne mogu se uvek eliminisati frekventnim filtrima, tako da kvalitet snimka od toga trpi.

Metod koji je upravo opisan omogućuje da se sa velikim eksplozivnim punjenjem proizdedu jaki potresi i dobiju refleksije od dubokih ogledala. Njegov je nedostatak što remeti podmorsko obitavalište i ubija ribe, što može da u nekim oblastima ograniči primenu ovog metoda. Dva druga novija metoda zasnovana su na principu neprekidnog snimanja; s obzirom na to da je reč o manjim energijama, njihov radijus istraživanja je ograničen.

• *Varničar*. Ovaj postupak koristi se potresom podmorske sredine proizvedenim električnim pražnjenjem od 8 000 V između dve uronjene elektrode; pražnjenje se ponavlja u pravilnim razmacima. Dovoljan je jedan brod koji vuče dva oklopljena provodna kabla dužine stotinak metara, na čijem kraju se nalazi komplet odašiljač-prijemnik koji se sastoji od jedne »sveće« od teflona i više hidrofona — oko deset— koji su montirani paralelno da bi se poboljšao odnos signal — šum. Da bi se postigao veći učinak i izbegli šumovi talasanja, komplet se potopi na 1—2 metra dubine. Signal koji uhvati prijemnik dolazi do registratora posle prolaska kroz tranzistorizovani pretpojačavač, filter i pojačavač. Najjači varničari koji se danas koriste emituju energiju od svega 25 000 džaula, što odgovara energiji punjenja od 6 g dinamita. Uprkos visokoj osetljivosti hidro-



Sl. 3. — Radio-lokalizacija na moru.



Sl. 4. — Podmorska seizmička eksplozija.

fona, mogućnost istraživanja ovim aparatima ograničena je na 200 m ispod morskog dna za dubinu dna od 0 do 300 m. Njihova upotreba je, dakle, ograničena na otkrivanje površinskih geoloških deformacija radi istraživanja nafte. Nasuprot tome, oni su veoma korisni za sređivanje podataka o depozitima i sedimentima pre postavljanja sondažnih platformi izvan obale.

• *Eksplozije gasa.* Pri ovom metodu proizvodi se jači potres podmorske sredine nego varničarem, koristeći za tu svrhu gasne topove koji oslobađaju 100 000 džaula pri svakoj eksploziji. Jedan skorašnji aparat koristi tri topa koje vuče brod, zagnjurene na 1 metar ispod površine. Svaki top, koji se sastoji od jedne cevi duge 60 cm i prečnika 12 cm, napaja se sa gornje strane gasnom smešom kiseonika i propana koja se pali električnim putem. Eksplozije se proizvode jedna za drugom na svakih 3, 4 ili 6 sekundi. Jedan od prijemnih uređaja sastoji se od jedne elastične cevi prečnika 50—60 mm i stotinak metara duge, koja nosi deset hidrofona međusobno udaljenih po 10 m. Čitav komplet radi uz pomoć samo jednog broda koji ne zahvata naročito specijalizovanu opremu. Laboratorija i elektronski uređaji mogu biti grupisani u laboratorijski komplet koji se postavi na brod u obliku jednog aparata. Brod mora posedovati most i zadnju palubu koji su raskrčeni da bi se moglo smestiti skladište gasa za napajanje topova i uređaj za njihovo postavljanje u vodu. Pri brzini od 4 čvora, merenja se vrše tako da se odredi po jedna tačka na svakih 12 m. Postupak za detaljnu analizu podataka omogućuje proučavanje geoloških poremećaja (rezervoara) malih dimenzija na dubinama od 2 000—3 000 m ispod morskog dna. Prednost ovog postupka je u tome što se može koristiti u zonama ribarenja i što zahteva samo jedan brod.

BITUMINOZNI PESAK I ŠKRILJCI

Dok sve poznate rezerve nafte na Zemljinoj kugli iznose ukupno svega 50 milijardi tona, što je dovoljno za 35 godina prema današnjem ritmu potrošnje, postoje značajna nalazišta peska i škriljaca impregnisanih teškim ugljovodonicima, odnosno bitumenom, koja sadrže bar deset puta veću količinu nafte: ove cifre se moraju imati u vidu da bi se tačno procenile ogromne rezerve energije koje su sadržane u ovim nalazištima. Ugljovodonici koje ona sadrže teži su od onih u normalnoj sirovoj nafti, veoma viskozni — kao testo i često čvrsti u normalnim uslovima. Njihove gustine se kreću od 0,85—1,51, dok kod običnih proizvoda nafte iznose od 0,60—1,01. U nizu prema rastućoj gustini razlikuju se parafini, ili ozokerit (0,85—1), asfalti ili gilsonit (1,03), asfaltiti (1,10) i kerogeni (1,22—1,51). Najveće nalazište bituminoznog peska na svetu je neosporno u Alabaski, na zapadu Kanade, koje sadrži 80 milijardi tona asfalta. Druge rezerve iste vrste nalaze se u Venecueli i na Madagaskaru. Za razliku od škriljaca, koji su predstavljali sirovinu za ulje koja je eksploatisana od početka prošlog veka u Škotskoj, bituminozni pesak do sada nije nikada korišćen, jer bi za postizanje rentabilnosti bila potrebna gigantska postrojenja za njegovo tretiranje. Metod koji prvo pada na pamet jeste da se izdvoji sama stena i da se zagreva u peći da bi se iz nje izdvojio asfalt: fabrika u Fort Mak Mjuriju, u Alberti, prerađuje dnevno 100 000 tona peska dobijenog iz rudnika pod otvorenim nebom pomoću džinovskih mašina kopačica. Razdvajanje ulja i peska, koje se obavlja vrućom vodom, a zatim parcijalnom destilacijom dopunjenom hidrogenizovanjem, omogućuje da se dnevno dobije 7 000 tona sintetičke sirove nafte, slične klasičnoj sirovoj nafti. Drugi projekti koji se ispituju, predviđaju ekstrakciju bitumena zagrevanjem na licu mesta, bilo ubrizgavanjem vodene pare, bilo delimičnim sagorevanjem, ili konačno primenom nuklearne energije. Što se tiče bituminoznih škriljaca, čije malo nalazište postoji u Francuskoj, u Otenu, naročito su poznate ogromne naslage Grin Rivera (Vajoming, Utah, Kolorado, 150 milijardi tona) i nalazište Rio Porone (Brazil, 130 milijardi tona). Do danas ova nalazišta predstavljaju samo strategijske rezerve, jer je cena koštanja operacija vađenja rude, kalcinacije i ekstrakcije ulja obično previsoka. Jedna skorašnja studija pokazala je ipak, da bi jedna velika eksploatacija, koja zahteva 300 rudara opremljenih snažnim mašinama, sa proizvodnjom od 5 000 tona ulja dnevno polazeći od 70 000 tona stene, mogla da isporuči Los Anđelosu proizvod po ceni od 2,75 dolara barel (0,23 dolara litar), dok nafta sa Srednjeg istoka tamo dospeva po ceni od 2,45 dolara barel. Razlika nije, dakle, tolika da promena prodajne cene ne bi u skoroj budućnosti mogla da učini rentabilnom eksploataciju ovih ogromnih rezervi.

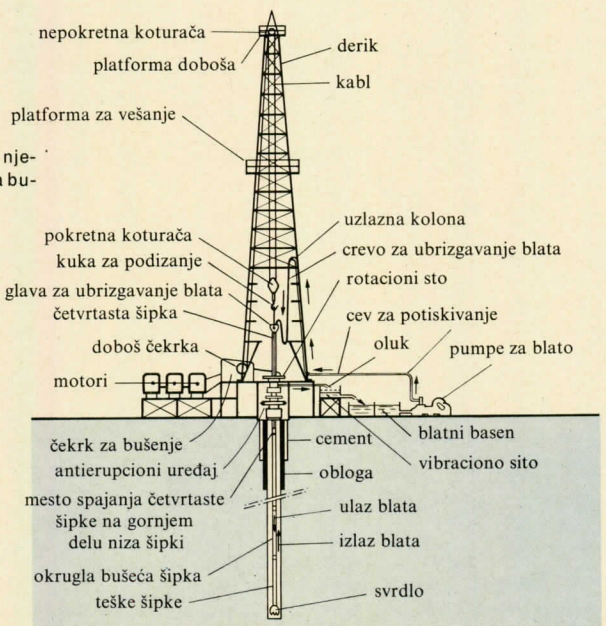
Bušenje i eksploatacija

I pored napretka u tehnikama prospekcije, pravi način istraživanja podzemnih nalazišta može biti samo bušenje, koje omogućuje da se ispita priroda raznih podzemnih stena i da se u slučaju otkrivanja nalazišta ovo, razume se, i eksploatiše.

ROTACIONO BUŠENJE

Za većinu bušotina nafte korišćen je ovaj postupak, koji omogućuje bezbedno dostizanje velikih dubina pod povoljnim tehničkim uslovima. Postoje dve varijante ovog postupka.

BUŠENJE SA BLATOM. Korišćena instalacija se u osnovi sastoji od jednog *svrdla*, instrumenta koji je obično opremljen zupčastim valjkom i na koji se prenosi na dnu bušotine rotaciono kretanje *bušećih šipki*, cilindričnih čeličnih šipki koje su šuplje i prišrafljene jedne za druge sve do površine tla. Poslednja



Sl. 5. — Derik i njegova oprema za bušenje.

šipka, zašrafljena na površini, ima četvrtasti spoljašnji presek, i to je *četvrtasta šipka*; ona prolazi kroz specijalne omotače koji omogućuju njeno vođenje pomoću *rotacionog stola*.

Da bi se postigao efikasan rad svrdla, potrebno je, osim rotacije koju na njega prenose šipke (40—150 o/min, zavisno od terena i čak 500 o/min u mekim stenama), da se ono pritiskuje i izvesnim teretom na dno bušotine (do 20 t u izvesnim slučajevima). Stoga se na delu niza šipki koji se nalazi neposredno iznad svrdla, na dubini od oko 100 m, stavljaju teži i otporniji elementi koji se nazivaju *teške šipke* ili *glavne šipke*.

Kada se izbuši izvesna dubina, zidovi bušotine se moraju obložiti, što se postiže spuštanjem jednog stuba čeličnih cevi; ova operacija se naziva *oblaganje* bušotine. Ona sprečava obrušavanje zidova pri daljem bušenju. Takav stub se obično cementira na čitavoj visini ili na jednom njegovom delu, i to u prostoru između stuba i zida, što obezbeđuje njegovu potpunu nepropustljivost.

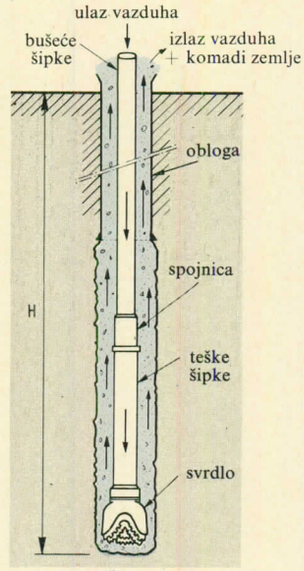
Za držanje bušećih šipki i cevi za oblaganje bušotine potreban je *toranj za bušenje* ili *derik* (*sl.* 5), koji drži jedan čekrk sa dve koturače, čija je snaga dovoljna da se može podići niz šipki. Ovakva operacija podizanja je važna da bi se periodično podizalo svrdlo i da bi se zamenilo ukoliko je istrošeno. Toranj piramidalnog oblika izgrađen je od metalnih elemenata, na njegovom vrhu se nalazi *platforma nepokretne koturače* čekrka, a na polovini visine *platforma za vešanje*, gde se nalazi radnik koji otkačinje šipke pri podizanju niza ili ih namešta pri spuštanju za vreme operacije zamene svrdla. Niz šipki, čiji se poslednji element — četvrtasta šipka — prišrafljuje na *glavu za ubrizgavanje*, obešen je pomoću jedne ručice na *kuku za podizanje*, pričvršćenu uz pokretnu koturaču, a prolazi u nivou zemljišta kroz *antierupcioni uređaj* koji sadrži sigurnosne ventile; ovima se rukuje na daljinu, tako da je moguće zatvaranje bušotine u slučaju iznenadnog otkrivanja nalazišta pod visokim pritiskom. Na gornjem delu tornja za bušenje nalazi se *nepokretna koturača*. Jedan *kabl* sa više užadi spaja ove dve koturače; jedno uže iz kabla namotava se na *doboš čekrka*; ovaj doboš koji se odlikuje izvanrednom čvrstinom, sadrži *menjačku kutiju*, koja omogućuje da se dobiju razne brzine namotavanja kabla da bi se obezbedilo brzo podizanje svrdla kada se ovo istroši i treba ga zameniti. Čekrk se pokreće pomoću jednog ili više motora koji se mogu spojiti jedan s drugim. Jedan od ovih motora okreće i rotacioni sto. *Pumpe za blato*, koje pokreću nezavisni motori, ili ponekad motori koji se nalaze iza čekrka, obezbeđuju neprekidno ubrizgavanje blata u bušotinu. *Blato*, smeša vode, ilovače i nekih hemijskih proizvoda, igra glavnu ulogu u čitavoj operaciji bušenja: ono služi za hlađenje i podmazivanje svrdla; ono obezbeđuje izbacivanje na površinu komada stena odlomljenih svrdlom pri njegovom prodiranju u toku bušenja; ono održava hidrostatički pritisak dovoljan da spreči da u bušotinu prodre voda na koju sonda nailazi pri silaženju; ono ima osobinu, između ostalog, da na zidovima bušotine deponuje sloj ilovače, *kolač*, što doprinosi njihovom učvršćivanju. Najzad, kada se dostigne proizvodna zona, ono služi za uravnotežavanje pritiska nalazišta i za izbegavanje jake erupcije

tečnosti pre nego što se postavi uređaj za proizvodnju. Blato, koje se čuva u koritima pored gradilišta, prolazi kroz sledeće zatvoreno kolo: pumpe, cev za potiskivanje, uzlazna kolona, crevo za ubrizgavanje, glava za ubrizgavanje, unutrašnjost šipki za bušenje; ono odatle izlazi kroz specijalne otvore na svrdlu, sakuplja komade zemlje i odnosi ih penjući se kroz prstenasti prostor između šipki i zidova bušotine. Po izlasku na površinu, ono se jednim *olukom* upućuje na *vibraciono sito* koje zadržava komade zemlje; najzad, ono se vraća u *blatne basene*, gde se taloženjem odstranjuju finije čestice koje sito nije moglo da zadrži.

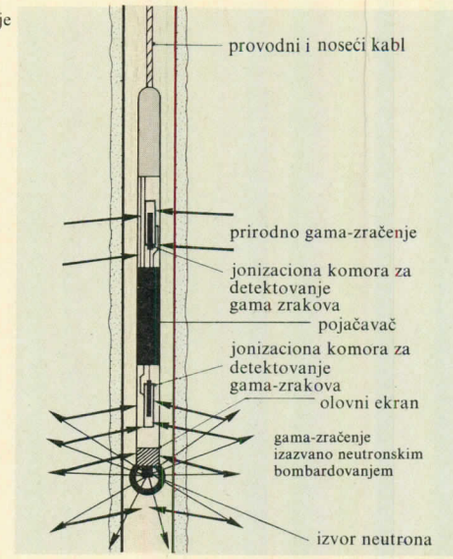
BUŠENJE SA VAZDUHOM ILI GASOM. Ova tehnika, koja datira od 1951. i u kojoj se cirkulacija blata zamenjuje čišćenjem komprimovanim vazduhom ili prirodnim gasom, koristi se onda kada se ne raspolaže dovoljnom količinom vode za pripremanje blata, kao što je slučaj u pustinjskim oblastima, ili kada priroda zemljišta koje se buši dovodi do bojazni bilo od prevelikih gubitaka blata infiltracijom, bilo od deformisanja proizvodnog sloja. Bušenje sa vazduhom (*sl.* 6) vrši se pomoću jednog klasičnog rotacionog uređaja koji zahteva izvesne dopune: kompresore, specijalne ventile, jednu cev za evakuisanje vazduha posle njegovog povratka na površinu, koja je snabdevena dodatkom za izdvajanje otpadaka. Jedna instalacija za blato ostaje u paralelnoj grani da bi se mogla u slučaju jake erupcije vrlo brzo staviti u pogon.

Prednosti. Pokazalo se da bušenje sa vazduhom ili gasom poboljšava prodiranje svrdla kroz stenu, što omogućuje da se izbuši veća dubina pre nego što se svrdlo istroši i da se smanji nagib usled krivljenja teških šipki: više ili manje visok pritisak koji vlada na dnu bušotine i čiji je rezultat da komprimuje i čini kompaktnijim teren koji se buši, više ili manje otežava prodiranje sonde. Tako na 4 000 m dubine hidrostatički pritisak koji vrši stub blata (gustine 1,25) iznosi 500 bara, dok sa gasovitim fluidom za bušenje pritisak na dno ne prelazi nekih 20 bara. Ovaj postupak takođe poboljšava hlađenje svrdla, izbegava abrazivni efekt i zagušivanje blatom i olakšava izbacivanje otpadaka na površinu. Međutim, ako se bušenje vrši kroz vodonosne zone, javlja se potreba da se vazduhu koji se ubacuje u bušotinu dodaju površinski aktivne penušave materije ili drugi hemijski proizvodi: tada se može govoriti o *bušenju sa maglom* (»mist drilling«) ili *bušenju sa penom* (»foam drilling«). Ovaj nedostatak, kao i veći troškovi ovog metoda u odnosu na klasično bušenje, dalje ograničavaju njene mogućnosti upotrebe. Ipak, bolje otkrivanje pojave ugljovodonika (njihovo izbijanje na površinu je olakšano nižim pritiskom u bušotini) i nepostojanje deformisanja proizvodnih formacija kakvo se javlja kod blata, tolike su prednosti da bušenje sa vazduhom ne prestaje da se širi.

KAROTAŽA. Za vreme napredovanja svrdla kroz zemljište, otpaci izbačeni na površinu brižljivo se ispituju. Međutim, njihovo ispitivanje može dati samo jednu sasvim nepotpunu sliku o zonama na koje nailazi sonda. Stoga je razvijen izvestan broj metoda grupisanih pod opštim nazivom *karotaža*, koje se koriste za uzimanje uzoraka stena i određivanje njihovih karakteristika. Svi ovi metodi zahtevaju spuštanje specijalnih uređaja na dno bušotine i stoga su skupi. Uz pomoć jednog prstenastog oruđa može se dobiti i izvaditi *karota*, valjkasti uzorak stene, koji omogućuje tačno upoznavanje geološke periode laboratorijskim ispitivanjem životinjske i biljne paleontologije uzorka. Pri električnoj karotaži, zemljište koje se buši, ispituje se registrujući na grafikonu električnu otpornost uzastopnih slojeva pomoću struje koja se dobija sa postavljenim elektrodama. Kod radioaktivne karotaže (*sl.* 7), koristi se aparat koji emituje neutrone, što u blizini bušotine prouzrokuje veštačko gama-zračenje koje se otkriva i registruje aparatom: tako se dobijaju dodatni dragoceni podaci o kompaktnosti slojeva stena na koje se nailazi.



Sl. 6. Bušenje sa vazduhom.



Sl. 7. Radioaktivna karotaža.

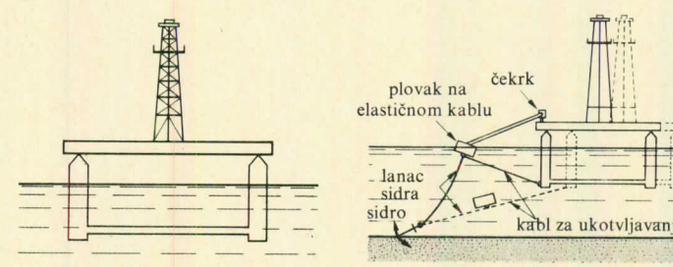
BUŠENJE POD MOREM

PRINCIP. Ukoliko se više težilo bušenju pod vodom na sve većim dubinama, korišćeni metodi i uređaji morali su se usavršavati da bi se došlo do veoma specijalnih tehnika podmorskog bušenja (off shore). Već se veoma odavno znalo da se u močvarnim terenima postavljao derik na šipovima, kao što je opisano u čuvenom dokumentarnom filmu *Louisaiana Story* (1948). Međutim, za bušenje na otvorenom moru, znanje inženjera nafte mora se udružiti sa kvalitetima mornara, da bi se ovaj metod rada podesio prema uslovima sredine koju karakterišu njena izvanredna pokretljivost i ogromna snaga koja dolazi do izražaja kada se njeno kretanje poveća: instalacija mora biti postavljena tako da ostane u relativnom mirovanju koje u svakom slučaju mora biti dovoljno da omogući nizu šipki da rade bez rizika loma. Meteorologija i okeanografija moraju, prema tome, dati svoj doprinos davanjem osnovnih podataka o vetru i pritisku koji se proizvodi u funkciji njegove brzine: u izvesnim oblastima Zemljine kugle mogu se kod uragana zabeležiti brzine vetra od 300 km/h, pri čemu se stvaraju talasi visoki 20 m. Lokalni uslovi plime i oseke, struje i talasanja uzimaju se takođe u obzir za proračun postrojenja: na taj način se izračunava visina platformi iznad mora koje ne dozvoljavaju ni grebenima ogromnih talasa, kakvi nastaju pri nepogodama kakve se javljaju jedanput u sto godina, da sruše sve sa platforme.

Konstruktor instalacije za podmorsko bušenje, posle detaljne studije morske sredine, mora da izvrši izbor između platforme i broda: u prvom slučaju, ploveći keson koji se dopremi brodom na potrebno mesto, snabdeva se pokretnim stubovima koji se spuštaju da bi se oslonili na morsko dno; u drugom slučaju, treba predvideti uređaje za ukotvljavanje i dovoljno stabilizovanje i osigurati se da bočno ljuljanje neće biti povećano talasanjem, što zavisi od dužine broda.

Platforma sa uronjenim trupom (*sl.* 8) sadrži plovke koji se urone pomoću balasta licenci za istraživanja u severnim morima, predviđena je za sledeće ekstremne uslove korišćenja: talasanje 10 m visine i sa periodom od 8 sec, strujanja od 2,5 čvora, vetar 148 km/h. Njen opseg dubina je: 60 m u mirnim vodama, 50 m u maksimalnim uslovima. Kod ovog tipa samostalnih platformi, stubovi se postavljaju pomoću uređaja sa kukama koji se pokreće električnim motorom; stubovi se takođe mogu potapati i podešavati pojedinačno prema nepravilnostima dna da bi se obezbedila horizontalnost radnog postolja i potrebna visina iznad morskog nivoa zavisno od visine talasa. Ove mašine čija težina može da se kreće od 5 000 do 10 000 t, čine spektakularne skupine za transport: gornji deo stubova, koji dostižu preko 60 m visine, može se demontirati i položiti na most. Cena jednog od ovih morskih čudovišta iznosi između 25 i 50 miliona franaka, kao i cena jednog broda cisterne od 80 000 t.

Platforma sa uronjenim trupom (*sl.* 8) sadrži plovke koji se urone pomoću balasta na dubinu 12—20 m, gde ne dopiru ni najjači talasi. Njeno postavljanje predstavlja težak problem; jedno rešenje se sastoji u tome da se koristi plovak na elastičnom kablu koji je za platformu vezan preko jednog čekrka za ukotvljavanje sa konstantnim naprezanjem: potapanje plovka uravnotežava na taj način dejstvo skretanja i smanjuje silu koja dejstvuje na sidro.



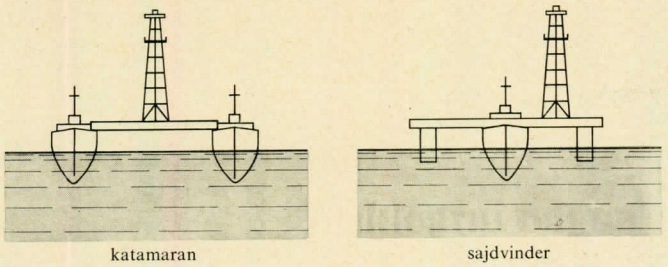
Sl. 8. — Platforme za bušenje sa uronjenim trupom.

BRODOVI ZA BUŠENJE. Kada je dubina veća od pedesetak metara, pribegava se pravom brodu: najveća dubina bušenja na čvrstom tlu čija je prospekcija ušla u aktivnu fazu nalazi se u proseku na oko sto metara, ali često i na 200 m. U svakom slučaju, uskoro će se preći na sistematsko bušenje sedimentnih basena koji se nalaze dalje na pučini, a čak postoji i jedan eksperimentalni projekat nazvan *Mohol*, prema fizičaru Mohorovičiću, za probijanje spoljašnjeg omotača Zemljine kore u pretpostavljenoj »slaboj tački« na dubini od 8 000 m u Pacifiku.

Razrađena su četiri različita oblika brodova za bušenje (*sl.* 9) radi rešavanja problema stabilnosti.

- U rešenju *Kis* koje je proučavano za *Mohol*, brod se postavlja na mesto pomoću četiri elise specijalne konstrukcije koje se pokreću elektromotorima i koje mogu da brod pomeraju ili da ga brzo okreću. Jedan radarski uređaj, snabdeven elektronskim računarom, neprekidno proverava položaj i stabilnost i prenosi naređenja elisama. Predviđaju se kasnije i brodovi od 15 000 t, građeni na tom principu; njihova veličina bi dostigla 150 m.

- Kod *katamarana*, bočna stabilnost je poboljšana postavljanjem dva paralelna brodska trupa jednog pored drugog, pri čemu je njihovo postavljanje statičkog tipa, analogno kao kod mašina sa uronjenim plovcima.



Sl. 9. — Brodovi za bušenje.

• Kod *sajdvindera*, stabilizatori su bočni plovci, a derik je postavljen između broda i jednog od njih.

• Kod rešenja *diskaverer* koristi se najveća mašina za bušenje koja je dosada konstruisana — njena dužina dostiže skoro 100 m. Ona može da buši u vodi dubokoj 180 m, a ova dubina bi mogla čak i da se poveća ako je potrebno. Njena je originalnost u tome što se ona može neprekidno orijentisati tako da zauzme najbolji položaj prema talasima: rotiranje od 360°, koje se vrši oko jedne osovine prečnika 6 m, koja prolazi kroz brodski trup i povezana je s jednim sistemom od 8 kotvi, obezbeđeno je poprečnim motorima velike snage, postavljenim na prednjem i zadnjem delu i žiroskopski kontrolisanim da bi se automatski održavao položaj pramca.

OPREMA ZA BUŠENJE. Bušenje pod morem iziskuje tehnike i opremu različite od onih koje se koriste na kopnu; pre svega, dno podmorske bušotine mora biti specijalno oblikovano da bi omogućilo kretanje broda u odnosu na njega: osnovna ploča, usidrena pomoću cementiranih cevi, opremljena je levkom i kablovima za vođenje. Sigurnosni zatvarači za brzo zatvaranje bušotine u slučaju erupcije automatski se postavljaju hidrauličnim dizalicama. U Francuskoj su takođe upravo uvedeni roboti sa automatskim pokretanjem koji su snabdeveni televizijskim kamerama i koji služe za zamenu glava za bušenje daljinskim upravljanjem, kada je reč o dubinama većim od onih koje su dostupne gnjurcima (90 m).

Logistička sredstva (pontonske dizalice, brodovi za snabdevanje, tegljači velike snage [2000 do 6000 ks.] za otvoreno more, helikopteri itd.) doprinose porastu troškova podmorskog bušenja, koji su mnogo viši nego na kopnu. Međutim, reč je o količinama, jer se procenjuje da bi nalazišta ispod površine mora mogla da sadrže 100 milijardi tona nafte, što je dva puta više od ukupnih danas poznatih kopnenih rezervi.

EKSPLOATACIJA NALAZIŠTA

PRIMARNA EKSPLOATACIJA. Kada se pri bušenju dostigne proizvodna zona, ugljovodonici izlaze na površinu pomešani sa blatom i otpacima. Ako geološka priroda sloja izgleda povoljna, odlučuje se da se izvrši proba protoka: niz šipki se izvuče i spusti se stub za proizvodnju; glava za bušenje se oprema skupom priključaka koji se naziva *Božićna jelka* i sadrži slavine različitih dimenzija koje omogućuju da se reguliše izlaženje nafte i kontroliše njen protok u slučaju abnormalnih pritisaka. Ova operacija se naziva *completion* (dovršavanje).

Ako je proizvodni kapacitet bušotine dovoljan, ona se ostavlja u rezervi onoliko koliko je potrebno da se konstruišu gasni separatori i rezervoari za uskladištenje, za spajanje sa postojećom mrežom za sakupljanje ili za izgradnju naftovoda za transport do rafinerije ili do pristaništa za utovar sirove nafte.

Ako se pokaže da je protok bušotine nedovoljan usled slabe propustljivosti stene, mogu se primeniti različiti stimulativni metodi:

• *zakiseljavanje*, koje se sastoji u ubrizgavanju hlorovodonične kiseline u slučaju krečnjačkih formacija, da bi se poboljšalo oticanje;

• *perforacija* (*sl.* 10), koja koristi jedan specijalni top koji horizontalno ispaljuje tanad ili upotrebljava samo eksploziv;

• *torpedovanje*, koje zatrese i rascepi stenu eksplozijom jednog punjenja od oko 500 kg;

• *lomljenje* je stimulativno tretiranje nalazišta ubrizgavanjem tečnosti pod pritiskom: vreća sa tečnošću se spušta do nivoa stene, izoluje se sa obe strane pomoću gumenih čepova (packers) i primenjuje se pritisak uz pomoć snažnih pumpi, potiskujući tečnost koja, zavisno od prirode stene, može biti voda, sirova nafta, gorivo ulje, razblažena hlorovodonična kiselina, neki gel ili specijalna tečnost. Do lomljenja dolazi pri pritisku reda veličine 0,2 bara po metru dubine bušotine.

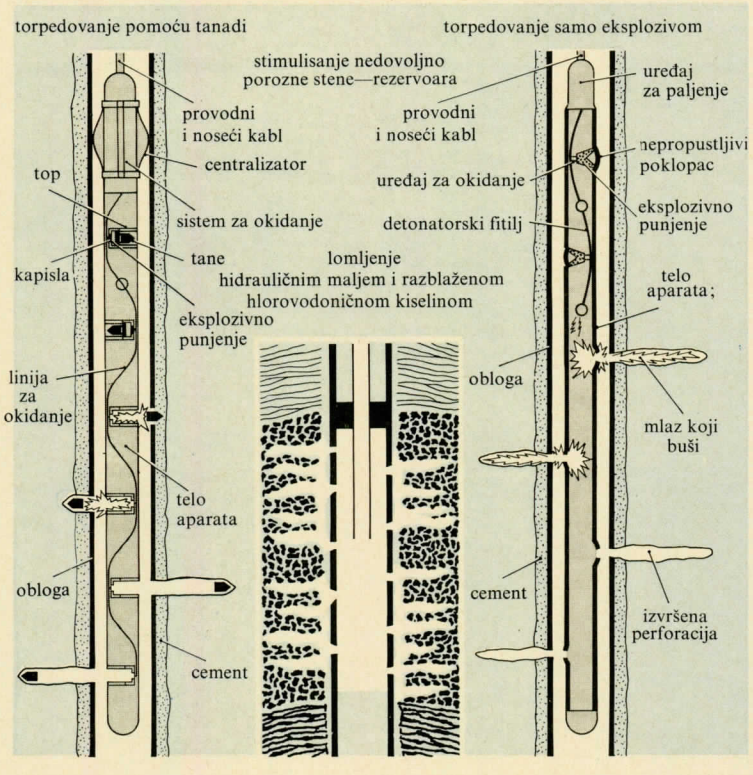
Najzad, kada je pritisak nalazišta nedovoljan, može se pokazati kao rentabilno instalisanje podzemnih pumpi, ali se obično pokušava da se nalazištu produži život metodima poznatim pod nazivom *sekundarna eksploatacija*.

Tipično nalazište nafte (*sl.* 11) je porozna i permeabilna stena rezervoar, koja sadrži tri odvojene zone odozgo naniže:

1. *gas cap* (gasovita kapa), gde su ispod jedne nepropustljive stene koja se naziva »cap rock« (stenovita kapa) sakupljeni najlakši ugljovodonici, tj. prirodni gas;

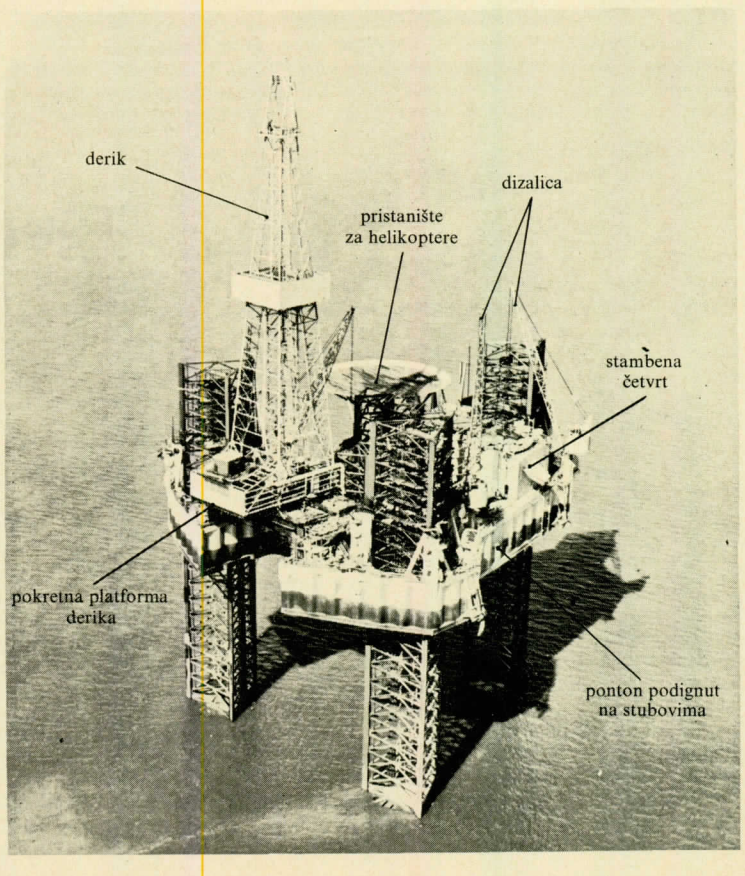
2. *proizvodna formacija*, koja je odvojena od prethodne jednom prelaznom zonom, a čini je stena impregnisana uljem (sirovom naftom), tj. tečnim ugljovodonicima u kojima su rastvoreni gasovi kao propan i butan;

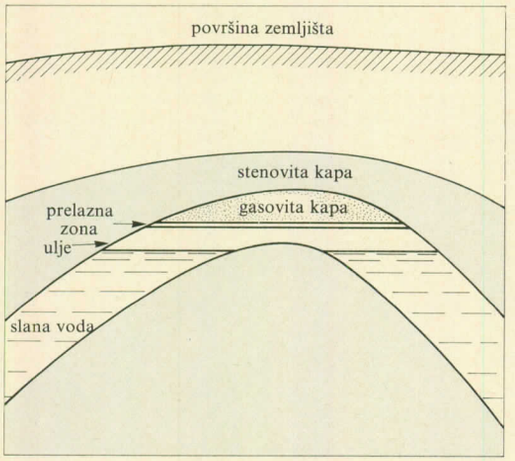
3. *slana voda* ili *vodonosna zona*, koja sadrži razne rastvorene soli.



Sl. 10. — Torpedovanje i lomljenje. *Desno*, platforma za bušenje »Neptun I«

Fot. G. M. Lavalette.





Sl. 11. — Shema tipičnog nalazišta nafte.

Razdvajanje ovih zona vrši se sporo, samo pod uticajem gravitacije, u toku geoloških perioda: najlakši, gasoviti ugljovodonici sakupili su se na vrhu rezervoara, dok su se najteži sakupili odmah ispod njih, a slana voda, kao najgušća među prisutnim fluidima, zauzela je dno nalazišta.

Pri primarnoj eksploataciji, odnosno u početnoj fazi eksploatacije, do isticanja sirove nafte na površinu dolazi usled energije sakupljene u gasovima pod pritiskom ili u prirodnom hidrauličnom sistemu. Širenje gasa iz kape u početku je dovoljno za potiskivanje tečnosti u bušotinu i odatle u mrežu za sakupljanje; istovremeno, neprekidno smanjivanje pritiska nalazišta oslobađa gasove sadržane u rastvoru u zoni ulja, što ima za posledicu ponovo stvaranje gasovite tavanice, koja i dalje potiskuje tečnost prema površini. Sve u svemu, prirodan pritisak gasa omogućuje dobijanje 10—40% ulja iz nalazišta, sa prosekom oko 20%.

Ponekad, kada nalazište ima povoljan geološki oblik, vodonosna zona se nalazi pod pritiskom tako da vađenje ulja dovodi do podizanja nivoa vode, što doprinosi održavanju pritiska. Pošto voda ima veću sposobnost potiskivanja ulja nego gas, konačno se dobija između 40 i 80% nafte, dakle u proseku dva puta više nego bez potiskivanja vodom.

SEKUNDARNA EKSPLOATACIJA. Veoma davno se došlo na ideju da se ulje koje je ostalo posle prirodnog iscrpljivanja, veštački potisne nekim drugim fluidom. Ovakva sekundarna eksploatacija se u današnje vreme počinje znatno pre prirodnog iscrpljivanja nalazišta; ona se može izvoditi bez dovođenja toplote — to je klasični metod, ili, nasuprot tome, uz pomoć toplote — to je termičko tretiranje.

Klasični metod. U proizvodnu formaciju ubrizgava se gas ili voda.

• U prvom slučaju se koristi *gas drive*, pri čemu se uz pomoć kompresora u gasnu kapu vraća jedan deo gasa odvojenog od sirove nafte na izlazu iz bušotine. Ova operacija ima za cilj održavanje pritiska, tako da se spreči oslobađanje gasovitih ugljovodonika rastvorenih u ulju: naime, kada se oslobode lake frakcije, nafta postaje viskoznija i gubi pokretljivost, ili drugim rečima, sposobnost da se lako kreće kroz mikroskopske pore u steni, tako da procenat vode i gasa koji ulaze u bušotinu porastu preko granice ekonomičnosti.

• Drugi metod se naziva *water flooding* ili plavljenje; otkriven — kako izgleda — pri nesreći na bušotinama koje su međusobno bile spojene, on je u prvo vreme u Sjedinjenim Državama smatran za ilegalan, jer se radilo o kosom bušenju. Voda se ubrizgava pumpama pod visokim pritiskom bilo u vodonosnu zonu ili u zonu ulja u opsegu nalazišta, koristeći bušotine specijalno načinjene za ovu svrhu ili, ako se desi takav slučaj, bušotine kod kojih je došlo do poplave pri podizanju nivoa. Voda koja se ubacuje može delom da potiče iz separatora glave za bušenje, što omogućuje čuvanje lokalnih izvora, ali se ona mora tretirati da bi se izbeglo stvaranje mulja u proizvodnoj steni usled hidroksida koji se mogu formirati sa jonima Fe i Mn.

Kao veoma uopšten izvod, može se reći da veštačko plavljenje vodom omogućuje, kao i prirodni pritisak vode, da se dobije onoliko ulja koliko je bilo proizvedeno i primarnom eksploatacijom, te da se dostigne iskorišćenje od 40 do 80%.

Termičko tretiranje. Sekundarna eksploatacija se još može poboljšati koristeći dovođenje toplote direktno ulju koje treba eksploatisati, što je naročito korisno kada su ugljovodonici viskozni ili čak i čvrsti.

• *Crpljenje uz pomoć vruće vode* još više povećava prinos u odnosu na obično plavljenje; toplota dovodi do toplotnog širenja ulja i smanjivanja njegove viskoznosti.

• *Crpljenje vodenom parom* ili *steam flooding* je još složenije: temperatura oko 140°C, kakva se dostiže u nalazištu, dovodi do umerene destilacije sirove nafte uz sekundarne efekte — porast pritiska i ekstrakciju rastvaračem. Para se ubrizgava bilo neprekidno pomoću specijalne bušotine, ili direktno u proizvodnu bušotinu, pri čemu se naizmenično ubacuje para i ekstrahuje nafta (*huff and puff*). Na taj način se mogu dostići prinosi reda veličine 90%.

• *Crpljenje vatrom* ili *fire flooding* je novija tehnika koja koristi sagorevanje na licu mesta: sagoreva se jedan deo ulja u unutrašnjosti formacije da bi se zagrejalo preostalo ulje i olakšalo njegovo oticanje do bušotine. Princip metoda je veoma jednostavan: vazduh se pomoću kompresora ubacuje na dno bušotine i ugljovodonici se zapale pomoću električnog ili gasnog upaljača, koji se spuštaju do proizvodne zone. Upaljač se zatim ugasi ubacivanjem azota, a sagorevanje ugljovodonika se nastavlja sve dok se dovodi vazduh, potiskujući ulje prema bušotini. Na taj način se proizvode temperature koje mogu da dostignu 400°C, što podiže pritisak u nalazištu, povećavajući sekundarne efekte destilacije, krekovanja i rastvaranja do te mere da bi teorijski trebalo da bude moguće iskorišćavanje celokupne količine ulja osim malog dela koji je sagoreo. Ipak, postupak iziskuje suviše visoke troškove preko izvesne dubine bušenja. U svakom slučaju, on je pogodan samo za stene sa uniformnom i velikom poroznošću i propustljivošću, kao što su slojevi peska dovoljne debljine.

• *Nuklearna energija* se takođe može koristiti za eksploataciju naftonosnih peskova. Eksperimenti izvedeni u Nevadi potvrdili su da se upotrebom čistih H-bombi gotovo potpuno odstranjuje opasnost od radioaktivnosti, ali da veoma visoke temperature u tački eksplozije dovode do intenzivne vitrifikacije stena. Zato je potrebno naknadno dosta snažno hidraulično razbijanje da bi se povratila propustljivost nalazišta. Bilo kako bilo, ova tehnika za sada ostaje u domenu budućnosti.

Transport nafte

OPŠTI POJMOVI. I pored spektakularnog razvoja industrije nafte, nijedan njen sektor aktivnosti se ne može uporediti po brzini rasta sa transportom: nezasita žed zemalja — potrošača za energijom iziskivala je uvođenje novih načina — i to uvek sve većeg kapaciteta — za donošenje na preradu sve većih količina sirove nafte iz, po pravilu, veoma udaljenih oblasti; s druge strane, transport konačnih proizvoda iz rafinerija do mesta korišćenja zauzima sve veći deo krupnih saobraćajnih puteva industrijskih zemalja: pomorski transport, reke, kanale, železnicu, puteve i autoputeve; ovi javni putevi u širokom smislu reči, teže zasićenju i čak postaju nedovoljni u špicevima, kao što je to bilo za vreme jake zime 1962—1963, podstičući industriju nafte da se orijentiše na gradnju sve obimnije mreže naftovoda kako za sirovu naftu, tako i za konačne proizvode: ovo je analogno gradskom saobraćaju, gde je podzemni tunel sredstvo kome se mora pribeći radi rasterećenja transporta na površini.

Sjedinjene Države su ipak u donekle privilegovanom položaju u odnosu na Evropu zbog činjenice da samo relativno mali deo njihovih potreba za naftom — oko 10% — mora da se uveze. Dejstvom ekonomskih zakona formirana cena dovoženja nafte iz izvora na Jugu i Zapadu potrošačima na Severu, znatno je ohrabrila ove poslednje da se sele prema pustinjskim oblastima Teksasa ili Kalifornije, čija je industrijalizacija omogućena klima-uređajima, dovođenjem slatke vode i drugim tehničkim pronalascima.

Evropa je, nasuprot tome, osim nekoliko izolovanih pokušaja na Bliskom istoku i u Severnoj Africi, morala da se pomiri sa prirodnom ravnotežom i da uvozi gotovo čitavu potrebnu količinu sirove nafte: primer Francuske je tipičan u ovom smislu.

Sirova nafta (u milionima tona)	1959.	1964.	1970. (predviđanje)
Proizvodnja	1,6	2,8	5
Uvoz	29,1	49,3	70
	30,7	51,1	75

Dugoročno posmatrajući, izgleda verovatno da će Evropa produžiti da sa svoje teritorije podmiruje samo mali deo svojih potreba za naftom. Tako se

Flote za prevoz nafte 1. januara 1965. (prema Dž.I. Džekobsu)

Liberija	15340000 brt
Norveška	12185000 brt
Velika Britanija	11749000 brt
SAD	8714000 brt
Japan	4966000 brt
Panama	3610900 brt
Francuska	3498000 brt
Italija	2980000 brt
SSSR	2728000 brt
Ostali, približ.	15730000 brt
UKUPNO, približ.	81500000 brt

zbog geoloških i, ponekad, istorijskih i političkih razloga, nalazišta kojima ona raspolaže nalaze na veoma udaljenim teritorijama, na Srednjem istoku, u Sahari, u Srednjoj i Južnoj Africi ili Latinskoj Americi, pa čak i u Sibiru. Za Zapadnu Evropu, kao uostalom i za Japan, osnovni način da se dovede sirova nafta jeste, dakle, prekookeanski transport, dok se Sjedinjene Države i Istočna Evropa uglavnom snabdevaju naftovodima.

SUPERTANKER

Danas se niko ne bi usudio da formuliše predviđanje o optimalnoj veličini broda za transport sirove nafte. Tek što je supertanker od 100 000 t izišao iz domena naučne fantastike, evo ga gde već saobraća na liniji od Persijskog zaliva do Japana, zatim do Evrope, dok se već pripremaju brodovi od 300 000 t i prelazi na studiju broda od 500 000 tona.

Zaista, troškovi eksploatacije (gorivo, posada) ovih giganata su praktično isti kao i kod klasičnih tankera od 50 000 t, dok su troškovi njihove gradnje, obračunati na transportovanu tonu, daleko od toga da rastu proporcionalno. Zamišlja se, uostalom, da se ovaj način transporta učini još ekonomičnijim, uvođenjem koncepcije monobloka kao kod termičkih centrala na zemlji: samo po jedan kotao, alternator, elisa, prečistač vode. Razvijena automatizacija mogla bi da smanji posadu na polovinu, iako jedan brod-transporter nafte danas ne iziskuje više od pedesetak ljudi, za razliku od luksuznog putničkog broda koji ima oko hiljadu ljudi.

U stvari, granice supertankera su određene infrastrukturom na zemlji, pristaništima, ušćima i kanalima. U Evropi postoji samo veoma ograničen broj prirodnih luka gde bi brodovi ovakvih dimenzija mogli da pristanu u dubokoj vodi, bez obzira na plimu i oseku: to su skandinavski fjordovi ili slična prirodna pristaništa kao Loh Long kod Glazgova i Milford Hevn u Velsu. Što se tiče velikih klasičnih pristaništa koja snabdevaju većinu naših rafinerija, ona su daleko od toga da bi se mogla upotrebiti za takve brodove. Stoga se u svakoj zemlji vrši selekcija i samo nekoliko mesta, kao što su L'Avr i Lavera, Roterdam i Vilhelmshafn, Đenova i Trst mogu, ili će uskoro moći da prime brodove od 100 000 do 200 000 tona. Karakteristike takvih supertankera su sledeće:

Nosivost	125 000 t	190 000 t
Dužina	275 m	330 m
Širina	42 m	42 m
Dubina gaženja pod punim opterećenjem	15 m	19 m

U slučajevima gde se pokaže da je suviše teško da se poboljšaju pristanišna postrojenja da bi se omogućilo pristajanje brodova takve veličine, delimično rešenje problema se može naći u *sea line*: brod se učvrsti u luci za plovke, od kojih neki mogu biti veliki kao prava veštačka ostrva, sa posadom i najmodernijim sredstvima za vezu, i priključi se na podvodne naftovode koji dosežu do obale.

NAFTOVODI ZA KONAČNE PROIZVODE

U 1945, kada je Evropa imala da se podigne iz ruševina prouzrokovanih ratom, u njoj nije bilo nijednog naftovoda. Rafinerije su bile rasejane po pristaništima ili u njihovoj neposrednoj blizini i konačni proizvodi su morali da se transportuju do unutrašnjih potrošnih centara rečnim putevima ili, u nedostatku ovih, mnogo skupljim suvozemnim transportnim sredstvima.

Tako se najpre razmišljalo o gradnji naftovoda za konačne proizvode, po uzoru na one koji su još pre rata postojali u Sjedinjenim Državama, dok se za teško gorivo ulje smatralo da se ne može transportovati cevima na velika rastojanja. Francuska je otvorila put u ovoj oblasti i odlučila 1950. da izgradi prvu liniju sa prečnikom od 250 mm između rafinerija u Avru i Ruanu i Pariske oblasti. TRAPIL (Društvo za transport nafte naftovodima, koje je pored države, obuhvatalo glavne francuske i inostrane petrolejske kompanije) otvorilo je ovaj naftovod 1953 . sa kapacitetom od oko 2 miliona tona godišnje.

Posle deset godina, kapacitet se morao povećati linijom od 325 mm sa kapacitetom blizu 7 miliona tona godišnje, koji je već procenjen kao nedovoljan, pa je gotovo odmah počela gradnja i treće linije sa 500 mm, čiji je prvi deo od Ruana do Ženevilijea počeo da se eksploatiše pri kraju 1964. Nesumnjivi uspeh ovog načina transporta, njegova sigurnost eksploatacije, potpuno odsustvo uzajamnog prljanja transportovanih proizvoda — od avionskog benzina do lakog ulja — bili su dobra škola, tako da smo danas svedoci mnogih projekata naftovoda za konačne proizvode koji treba da budu izgrađeni tokom narednih godina: u Velikoj Britaniji treba pomenuti Liverpul-London i Sautempton-London, u Francuskoj Lavera-Lion-Dižon (sa ogrankom do Ženeve), Strasbur-Mec-Nansi i konačno Denkerk-Lil; Nemačka proučava mogućnost rasterećivanja Rajne, koja u Rurskoj oblasti dostiže zasićenje, na taj način što će deo transporta ugljovodonika obavljati naftovodima duž obala.

Ekonomska privlačnost je tolika da se počinje sa gradnjom sve dužih naftovoda za goriva ulja i druge viskozne proizvode, uprkos njihove više cene, koja je rezultat potrebe da se cevi zagrevaju. Zagrevanje se može izvesti izmenjivačima sa parom, postavljenim duž linije u pravilnim razmacima, ili termootpornim kablovima postavljenim unutar ili izvan naftovoda.

NAFTOVODI ZA SIROVU NAFTU

Studije izvršene tokom pedesetih godina dovele su do oživljavanja interesa za naftovode za sirovu naftu, koji bi snabdevali rafinerije u unutrašnjosti, naročito na gornjem toku Rajne, u Francuskoj, kao i u Nemačkoj i Istočnoj Evropi. Pet glavnih naftovoda koji su gotovo jednovremeno ušli u eksploataciju su sledeći.

JUŽNOEVROPSKI NAFTOVOD. Ovo impozantno delo polazi od petrolejskog pristaništa Lavere (ušće Rone) i susednog čvora u Fosu, gde postoji takav smeštajni kapacitet da se mogu primiti brodski tovari od 1 200 000 m^3 sirove nafte koja se čuva u 26 rezervoara od po 40 000 i 50 000 m^3. Ovaj naftovod prečnika 860 mm zatim ide dolinom Rone, prelazi Juru i Alzas, prelazi Rajnu posle 760 km dužine na francuskoj teritoriji i produžuje do Ingolštata (Bavarska) linijom Rajna-Dunav sa manjim prečnikom. Na njemu se nalazi sedam pumpnih stanica, svaka sa snagom od 1800 kW; njegova izgradnja je zahtevala ugrađivanje 138 000 tona čelika u zemlju. Njegov transportni kapacitet je 35 miliona tona nafte godišnje. U početku je bilo predviđeno da ovaj naftovod snabdeva dve rafinerije u Strasburuu i dve u Karlsrueu, ali je njegova klijentela neprekidno rasla sa fabrikama u Lionu, u Nojšatelu (Švajcarska), u Loreni i Saru (projekat), u Palatinatu i u Bavarskoj.

NAFTOVOD ĐENOVA-ŠVAJCARSKA-BAVARSKA. Ovaj u osnovi italijanski konkurentski naftovod manjeg obima od prethodnog snabdeva rafinerije u Milanu, Švajcarskoj i Bavarskoj. Njegov prosečan prečnik je 500 mm, a godišnji kapacitet 10 miliona tona. Ovaj naftovod je specifičan u tome što prelazi Alpe, koristeći se tunelom Gran-Sen-Bernar.

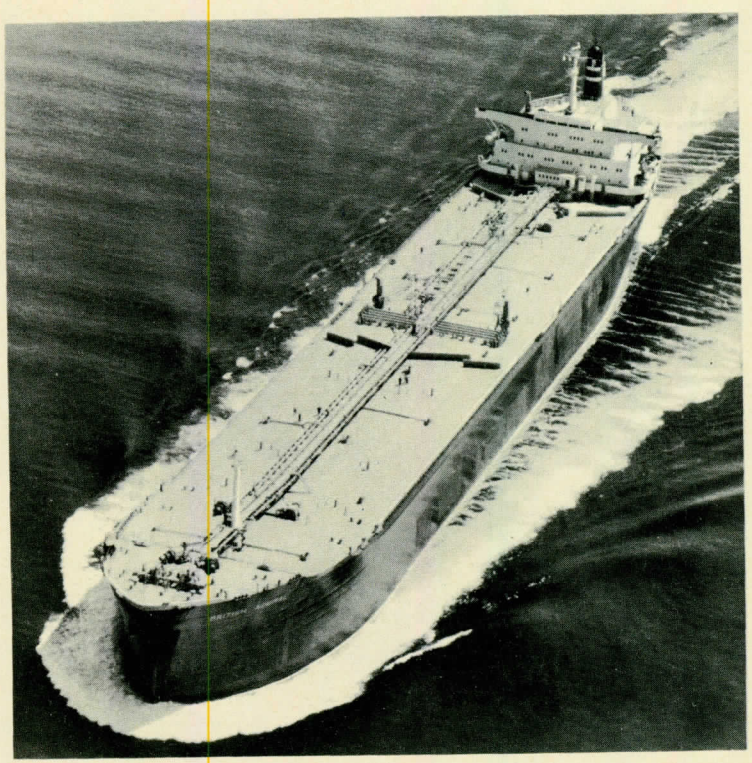
NAFTOVOD ROTERDAM-RUR. Njegove karakteristike su: prečnik 600 mm, godišnji kapacitet 15 miliona tona, dužina 300 km. On vodi do tri rafinerije u oblasti Kelna.

NAFTOVOD SEVERNA NEMAČKA-ZAPADNA NEMAČKA. Sa prečnikom od 700 mm i kapacitetom od 22 miliona tona godišnje, on polazi od Vilhelmshavena i snabdeva sedam rafinerija u dolini Rajne između Vezela i Kelna.

NAFTOVOD PRIJATELJSTVA. Sa dimenzijama još impresivnijim od južnoevropskog, ovaj naftovod dužine više hiljada kilometara, uračunavajući tu i deo na sovjetskoj teritoriji, snabdeva rafinerije koje se nalaze u Poljskoj, Mađarskoj, Čehoslovačkoj i Istočnoj Nemačkoj, polazeći od petrolejskih polja nazvanih »drugi Baku«, koja se nalaze između Urala i gornjeg toka Volge.

Gradnja naftovoda za sirovu naftu, koja predstavlja pravu revoluciju u ekonomici transporta nafte i određivanju mesta za rafinerije, ne zaustavlja se, tako da postoje dva vrlo velika projekta za naftovode koji bi polazili od Trsta, jedan sa prečnikom od 960 mm prema Bavarskoj, a drugi umerenijih dimenzija prema Austriji.

Najzad, treba pomenuti naftovode izgrađene u Sahari za transport sirove nafte iz alžirskih i libijskih izvora do obale, među kojima naročito sledeće:



Supertanker sa nosivošću od 100000 tona. *Fot. The British Petroleum Co. Ltd.*

Relacija	Rastojanje (u kilometrima)	Prečnik (u milimetrima)
Hasi-Mesaud—Buži	660	600
Hasi-Mesaud—Arzev	800	700
Edžele—La Skira	750	600
Ohanet—Hasi-Mesaud	530	750
Libija—Tobruk	530	850

OSTALA TRANSPORTNA SREDSTVA

Značaj izbora položaja rafinerija i interes da se smanje rastojanja do korisnika jasno se vide ako se uporede troškovi transporta energije u raznim njenim oblicima: za osnovu su uzeti troškovi prenosa američkog uglja u Evropu, a drugi oblici energije preračunati su u ekvivalent tona uglja, pa je dobijena sledeća tablica:

Cena za tonu po kilometru

Brodovi za prevoz nafte (50 000 brt)	0,45
Brodovi za prevoz uglja (50 000 t)	1 (osnova)
Veliki naftovodi za sirovu naftu (30 miliona tona godišnje)	1
Konvoji (3 000 t)	2,5
Mali naftovodi za proizvode (2 miliona tona godišnje)	3
Gasovodi	4,5
Železnica (cele kompozicije)	4,5
Skela sa sopstvenim motorom (1 000 t)	5
Brod za prevoz metana (uračunato prevođenje u tečno stanje)	5
Železnica (pojedini vagoni)	10
Električne linije VN	12,5
Kamioni-cisterne	30 do 40

Tablica pokazuje značajnu činjenicu da troškovi transporta variraju pokrivajući celu skalu od jednostrukog do stostrukog, prema prirodi izabranog sredstva. Tako se objašnjava potreba za *skladištima za distribuciju*, postavljenim u potrošnim centrima, odakle polaze u svim pravcima kamioni-cisterne, koji su gotovo univerzalno sredstvo isporuke čitavoj klijenteli, osim krupne industrije (koja se snabdeva direktno iz rafinerija naftovodima, vodenim putem ili železničkim kompozicijama), a imaće na taj način put koji je skraćen što je više moguće.

Rafinacija

OPŠTI POJMOVI. Sirova nafta, takva kakva se dobija iz nalazišta, ne može se direktno upotrebiti, tako da se za njeno transformisanje u konačne proizvode koristi niz postupaka poznat pod nazivom *rafinacija*. Od početka moderne industrije nafte sredinom XIX v., njena glavna upotreba bila je za petrolej za osvetljenje; veoma prosta destilacija je omogućavala da se proizvod »rafiniše«, tj. da se eliminišu lake frakcije — gas i benzin — koji su činili njenu upotrebu opasnom, kao i teške frakcije nazvane »ostatak« — mazut, gorivo ulje, bitumen, smola, asfalt, katran itd.

Otada su uvedeni mnogi postupci za dobijanje čitave serije konačnih proizvoda, od kojih je svaki usklađen sa njegovom posebnom namenom. Tablica koja sledi rezimira približne karakteristike glavnih proizvoda nafte od najlakših do najtežih, koji su uređeni prema rastućoj gustini, tački ključanja ili destilacije i rastućoj viskoznosti.

Približne karakteristike najvažnijih proizvoda nafte

	gustina			
Propan	0,51	ključanje :	— 44°C	
Butan	0,58	ključanje :	0°C	
Avionski benzin	0,71	destilacija :	40 — 160°C	oktana 115
Automobilsko gorivo	0,72	destilacija :	40 — 190°C	oktana 95
Supergorivo	0,74	destilacija :	40 — 220°C	oktana 100
Beli alkohol	0,78	destilacija :	150 — 200°C	
Kerozin (reaktivno gorivo ili petrolej)	0,80	destilacija :	160 — 230°C 180 — 350°C	
Gasno ulje ili domaće gorivo ulje	0,83	viskoznost na	20°C :	5 cSt
Dizel-ulje za brodove	0,86	viskoznost na	20°C :	40 cSt
Maziva: ulje za vretena	0,91	viskoznost na	50°C :	15 cSt
Maziva: srednje (0,87 do)	0,94	viskoznost na	50°C :	30 do 150 cSt
Maziva: gusto mazivo ulje	0,90	viskoznost na	50°C :	300 cSt
Parafin	0,99	viskoznost na	100°C :	5 cSt
Lako gorivo ulje	0,90	viskoznost na	20°C :	40 cSt
Teško gorivo ulje	0,95	viskoznost na	50°C :	100 do 300 cSt

Metode rafinacije su razvrstane u tri kategorije:

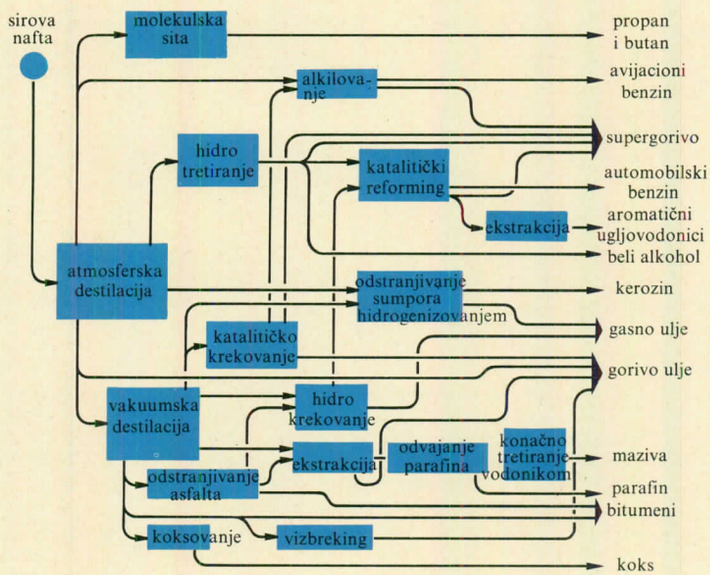
- *postupci za separaciju*, kao što su destilacija i ekstrakcija rastvaračima, kojima se ugljovodonici sadržani u sirovoj nafti razdvajaju jedni od drugih;
- *postupci za rafinaciju u užem smislu*, kojima se proizvodi prečišćavaju eliminisanjem neželjenih frakcija ili nečistoća tretiranjem hemijskim reagensima ili adsorpcijom, koristeći se ugljem, zemljom za obezbojavanje ili adsorptivnim sintetičkim smolama (molekulska sita);
- *postupci za sintezu*, kojima se proizvode novi ugljovodonici, kakvih u sirovoj nafti nema, ili oni čija je količina nedovoljna, krekovanjem ili hidrogenizovanjem pod kombinovanim dejstvom visokih temperatura, povišenih pritisaka i katalizatora.

RAFINACIJA U SJEDINJENIM DRŽAVAMA

Ipak, ako se izbliza pogledaju karakteristične tendencije u rafinaciji, vrlo brzo se vidi da treba praviti razliku između onoga što se dešava u Sjedinjenim Državama i situacije u kojoj se nalazi većina drugih zemalja, naročito u Zapadnoj Evropi. Naime, Severna Amerika koristi prirodne izvore na sopstvenom terenu, kao i istorijske okolnosti zahvaljujući kojima se obogatila u ovom veku mnogo brže nego čitav ostali svet, zauzimajući na taj način mesto koje je vekovima pripadalo Zapadnoj Evropi. Porast životnog standarda tamo se manifestuje automobilskom civilizacijom, koju svakako zahtevaju dimenzije zemlje, ali koja je favorizovana i politikom državnih vlasti. S druge strane, eksploatacija džinovskih nalazišta prirodnog gasa konkuriše na skoro čitavoj teritoriji rafinisanim proizvodima, boreći se za tržište koje drži domaće gorivo ulje i sve više eliminišući rezidualno gorivo ulje kao industrijsko gorivo.

Američka rafinacija (*sl.* 12) ostaje, dakle, orijentisana na osnovnu proizvodnju tečnih goriva, i to naročito automobilskog benzina sa visokim oktanskim brojem. U odsustvu poreske zaštite, dizel-motor je zaista ekonomičan samo za najteža vozila i velike mašine; kamioni i traktori se stoga opremaju motorima sa unutrašnjim sagorevanjem koji su, uostalom, često manji od motora za velika turistička vozila.

Količina sirove nafte koja se tretira, zavisi, prema tome, od potrošnje tečnog goriva i, pošto se ova danas povećava veoma sporo, usled zasićenosti automobil-



Sl. 12. — Shema potpune rafinacije u Sjedinjenim Državama.

skog tržišta i zagušivanja gradova i puteva, jasno je zašto je ukupna proizvodnja rafinerija rasla svega 1,8% godišnje u toku deset poslednjih godina, za koje vreme je od polovine svetske proizvodnje ona opala na ispod četvrtine.

Jednovremeno su vršena istraživanja koja su se uglavnom odnosila na postupke koji bi mogli da povećaju prinos benzina na račun drugih proizvoda: *alkilovanje*, koje daje tečna goriva sa visokim oktanskim brojem, polazeći od gasova proizvedenih destilacijom i krekovanjem i prevedenih u tečno stanje; *katalitički reforming postupak*, koji daje benzine i aromatične ugljovodonike, polazeći od teških benzina; *katalitičko krekovanje*, koje daje benzine, polazeći od gasnog ulja ili drugih teških destilata; razaranje ostataka, što su u Sjedinjenim Državama proizvodi koji se gotovo uopšte ne mogu prodati, vrše se *vakuumskom destilacijom*, koja daje destilate tipa teškog gasnog ulja — parafinskog, koje se i samo dalje krekuje; ostatak destilacije pod vakuumom, ukoliko u obliku bitumena ne nađe kupca, može da se tretira propanom radi *dezasfaltovanja*, čime se dobijaju polazni materijali za proizvodnju mazivnih ulja ili za krekovanje; ovaj ostatak se takođe može poslati na *vizbreking* ili na *koksovanje*, postupke više ili manje intenzivnog termičkog razlaganja, pri čemu se dolazi do proizvodnje petrol-koksa, krajnjeg proizvoda rafinacije; *hidrokrekovanje*, najzad, postupak koji je najskorije uveden, može da transformiše u benzin gotovo bilo koji teži proizvod nafte, zahvaljujući prisustvu vodonika.

Relativno smanjenje potreba u domaćinskom gasnom ulju, a naročito u gorivom ulju zbog konkurencije prirodnog gasa, priključuje se ovoj tendenciji povećanja prinosa benzina pri nepromenjenoj količini sirove nafte, čime se i objašnjava mala brzina porasta industrije rafinacije u Sjedinjenim Državama. Međutim, iako se tamo ne gradi više od jedne rafinerije godišnje, vitalnost ove industrije manifestuje se u neprekidnom naporu za modernizovanjem postojećih fabrika: tako program za 1965, sa 700 miliona dolara, obuhvata 11 postrojenja za alkilovanje, 15 postrojenja za odstranjivanje sumpora vodonikom i 10 postrojenja za hidrokrekovanje.

RAFINACIJA U EVROPI

Ako se sada ispitaju karakteristike evropske rafinacije, može se reći da se, u odnosu na Sjedinjene Države, radi o novijoj industriji, koja se razvila na način koji je jednovremeno i brži i jednostavniji.

Automobilska ekspanzija u Evropi bila je, naime, kočena ekonomskim faktorima, kao što su teškoće zbog posledica dva svetska rata, kao i poreskom politikom koja je u svim zemljama dovela do favorizovanja dizel motora za velika vozila, više nego motora sa paljenjem, i do podsticanja uvođenja malih vozila sa malom potrošnjom benzina. Pod ovim uslovima, potrebe za naftom u Evropi,naročito u oblasti tečnih goriva, ostale su mnogo manje nego u Sjedinjenim Državama i dugo se smatralo da je ekonomičnije uvoziti konačne proizvode iz krupnih rafinerija koje se nalaze u blizini nalazišta: Pensilvanija, Meksički zaliv, Rumunija, Kavkaz ili Persijski zaliv.

Francuska je bila među prvim zemljama koje su naslutile ulogu rafinacije kao podstrekača industrijskog razvitka, tako da su odgovarajući zakoni koji su ustanovili privremenu carinsku zaštitu, doveli 1930. do izgradnje rafinerija u glavnim pristaništima: Denkerku, Avru, Sen-Nazeru, Bordou, Setu i Marseju (Bersko jezero). Druge zemlje su sledile njen primer, naročito od 1950, i danas smo svedoci cvetanja novih fabrika i porasta kapaciteta koji će, priraštajem od 50 miliona tona godišnje, omogućiti Zapadnoj Evropi da dostigne Sjedinjene Države pre 1970.

Kapaciteti rafinacije
1. januara 1965.

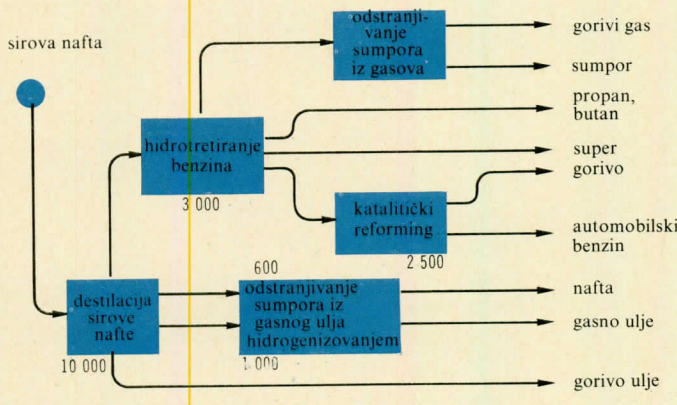
(u milionima tona godišnje)

Zapadna Nemačka	72
Belgija	14
Španija	13
Francuska	62
Velika Britanija	65
Italija	79
Holandija	26
Razno	26
UKUPNO	357

Zapadna Evropa	357
Socijalističke zemlje	226
Ostali svet	973
UKUPNO	1556
SAD	480
Kanada	51
Centralna Amerika	148
Južna Amerika	43
Afrika	32
Srednji istok	81
Japan	73
Australija	20
Razno	45
UKUPNO	973

Međutim, orijentacija unutar ove ekspanzije ostaje veoma različita, čak i pored toga što su potrebe u ukupnim količinama postale gotovo ekvivalentne onim u Sjedinjenim Državama: francuski potrošač, na primer, ima potrebe za svega 18% svoje nafte u obliku benzina, nasuprot 45% u Americi; 28% u obliku rezidualnog gorivog ulja prema 7%; i naročito 36% u obliku destilata (gasno ulje za dizel-motore, domaća goriva i reaktivna goriva) prema 30%, dok ostali proizvodi (gas preveden u tečno stanje, maziva, bitumeni, osnovni materijal petrohemije) predstavljaju oko 18%.

Time se objašnjava zašto su evropske ili afričke rafinerije (*sl.* 13) mnogo jednostavnije nego s one strane Atlantika: nije potrebno da se pribegava tolikom broju komplementarnih postupaka i obično je dovoljna jednostavna atmosferska destilacija sirove nafte, uz katalitički reforming i tretiranje hidrogenizovanjem koje je potrebno za odstranjivanje sumpora iz proizvoda. Samo neke krupne rafinerije biće potpuno opremljene za proizvodnju mazivih ulja, parafina i bitumena.



Sl. 13. — Shema proste evropske rafinacije.

Samo katalitičko krekovanje, neophodno za ravnotežu jedne američke rafinerije, opada po svom značenju i krekovane količine su mnogo manje od 10% tretirane sirovine, pa je većina evropskih rafinerija bez postrojenja ovog tipa, jer potrebe za gasnim uljem prevazilaze potrebe za benzinom.

Dalja evolucija ove sheme kretaće se ipak u smislu sve veće složenosti, sa težnjom da se približi američkoj: brzi porast životnog standarda i razvoj automobila povećaće procenat benzina; s druge strane, Evropa koristi sve više lakih afričkih sirovina koje daju veliki višak benzina, a ovaj se transformiše u gorivi gas reformingom ili delimičnom oksidacijom; najzad, novi izvori prirodnog gasa nadovezaće se na ovu proizvodnju gasa i oštro će konkurisati najpre uglju, zatim rezidualnim gorivim uljima i, najzad, gorivim gasnim uljima kako u industrijskom korišćenju, tako i u grejanju domaćinstava, zahvaljujući pogodnoj distribuciji i upotrebi koje omogućuje gasovito stanje.

Sve u svemu, ovo pomeranje ravnoteže navodi evropske rafinerije na razaranje najtežih gasnih ulja, da bi izbegle bilo kakav rizik od zamrzavanja pri najhladnijem vremenu, kako kod dizel-motora tako i kod instalacija za zagrevanje. U izvesnim novim rafinerijama pojavljuju se stoga dopunska postrojenja koja treba da poboljšaju kvalitet gasnih ulja krekovanjem sa ili bez prisustva vodonika: u prvom slučaju reč je o hidrokrekovanju; u drugom — o termičkom krekovanju ili vizbrekingu. Hidrokrekovanje će se sigurno razvijati mnogo sporije nego u Sjedinjenim Državama, tako da se tipična rafinerija kakva se danas gradi u Evropi sastoji od sledećih postrojenja:

— atmosferska destilacija sirove nafte;
— hidrotretiranje benzina;
— izdvajanje sumpora iz gorivih gasova;
— katalitički reforming benzina;
— odstranjivanje sumpora iz gasnih ulja i kerozina hidrogenizovanjem;
— eventualno vakuumska destilacija atmosferskog ostatka radi proizvodnje bitumena.

POSTUPCI KOJI KORISTE VODONIK

PRINCIP. Katalitički reforming, uveden oko 1950, izazvao je pravu revoluciju u tehnologiji rafinacije, najpre poboljšavanjem oktanskog broja na veoma ekonomičan način, a zatim time što je stavio na raspolaganje rafinerijama ovaj jeftini izvor vodonika, za kojim se odavno osećala potreba. Reforming, čiji se katalizator sastoji od platine deponovane na podlozi od alumine, ima, naime, osobenost da izvesne naftenske ugljovodonike transformiše u aromatične uz oslobađanje vodonika, kao što polazuje sledeći primer:

$$C_6H_{12} \rightarrow C_6H_6 + 3H_2$$
cikloheksan benzol vodonik

Znatne količine vodonika koje se na ovaj način dobijaju — oko 10 tona na dan u jednoj prosečnoj rafineriji — omogućile su razradu čitave serije novih postupaka hidrogenizovanja uvedenih tokom proteklih deset godina: s jedne strane, postupaka za odstranjivanje sumpora; s druge strane novijih postupaka krekovanja.

ODSTRANJIVANJE SUMPORA HIDROGENIZOVANJEM. Ova operacija se izvodi pod pritiskom od 40 do 70 bara i pri temperaturi od 200° do 400°C, prema načinu destilacije proizvoda (benzin, kerozin ili gasno ulje), koji se prevodi u gasnu fazu u prisustvu katalizatora koji se sastoji od kobalta i molibdena

na podlozi od alumine. Sumpor iz sumpornih jedinjenja sadržanih u tretiranom proizvodu izdvaja se u obliku sumporvodonika H_2S, iz koga se dalje izdvaja sumpor Klausovim postupkom oksidacije. Sumpor, koji se sakuplja i čuva u zagrevanom rezervoaru, obično se transportuje u tečnom stanju kamionima-cisternama do nekog susednog potrošača.

Odstranjivanje sumpora iz proizvoda hidrogenizovanjem sve više se širi i primenjuje za sve veću grupu proizvoda. Ono zaista odgovara mnogobrojnim potrebama. Reč je najpre o tome da se potrošaču isporuče tečna i druga goriva potpuno oslobođena njihovog prirodnog sadržaja sumpora: bilo da su u pitanju izduvni gasovi vozila i nepokretnih motora, ili dim iz domaćinskih i industrijskih ložišta, sumpor izbačen u atmosferu u obliku anhidrida sumporaste i sumporne kiseline opasan je i za javnu higijenu, naročito u gradovima, i za floru — naročito konifere, kao i za metalne površine na zgradama koje nagriza. Ipak, danas ne postoji ekonomičan postupak odstranjivanja sumpora iz ostataka, što je jedan od razloga koji ograničavaju upotrebu teških sumpornih gorivih ulja (kao što su ona koja se dobijaju iz sirove nafte sa Srednjeg istoka) ili na oblasti gde zagađenje atmosfere nije opasno, ili na fabrike opremljenje uređajima koji neutrališu dimove pre njihovog izbacivanja u slobodnu atmosferu.

Drugi razlog koji iziskuje odstranjivanje sumpora, uprkos relativno visokim troškovima, svojstven je rafineriji: to je potreba zaštite katalizatora, naročito onih za reforming koji sadrže platinu, jer ne mogu da izdrže dugotrajni kontakt sa sumpornim jedinjenjima bez gubitka svoje aktivnosti.

Najzad, katalitičko odstranjivanje sumpora poseduje mnoge druge prednosti u tehnološkom pogledu s obzirom na starije postupke prečišćavanja pri kojima se koriste kaustična soda, sumporna kiselina, natrijum plumbit ili bakarni hlorid. Pre svega, to je čist postupak koji ne ostavlja nikakve sporedne proizvode ružnog mirisa niti toksične, čija regeneracija, razaranje sagorevanjem, rasturanje ili izlivanje u reku ili more postavljaju gotovo nerešive probleme u industrijskim oblastima, a mogu biti čak i zakonom zabranjeni.

Skup proizvoda koji se u modernoj rafineriji prečišćava hidrotretiranjem veoma je širok: pored svih destilata, od najlakših benzina do teškog gasnog ulja, mogu se tretirati maziva ulja i parafini radi izdvajanja proizvoda koji sadrže sumpor i druge nepoželjne elemente, bilo zbog mirisa, boje ili viskoznosti konačnog proizvoda.

Nekada se među postupke hidrogenizovanja mogla svrstati i proizvodnja *sintetičkog benzina*, koja je razrađena u Nemačkoj za vojne potrebe, a bila je zasnovana na hidrogenizovanju frakcija koje potiču bilo iz nafte ili uglja. Sjedinjene Države i Velika Britanija su u Abadanu koristile *alkilovanje*, postupak kojim se sintetizuje izooktan u prisustvu sumporne ili fluorovodonične kiseline kao katalizatora, polazeći od dva gasa prevedena u tečno stanje: izobutana, koji je prisutan u sirovoj nafti i butena, koji se nalazi u gasovima posle krekovanja. Mnoga postrojenja izgrađena od 1943. do 1945. ostala su posle prekida neprijateljstava suvišne kapacitete za proizvodnju avijacionih tečnih goriva sa vrlo visokim oktanskim brojem. Uzmicanje klipnog motora pred reaktivnim, koji koristi direktno smeše benzina i kerozina, još je više istaklo ovu neravnotežu, tako da praktično nijedno novo postrojenje nije izgrađeno u toku dvadeset godina. Danas automobilski motori zahtevaju oktanske brojeve gotovo isto toliko visoke kao i avionski motori, pa se velike količine alkilata unose u automobilska goriva u Sjedinjenim Državama, gde se raspolaže proizvodnim kapacitetom koji je za 5% veći od kapaciteta sirove nafte, što je dovoljno za podmirenje svetskih potreba. Tako je alkilovanje, koje je, uostalom, veoma skup metod za proizvodnju benzina, jedan od retkih postupaka rafinacije koji, iz istorijskih razloga, gotovo da ne postoji izvan Sjedinjenih Država.

HIDROKREKOVANJE. Ovo je najmlađi postupak rafinacije, jer prva instalacija na industrijskoj skali datira tek od 1959, ali je široka lestvica njegovih mogućnosti izazvala vrlo veliko interesovanje: hidrokrekovanje se može smatrati za kombinaciju katalitičkog krekovanja i hidrogenizovanja; ovaj dvostruki karakter daje mu i veliku prednost, najpre u izboru krekovanih materija, koje idu od najlakših destilata do najtežih ostataka, zatim u mogućnosti da se menja relativni prinos dobijenih proizvoda, benzina i gasnih ulja, u širokim granicama. Hemijsko objašnjenje reakcija hidrokrekovanja zasnovano je na prolaznom formiranju, u prisustvu nekog katalizatora, *karbonijum jona* koji je više ili manje izomerizovan. Krekovanje, odnosno cepanje molekula pod uticajem toplote, daje jedan olefin (ugljovodonik koji sadrži dvostruku vezu) i jedan novi karbonijumov jon. Prisustvo vodonika zasićuje olefin pre nego što ovaj stigne da postepenim reakcijama formira koks: tako se izbegava glavni nedostatak katalitičkog krekovanja, koji je naročito ograničavao tip materija koje su se na taj način mogle tretirat.

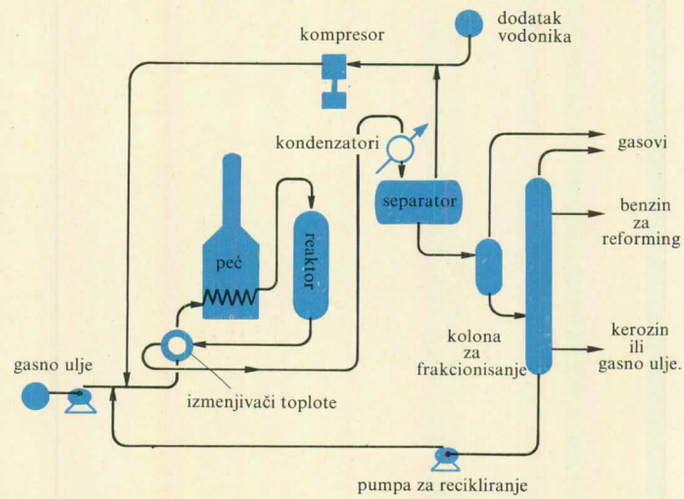
U praksi (*sl.* 14) hidrokrekovanje se koristi pri temperaturama između 200° i 400°C i pritiscima od 7 do 140 bara (mnogo višim nego u katalitičkom krekovanju), zavisno od potrebnog stepena hidrogenizovanja a naročito od polaznih materija koje se koriste: ako se ove razvrstaju od najlakših do najtežih, u ove poslednje mogu se uključiti teški benzini dobijeni destilacijom i krekovanjem, gasna ulja iz prve destilacije, gasna ulja iz katalitičkog krekovanja, gasna ulja iz termičkog krekovanja i od koksovanja, dezasfaltovano ulje, koje potiče iz ostataka pod vakuumom, teške bituminozne sirovine, ostaci iz atmosferske destilacije i destilacije pod vakuumom. Najrefraktorniji proizvodi mogu zahtevati dva reaktora za krekovanje uz ponavljanje postupaka sve do nestajanja nepoželjnih teških frakcija.

Dobijeni prinos varira zavisno od količine: može se reći da se približno polovina do dve trećine gasnog ulja i jedna trećina ostatka transformišu u benzin. Međutim, u većini slučajeva reč je o benzinu lošeg kvaliteta, čiji je oktanski broj sličan benzinu iz direktne destilacije i koji, prema tome, treba podvrgnuti reformingu. Stoga razvoj hidrokrekovanja iziskuje i paralelan razvoj katalitičkog reforminga.

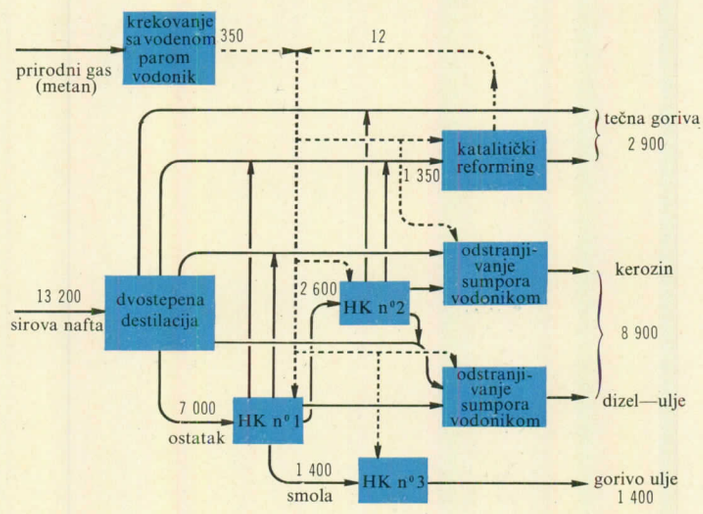
Drugi nedostatak hidrokrekovanja, koji ograničava njegovu upotrebu zbog veoma velikih troškova, jeste velika potrošnja vodonika: ona može da iznosi više od 2 težinska procenta od količine tretirane materije. Kada se u jednoj rafineriji koristi više od jednog ili dva postupka hidrogenizovanja, proizvodnja vodonika iz katalitičkog reforminga postaje nedovoljna, te se mora instalirati jedno proizvodno postrojenje, uglavnom krekovanje sa vodenom parom (»steam cracking«) metana, kojim se prirodni gas ili gas rafinerije krekuje u prisustvu vodene pare:

$$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$$

Američki sistem rafinacije, koji teži da se do maksimuma razore ostaci i teške frakcije, koristi se, što izgleda paradoksalno, u jednoj rafineriji na Srednjem istoku (Kuvajt), gde tržište zahteva tečna goriva visokog kvaliteta i gde praktično ne postoje potrebe industrije za gorivim uljem, osim skladišta za brodove koji se pune sirovom naftom. Na taj način se dolazi do sheme (*sl.* 15) zasnovane na hidrogenizovanju gotovo svih proizvoda, gde su za kapacitet od 13 200 tona sirovine dnevno predviđene tri instalacije hidrokrekovanja: prva, koja je među najvećim na svetu, sa kapacitetom od 7 000 tona na dan, krekuje ostatak iz vakuumske destilacije sa gustinom većom od jedinice i, u stvari, jednu sintetičku sirovinu sa gustinom 0,875. Druga tretira 2 600 tona na dan teškog gasnog ulja, koje se dobija destilacijom ove sintetičke sirovine, i daje kerozin i gasno ulje. Treća, sa kapacitetom 1 400 tona na dan, smanjuje viskoznost (vizbreking) smole, najteže frakcije sirove nafte, prerađujući je u gorivo ulje za brodove. Sve ovo zajedno predstavlja pravu alhemiju, pošto se kod sirove nafte iz Kuvajta, koja sadrži najmanje 55% gorivog ulja za direktnu destilaciju, ovaj procenat smanjuje na 10%, dok srednji destilati, kerozin i gasno ulje, imaju prinos koji prelazi 2/3 količine sirovine! Međutim, nasuprot tome, proizvodnja vodonika malog katalitičkog reforminga, procenjena, kao što smo rekli, na desetak tona na dan, sasvim je nedovoljna za ogromne potrebe hidrokrekovanja i hidro-



Sl. 14. — Hidrokrekovanje.



Sl. 15. — Rafinacija sirove nafte iz Kuvajta hidrokrekovanjem. (Označeni kapaciteti u tonama na dan.)

tretiranja; potrebno je, dakle, predvideti jednu instalaciju za reforming koja neće proizvoditi manje od 350 tona vodonika na dan. Ova instalacija je sigurno ono što predstavlja kudikamo najvažniju investiciju ove rafinerije.

Katalizatori za hidrokrekovanje, koji imaju dvostruko dejstvo, sadrže jedno jedinjenje koje hidrogenizuje i jednu podlogu kiselog karaktera. Prvi element može da bude bilo metal, kao što su platina ili nikl, bilo oksid ili sulfat nikla, kobalta, volframa ili molibdena. Podloga je, kao kod svih katalizatora za krekovanje, alumina ili siliko-alumina SiO_2-Al_2O_3. Prisustvo vodonika u višku čini ove katalizatore manje osetljivim na nečistoće, a osetljivijim na koksovanje nego što su katalizatori za krekovanje (siliko-alumina ili siliko-magnezija) i reforming (platina na alumini).

INTEGRISANE RAFINERIJE

Koncepcija novijih rafinerija može se rezimirati rečima »integracija« i »automatizacija«, neologizmima koji imaju vrednost bar u tome što simbolizuju nove ideje. Izgleda prilično paradoksalno da se naročito u Evropi nalaze primeri primene ovog inženjerstva američkog porekla, ali se, zbog razloga koji su prethodno izneti, u Evropi gradi mnogo više novih fabrika nego u Sjedinjenim Državama. Pojam integracije ili funkcionalnog uprošćavanja proističe iz želje da se, s jedne strane, snize investicioni troškovi, pošto svaka velika internacionalna petrolejska kompanija mora da gradi u proseku jednu rafineriju godišnje i, s druge strane, da se snize troškovi eksploatacije, tj. na prvom mestu broj zaposlenih. Velike rafinerije s početka ovog veka zapošljavale su više hiljada radnika, dok jedna današnja rafinerija istog kapaciteta ne zahteva više od oko stotine ljudi u periodu normalnog rada.

Ovaj rezultat je postignut sve većim zamenjivanjem ručnog rada automatima: u prvom stadijumu bio je eliminisan fizički napor čoveka i zamenjen radom mašina. Ova evolucija se, razume se, odigravala u svim industrijama, ali je priroda proizvoda, koji su obično tečni, ponekad gasoviti, a nikada čvrsti, omogućila rafinaciji nafte da ima pionirsku ulogu. Posle toga je funkcija nadgledanja i kontrole, koja je nekada zahtevala veliki broj kvalifikovanog osoblja jer su operacije destilacije upotrebljavale znatnu energiju i uvek su predstavljale permanentnu opasnost od eksplozije i požara, bila malo-pomalo prenošena na automatske instrumente.

Osim toga, danas se raspored i uloga pojedinih delova rafinerije proučavaju sa aspekta što je moguće većeg smanjenja ručnog rada, jer kontinualan rad rafinerija i otpremanje proizvoda nameću rad po »četvorkama«: potrebna su četiri čoveka za jedno radno mesto, pri čemu svaki od njih radi po 8 sati, a jedan se po redu odmara. Smanjivanje fizičkog rada se postiže uopštavanjem upotrebe aparata za automatsku regulaciju: ovi instrumenti su u početku postavljeni radi olakšavanja rada proizvodnih instalacija, ali se oni neprekidno poboljšavaju koristeći se naročito najnovijim dostignućima elektrotehnike i poluprovodnika (tranzistora) za veoma preciznu kontrolu četiri osnovne industrijske veličine: temperature, pritiska, protoka i nivoa.

Dosta je čudna konstatacija da je proširivanje upotrebe ovih aparata na jednostavnije tehnike uskladištenja, mešanja i ekspedicije proizvoda skorašnjeg datuma; dugo su se u rafinerijama koristili vrlo moderni instrumenti za merenje i regulaciju pri postupcima destilacije i krekovanja, ali se istovremeno i dalje zapošljavao veliki broj radnika za baždarenje rezervoara, rukovanje vagonima-cisternama, i njihovo punjenje ili punjenje boca butanom. U današnje vreme preduzimaju se značajni koraci u pravcu automatske fabrike, i izvesne moderne rafinerije ostavljaju čudan utisak da su napuštene, naročito noću, iako rade punim kapacitetom. Jedna od najspektakularnijih novina uvedena je pri mešanju proizvoda. Svaki konačan proizvod — benzin, gasno ulje, ili gorivo ulje — smeša je mnogobrojnih konstituenata u promenljivim proporcijama. Ovo mešanje se donedavno izvodilo diskontinualno, prema »sastavu« u rezervoaru, koji je korigovan sukcesivnim dodavanjem i cirkulacijom kroz pumpe za mešanje dok sve karakteristike ne postanu dobre. Mnogobrojno osoblje bilo je zaposleno na postavljanju pumpnih kola, otvaranju i zatvaranju ventila, uključivanju i isključivanju pumpi, proveravanju visine rezervoara i izračunavanju proporcija smeša. Zahvaljujući elektronici, sve ove operacije su postale automatske i smeše se prave sa preciznošću većom od najboljih laboratorijskih analiza, što omogućuje da se proizvodi direktno šalju na utovar u brodove, kamione ili vagone, bez njihovog prethodnog ispitivanja u rezervoarima. Ovo mešanje se vrši u liniji, tj. na sastavu cevi kroz koje se pumpama potiskuju razni proizvodi, a ne u rezervoaru.

BUDUĆE RAFINACIJE

Dokle će ići ova evolucija prema automatizaciji? Da li se može pretpostaviti da će ova industrija, čije je poreklo u osnovi empirijsko, čija je hemija bila suviše komplikovana da bi je hemičari mogli interpretirati, čije su suviše kompleksne reakcije izmicale objašnjenju termodinamičara, moći jednog dana da se potpuno predstavi jednačinama i da se upravlja elektronskim »mozgovima«. Glavna teškoća je, očigledno, uspostavljanje veze između dva skupa, između ugljovodonika, s jedne strane, i pozitivnih ili negativnih osobina koje zahteva korišnik, s druge strane. Polazni materijal se i sam javlja u beskonačnom mnoštvu varijacija: ne samo da svaka sirova nafta sadrži hiljade ugljovodonika koji se razlikuju po svim svojim karakteristikama (na primer, svaki ima drukčiju tačku ključanja) već i svako nalazište, ponekad i svaka bušotina, daje različitu sirovu naftu. Na izlazu je konačni proizvod; jedna velika moderna rafinerija daje stotine konačnih proizvoda i svaki je određen tačnim *specifikacijama* koje mu određuju karakteristike zavisno od uslova primene: najjednostavniji proizvodi, kao što je butan za domaću upotrebu, imaju samo desetinu ovih karakteristika; najkomplikovaniji proizvodi, kao što su tečna goriva namenjena ratnoj avijaciji, imaju ih 30 ili 40.

Jedna od teškoća pri matematičkom izražavanju koje igra ulogu prevodioca između ova dva sveta, dosad međusobno povezana samo praksom, jeste u tome da su kod ugljovodonika osobine retko aditivne: tako će dve frakcije benzina, posle mešanja u jednakim proporcijama, imati gustinu jednaku aritmetičkoj sredini njihovih pojedinačnih gustina; međutim, njihov oktanski broj imaće nepredvidljivu vrednost, što se može tačno odrediti samo eksperimentom.

Danas se pokušava da se ova prepreka zaobiđe postavljanjem automatskih aparata koji vrlo brzo analiziraju dati uzorak i praktično neprekidno registruju jednu od njegovih osobina. Danas se na taj način mogu odrediti tačke destilacije (početna, intermedijarna i konačna temperatura ključanja jedne kompleksne smeše ugljovodonika), viskoznost, sadržaj sumpora, napon pare glavnih proizvoda. Čak je rešen i problem automatskog određivanja oktanskog broja, ovog arbitrarnog merila koje razvrstava benzine upoređujući njihovu otpornost prema detonaciji ili zveketu motora sa otpornošću dva ekstremna referentna goriva: izooktanom i normalnim heptanom, koji po definiciji imaju oktanske brojeve 100 odnosno 0. Neki benzin sa oktanskim brojem 95 imaće isti nedetonatorski kvalitet kao i smeša 95% izooktana i 5% *n*-heptana, ako se ova koristi za napajanje jednog laboratorijskog motora specijalno konstruisanog za merenje samopaljenja. Međutim, ovakva analiza, čak i sa kvalifikovanim osobljem, zahteva oko jedan sat vremena. Ovo vreme je često suviše dugo, jer u modernoj rafineriji za jedan sat stotine tona proizvoda dođu u pogone, rezervoare i tankove za distribuciju, a desetine ovih tankova stignu do potrošača. Oktanski analizator je, dakle, jedan korak napred ka automatizaciji: on neprekidno uzima uzorke benzina koji izlazi iz mešalice na liniji, u polaznoj tački naftovoda za ekspediciju; koristeći se specijalnim motorom, on zatim naizmenično određuje kvalitet uzorka i referentnog goriva; jedan mali analogni računar transformiše, najzad, rezultate ovog poređenja u signal koji se šalje regulacionom ventilu mešalice: svako odstupanje od željenog oktanskog broja automatski se koriguje, tako da se zaista dobija smeša konstantnog kvaliteta, što je bio pravi cilj, a ne kao do sada, smeša konstantnih proporcija.

Rafinacija nafte je, dakle, oblast pogodna za korišćenje industrijskih i administrativnih računara, ne računajući računare za upravljanje. Rafinerija budućnosti, čiji se bar delimični primeri već mogu videti, ne računajući buduća usavršavanja koja se mogu zamisliti, pokazuje već značajne razlike u odnosu na većinu današnjih rafinerija. Osoblje, čiji je broj veoma smanjen, sastoji se od operatora koji nadgledaju table sa instrumentima u centralnoj kontrolnoj sali, za sve proizvodne pogone, za smeše i ekspediciju. Aparati analiziraju sve karakteristike koje određuju kvalitet intermedijarnih proizvoda i uz pomoć računara podešavaju tačke za regulaciju protoka ne samo proizvoda već i goriva koje obezbeđuje automatsko zagrevanje peći. Pumpe za punjenje kamiona-cisterni puštaju se u pogon daljinskim komandama, kojima upravljaju vozači vozila, kompozicije vagona-cisterni se automatski dovode pod otvore za punjenje koji se nalaze na vagama koje daljinski komanduju puštanje u pogon i zaustavljanje pumpi. Količine proizvoda koji cirkulišu u rafineriji određuju merači nivoa u rezervoarima i merači protoka, čiji se nalazi prenose računovodstvenim računarima koji automatski utvrđuju situaciju na stovarištima i pripremaju dokumenta za izlaz proizvoda, kako carinska tako i komercijalna.

Održavanje opreme neprekidno prate ekipe stručnjaka, koje uz pomoć ultrazvuka i γ-zrakova pregledaju sve aparate, da bi, pre svega, utvrdili koroziju i nedostatke. I ovde se pozivaju u pomoć računari da bi se dobili tehnički statistički podaci o učestanosti i troškovima intervencija, da bi se utvrdio korisni vek trajanja svakog uređaja i datum njegove zamene, da bi se predvideli radovi koje treba izvesti pošto prestane funkcionisati, sa detaljnim planiranjem osoblja, mašina i snabdevanja najekonomičnijim rezervnim delovima.

Zahvaljujući ovakvoj organizaciji, instalacije prestaju da rade samo svake dve ili tri godine. Potrebne radove obave vrlo brzo, za dvadesetak dana, druga preduzeća koja raspolažu i radnom snagom i opremom — snažnim uređajima koji kudikamo prevazilaze mogućnosti korišćenja unutar jedne rafinerije.

Prirodni gas

OPŠTI POJMOVI. Može izgledati neobično da se prirodni gas pojavljuje među raznim aspektima industrije nafte, umesto da se pripoji industriji gasa iz kamenog uglja, koji se tradicionalno naziva »gas za osvetljenje«. Naravno, korisnik ne razlikuje konačni proizvod kojim se koristi, bilo da je reč o *prirodnom* gasu, tj. dobijenom iz podzemnih nalazišta analognih petrolejskim poljima i često povezanih s ovima, ili o *proizvedenom* gasu, tj. fabrikovanom nekim industrijskim postupkom, polazeći od izvesnog materijala, koji je obično kameni ugalj, ali koji vrlo često može biti neki petrolejski proizvod. Ipak, u svim stadijumima njegove proizvodnje, prirodni gas se u osnovi može tretirati kao petrolejski proizvod.

Pre svega, izvore gasa obično otkrivaju petrolejske kompanije pri istraživanju ugljovodonika. U početku, a u nenaseljenim oblastima još i danas, otkrivanje jednog gasnog izvora ostajalo je obično neiskorišćeno zbog malog broja potrošača u okolini, jer se tehnika transporta gasovodima sporo razvija. Prirodni gas pripada, dakle, od svog otkrivanja organizacijama, javnim ili privatnim, koje istražuju naftu. Međutim, ovde se ne završava njihova međusobna veza: gas se ne može direktno koristiti, već ga treba rafinisati da bi se iz njega izdvojile tečne frakcije, vodonik-sulfid i inertni gasovi, što se izvodi u pogonima za tretiranje, koji su isto što i specijalizovane rafinerije nafte; treba ga zatim transportovati na veću ili manju udaljenost, što se radi potpuno isto kao i sa naftom, naftovodima i brodovima namenjenim za ovu svrhu koji se nazivaju »metanci«, »propanci«, »butanci«; treba ga čuvati na mestima upotrebe, jer su varijacije u potrebama iz časa u čas i iz sezone u sezonu takve da transport ne bi mogao da se dimenzioniše prema maksimalnim potrebama. Uskladištavanje se vrši uz pomoć petrolejske tehnike, bilo u metalnim rezervoarima, pri čemu je gas preveden u tečno stanje, ili u prirodnim podzemnim geološkim formacijama, ako ove postoje u blizini, bilo u tečnom ili gasovitom stanju, ili, najzad, u veštačkim šupljinama.

NALAZIŠTA PRIRODNOG GASA

Kao da se priroda poigrala sa čovekom uživajući u stvaranju nalazišta gasa — kao i nalazišta nafte, koja su, očigledno, povezana s prvima iz geoloških razloga — na najnepristupačnijim mestima Zemljine kugle: u Sovjetskom Savezu to su kavkaska, sibirska i transkaspijska polja, što je moguće više udaljena od Moskve i Lenjingrada; u Sjedinjenim Državama su to polja u Teksasu ili Luizijani, na maksimalnoj udaljenosti od Njujorka, Čikaga i San Franciska; u Kanadi se gas, naravno, nalazi u Alberti, hiljadama kilometara daleko od najmanjeg potrošača; zatim u Africi — u srcu Sahare, kao i u Pakistanu — najnenaseljenijem delu indijskog subkontinenta, ili u Argentini — u udaljenoj Patagoniji.

Zapadna Evropa, tako žedna energije, uvek je izuzetak od pravila, možda stoga što je gustina njene naseljenosti tolika da se svako otkriće mora nalaziti na razumnoj udaljenosti od potrošača. Bilo kako bilo, činjenica je da se prvo evropsko polje, čija je eksploatacija počela odmah posle II svetskog rata, nalazilo u dolini reke Po u severnoj Italiji, u neposrednoj blizini najindustrijalizovanijih oblasti ove zemlje koja je naročito siromašna ugljem. Ovo je jedan od razloga italijanskog industrijskog i tehničkog proleća za dvadeset poslednjih godina. Nekoliko godina posle početka eksploatacije ovog polja, 19. decembra 1951, nađeno je izvorište u Laku, i ovoga puta je Francuskoj palo u deo da iskoristi ovo prirodno bogatstvo, koje je dalo snažan podstrek nacionalnoj ekonomici, stimulišući ekonomsko buđenje čitave jedne relativno slabo razvijene oblasti — — jugozapada Francuske. Zatim je 1963. usledila Holandija, ovog puta na jednoj skali koja se ne može uporediti sa prethodnim, sa svojim otkrićem pravog trezora skrivenog pod zemljom, koji po vrednosti prevazilazi ono što su konkvistadori maštali o Eldoradu. Najzad, verovatnoća postojanja gasa u sedimentnim basenima Severnog mora, izgleda, postaje sigurnost i svaki dan donosi nova otkrića: gotovo je sigurno da je potencijal proizvodnje gasa u ovim oblastima takav da će potresti tradicionalnu privredu svih susednih zemalja. Samo rezerve otkrivene kod Groningena su trostruko veće od godišnje potrošnje energije u svim njenim oblicima u Zapadnoj Evropi. Ovo je, uostalom, i najveće nalazište na svetu.

Prirodni gas u svetu (u milijardama kubnih metara)

	Dostupne rezerve (utvrđene)	Godišnja proizvodnja 1964.
Evropa		
Holandija	1100	30 do 35
Francuska	200	5 do 7
Italija	150	3
Nemačka	105	2
Austrija	30	1
SAD	8000	450
SSSR	5000	100
Sahara		
Hasi-R'Mel	1000	
Gasi-Tuil	600	1 do 2

TRANSPORT

Kao što se naslućuje, ključni problem industrije prirodnog gasa je problem transporta: od svih oblika energije, ova se najlakše proizvodi kada je izvor jednom pronađen i, osim izvesnih tretiranja, najlakše se koristi kao gorivo, ali je najskuplja za uskladištenje i za transport. Dugo je ovaj problem smatran za nerešiv, pa su se ljudi mirili sa sudbinom, spaljujući u obliku gigantskih buktinja gas i u Teksasu i na Srednjem istoku. Zatim je privlačnost ovog jeftinog izvora energije navela potrošača da mu se približi: Teksas i Luizijana, npr., daju dve trećine ukupne proizvodnje prirodnog gasa u Sjedinjenim Državama, ali troše polovinu, tj. skoro 80% svoje proizvodnje, dok pre trideset godina u ovim krajevima praktično nije postojala moderna industrija. Može se reći da je petrohemija rođena iz želje da se koriste ranije nekorišćeni gasovi, koji su pre rata u rafinerijama sagorevani.

U Francuskoj je, zahvaljujući sličnoj pojavi, na polju u Laku razvijena veoma krupna industrija koja čini jedan od najimpozantnijih kompleksa u Evropi: termocentrala, petrohemija, proizvodnja aluminijuma došle su da se napajaju energijom na samom izvoru novog Paktola.

Na kraju krajeva, trebalo je transportovati ovaj gas do korisnika koji je bio udaljen hiljadama kilometara, preko planina i okeana, koristeći za ovo gasovod i, u novije vreme, brod za transport metana.

Transport na velika rastojanja gasovodom zahteva, da bi bio rentabilan, određen protok koji se koristi punim kapacitetom: on mora, dakle, da snabdeva postojeća tržišta, razpoređena, koliko je to moguće, duž njegove trase, a ne sme da računa na buduću klijentelu. Stoga termičke centrale nisu naročito dobri klijenti zbog neujednačenih potreba za elektricitetom između dana i noći i od jedne sezone do druge.

Upravo iz ovog razloga se različiti projekti dovođenja prirodnog gasa sa Srednjeg istoka u Zapadnu Evropu nisu nikada pokazali kao izvodljivi, pa je teško doneti i odluku o dovođenju gasa iz Sahare gasovodom: holandski konkurenti su već uveli duž Loare novu liniju radi ravnoteže cena, tako da severna tržišta Evrope, sa njihovim velikim gradskim i industrijskim centrima, uključujući i Pariz, idu na štetu Sahare. Svestrano su proučena tri rešenja i ona su spremna sa tehnološkog gledišta:

— *prolaz kroz Gibraltarski moreuz*, gde dubina ne prelazi 500 m; ovo je najduža trasa, ali njeno izvođenje ne bi nailazilo ni na najmanje teškoće;

— *trasa Mostaganem-Kartagina*, sa 200 km podmorskog gasovoda, gde dubina dostiže 2 700 m, ali koja bi omogućila skraćivanje ukupnog rastojanja za 900 km;

— *trasa preko Tunisa i Sicilije*, koja se nalazi između dve prethodne varijante, sa 200 km podmorskog gasovoda na dubini od 500 m.

Razmatranje ovih projekata omogućuje sticanje predstave o kapitalu koji se ulaže u transport gasa; ako se uzme da gasovi od malog prečnika (400 mm), koji prolazi preko normalnog terena, staje oko 500 000 franaka po kilometru, mogu se pretpostaviti sume koje bi zahtevalo dovođenje gasa iz Sahare u Evropu. Ni transport brodovima nije jeftiniji.

Stoga se impresivan razvoj gasovoda u Sjedinjenim Državama i u SSSR objašnjava masovnim tržištem, koje, pre svega, predstavlja zagrevanje domaćinstava u zemljama sa izrazito kontinentalnom klimom. U Evropi se zamena instalacija izvodi sporije zbog konzervativizma klijentele i cene ove zamene.

Nećemo se zadržavati na transportu prirodnog gasa u Sjedinjenim Državama, koje su pokrivene maksimalno gustom mrežom; manje je, međutim, poznato da SSSR takođe raspolaže jednim razvijenim sistemom: 33 000 km gasovoda spaja Moskvu i Lenjingrad sa glavnim nalazištima (Krasnodar, Stavropolj, Volgograd, — u istočnoj Ukrajini), dok su nova nalazišta prirodnog gasa u Centralnoj Aziji (Kazahstan i Buhara) opremljena najvećim instalacijama na svetu: dva gasovoda sa prečnicima od po 1 m sprovešće godišnje 21 milijardu kubnih metara na udaljenost od 2 200 km.

PRIRODNI GAS PREVEDEN U TEČNO STANJE. Pošto zapremine gasa koje treba transportovati neprekidno rastu, industriji gasovoda preti opasnost od gigantskih proporcija. Zato počinje ozbiljno da se razmišlja o korišćenju napretka koji je ostvaren u tehnici prevođenja prirodnog gasa u tečno stanje, da bi se ovaj transportovao naftovodima. Prirodni gas se, naime, uglavnom sastoji od metana CH_4, koji ključa na —161°C. On se, dakle, može proizvoditi, uskladištavati i transportovati na toj temperaturi pod atmosferskim pritiskom. Uostalom, u skladu je sa termodinamičkim zakonima da se sa fluidom manipuliše na što nižoj temperaturi, a da se on transformiše u mehaničku energiju na što višoj temperaturi. Procenjuje se da cena kompresije — prevođenja u tečno stanje gasa, zatim njegovo pumpanje i, na kraju, ponovo isparavanje ne iznose više od četvrtine troškova pumpanja u gasovitom stanju. Preostaje ipak da se reši problem gubitaka toplotne energije, kao što ga rešavaju industrije

niskih temperatura, vakuuma i prostora, korišćenjem supertermoizolatora ili principa dvostrukog zida sa vakuumom u međuprostoru.

1964. godine puštene su u pogon prve industrijske linije za pomorski transport prirodnog gasa prevedenog u tečno stanje, otvarajući time pravu novu eru u snabdevanju Zapadne Evrope energijom. Imamo zadovoljstvo da naglasimo ulogu koju su igrali francuski inženjeri, sarađujući u jednoj međunarodnoj ekipi, u primeni jednog pronalaska Žorža Kloda, inicijatora čitave industrije prevođenja gasova u tečno stanje.

Nalazište gasa kod Hasi-R'Mela u alžirskom delu Sahare, koje su pre desetak godina otkrili francuska petrolejska kompanija i Nacionalno društvo za istraživanje nafte u Alžiru, skriva rezerve reda veličine 1 000 milijardi kubnih metara. Ovaj izvor je povezan sa obalom gasovodom prečnika 600 mm i nekih 700 km dužine, dolazeći do Arzeva kod Orana, dok jedan krak prečnika 400 mm vodi do Alžira. Transportni kapacitet ovog sistema je reda veličine 4 milijarde kubnih metara godišnje, što višestruko premašuje lokalnu potrošnju. Stoga su vlasnici nalazišta, uglavnom francuska i alžirska vlada, odlučili da se udruže sa raznim privatnim grupama da bi u Arzevu sagradili prvu u svetu fabriku za prevođenje prirodnog gasa u tečno stanje, radi transportovanja proizvoda specijalizovanim brodovima u Francusku i Englesku.

Fabrika u Arzevu (*sl.* 16) koristi tri stepena sukcesivnog hlađenja, pri čemu se ovo ostvaruje širenjem sve lakših ugljovodonika. Prvi stepen se postiže toplotnom razmenom sa propanom, koji ključa na —37°C i koji se pomoću turbokompresora sabija, prevodi u tečno stanje i zatim ponovo na isti način tretira u zatvorenom ciklusu. Tako ohlađen prirodni gas najpre izdvaja vodu, zatim teške ugljovodonike koje sadrži i koji se izdvajaju u obliku kondenzata. U toku drugog stepena hlađenja, koji je u principu sličan prvom, ali koristi etilen kao hladeći agens, i zatim u trećem stepenu koji koristi jedan deo samog metana, gas se ohladi najpre na —100°C, a zatim na —151°C uz slabu kompresiju; proizvod se najzad isparava u poslednjoj koloni izlazeći iz ove ohlađen na —161°C.

Proizvodni kapacitet tečnog prirodnog gasa u Arzevu iznosi 1,5 milijardi kubnih metara godišnje, od čega su dve trećine namenjene britanskom tržištu, a jedna trećina francuskom. Uskladištenje proizvoda, koje je potrebno radi kompenzovanja nepravilnosti u kretanju brodova, vrši se u rezervoarima koji se hlade na specijalan način da bi održavali temperaturu tečnog metana ispod njegove tačke ključanja pod atmosferskim pritiskom.

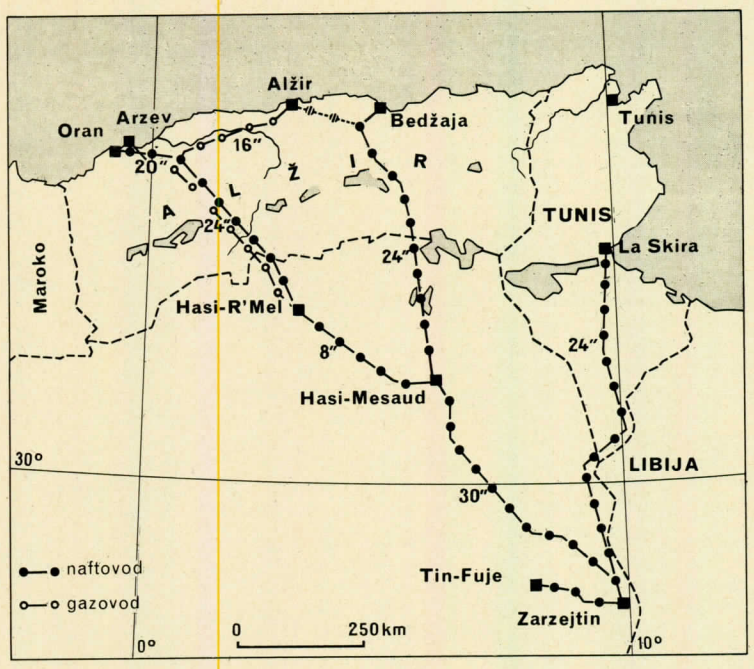
Konstruisanje jednog tipa broda sposobnog da potpuno bezbedno transportuje ovaj dragoceni, ali izvanredno nestabilni tovar koji je i isparljiv i zapaljiv, zahtevalo je dugotrajno proučavanje koje se istovremeno obavljalo sa obe strane Lamanša. Prvi francuski brod za prevoz metana, *Žil Vern* (*sl.* 17) ima koristan kapacitet od 25 000 m³ tečnosti, što je ekvivalentno 15 miliona kubnih metara gasa i liči na mali brod za transport nafte dug 200 m, tipa »sve pozadi«. Prirodni gas se transportuje u 7 čabrova koji su, kao i sve što mora da služi na niskim temperaturama, od specijalnog čelika sa 9 % nikla. Jedna vrlo dobro proučena toplotna baterija, koja sadrži više slojeva najboljih izolatorskih materijala, nalazi se oko zidova rezervoara; sav prostor između rezervoara i zidova broda nalazi se u atmosferi azota pod pritiskom, sa detektorima metana, čime se obezbeđuje stalna kontrola radi izbegavanja i najmanjeg oticaja. Potrebna temperatura proizvoda održava se u toku vožnje kontrolisanim isparavanjem male količine metana, koji se zatim odvodi u ložište i omogućuje kretanje broda pomoću parne turbine od 15 000 konjskih snaga.

Očigledno je da su potrebne znatne instalacije za prijem tečnog prirodnog gasa: što se tiče Francuske, trebalo je da se u Avru izgradi pravo pristanište za metan, sa specijalnim dokom za pristajanje sa tri rezervoara od po 12 000 m³, koji omogućuju istovar za desetak časova, i sa jednom stanicom za prevođenje u gasovito stanje koja se koristi vodom iz mora kao tečnošću za zagrevanje da bi se gas preveo u njegovo normalno stanje. Jedan gasovod sa prečnikom od 500 mm takođe je postavljen između Avra i Pariza, gde je kraj putovanja ovoga gasa koji je mirovao hiljadama godina na 2000 m dubine u centru Sahare i koji se, što izgleda paradoksalno, u periodu najmanje potrošnje vraća pod zemlju u Benu blizu Versaja, gde se nalazi prirodno podzemno skladište kompanije Gaz de France.

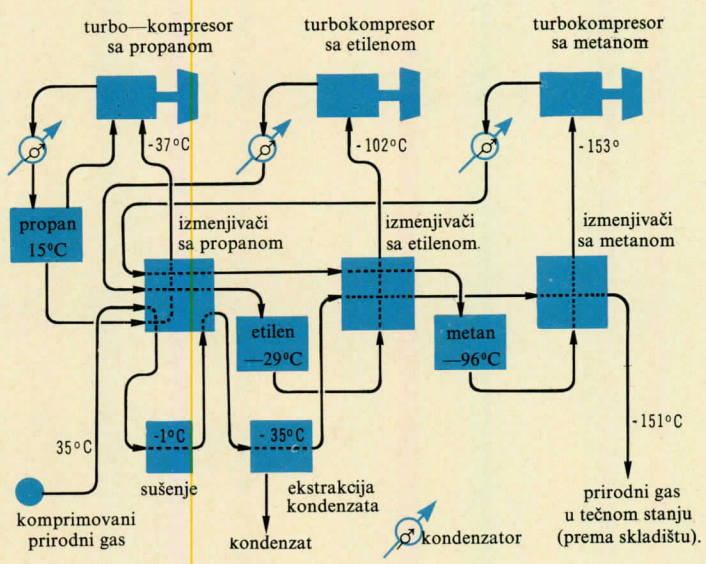
Pošto je obezbeđen uspeh ovog smelog poduhvata, sada se predviđaju nove fabrike za prevođenje gasa u tečno stanje u Libiji, gde će se uskoro utovarivati 3 milijarde kubnih metara godišnje za Italiju (Pjombino) i 1 milijarda za Španiju (Barcelona), kao i na Srednjem istoku i u Latinskoj Americi. Manja postrojenja se grade i u Sjedinjenim Državama, i to za regulisanje eksploatacije gasnih mreža, prevodeći u tečno stanje viškove u toku leta i u »praznim« časovima, da bi se oni opet isparili za vreme špiceva potrošnje.

TRETIRANJE PRIRODNOG GASA

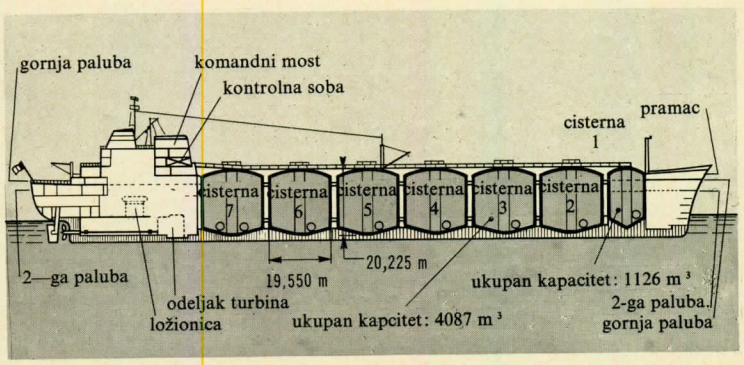
Ova operacija se sastoji u tome da se iz prirodnog gasa izdvoje nepoželjni sastojci bilo radi njegovog transporta ili radi korišćenja. To se izvodi na nalazištu u specijalnim pogonima koji predstavljaju rafinerije naročitog tipa, pošto rade sa gasovitim materijama umesto sa sirovom naftom, ali koji izdvajaju niz konačnih proizvoda. Pošto se ovakvi pogoni nalaze često u vrlo negostoljubivim oblastima, potreba za ograničavanjem osoblja još je imperativnija nego na drugim mestima, pa ih stoga karakteriše tendencija ka automatizaciji koja ide do potpuno telekomandovanih instalacija i bez stalnog osoblja. »Nečistoće« koje treba odstraniti su, uglavnom, ugljovodonici teži od metana, tj. etan, propan, butan itd., zatim vodonik-sulfid, ugljen-dioksid, voda, azot i ponekad



Karta afričkih naftovoda i gasovoda.



Sl. 16. — Prevođenje prirodnog gasa u tečno stanje (fabrika u Arzevu, Alžir).



Sl. 17. — Brod za prevoz metana »Žil Vern«.

retki gasovi, kao helijum. Svi ovi sastojci su prisutni u količinama koje variraju od izvora do izvora, pa će se, dakle, i tretiranje razlikovati od mesta do mesta, kao što pokazuju sledeći primeri.

U Sjedinjenim Državama, kolevci industrije, danas postoji oko hiljadu fabrika svih veličina koje sve zajedno prerađuju količinu od oko 600 milijardi kubnih metara godišnje; da bi se stekla jasnija slika, reći ćemo da bi ovaj kapacitet bio dovoljan da iscrpe najveće izvore na svetu, kao što su oni u Groningenu ili u Hasi-R'Melu, za manje od dve godine; ove fabrike godišnje izdvajaju 45 miliona tona sporednih proizvoda, koji se takođe prodaju (propan, butan, gazolin i gasno ulje), što je količina koja odgovara ukupnoj potrošnji petrolejskih proizvoda jedne zemlje kao što je Francuska. Većina ovih instalacija, kao što su, uostalom, one za gas iz Sahare, sastoji se od uređaja za jednostavno izdvajanje gazolina apsorpcijom (*sl.* 18): gas prolazi odozdo naviše kroz jednu kolonu, gde se podvrgava najpre sušenju pomoću glikola, proizvoda koji jako apsorbuje vodu i koji se regeneriše običnom vakuumskom destilacijom, zatim apsorpciji pod pritiskom u kontaktu sa tzv. »siromašnim uljem«, koje kroz kolonu prolazi u suprotnom smeru i zadržava ugljovodonike teže od metana, postajući »bogato ulje«, tj. koje sadrži apsorbovane proizvode. Ovi se oslobađaju snižavanjem pritiska, a zatim prolaze kroz seriju od četiri kolone za frakcionisanje: *demetanizator*, koji eliminiše tragove metana; *rektifikacionu kolonu*, koja ulju vraća njegov siromašni karakter, tj. sposobnost apsorpcije; *depropanizator* i *debutanizator*, koji proizvode propan, butan i benzin sa komercijalnim karakteristikama.

Sasvim je drukčiji problem koji se postavlja pred eksploatatore evropskih izvora u Laku i Groningenu. Napomenimo ovde činjenicu koja se dosta retko sreće, naime, da su u Laku, selu u podnožju Pirineja na 25 km od Poa, učinjena dva otkrića: najpre je 1949. na 650 m dubine u krečnjaku iz perioda krede sonda našla izvor vrlo teške nafte, doduše, mali, ali prvi koji je komercijalno eksploatisan u Francuskoj. Zatim je 1951. kada se bušenjem stiglo do slojeva gornje jure na 3 550 m, došlo do snažne erupcije korozivnog i toksičnog gasa, koja je savladana uz velike teškoće tek posle višenedeljnih napora. Ovaj gas sadrži, u stvari, 15% vodonik-sulfida i 10% ugljen-dioksida, koji, u prisustvu vlage takođe sadržane u gasu, dovode do korozije koja može da prouzrokuje lomljenje običnog čelika za nekoliko časova. Bila su potrebna dugotrajna istraživanja metalurga da bi se došlo do specijalnog čelika, tako da je nalazište moglo da počne da se eksploatiše tek 1957. Prečišćavanje ovog gasa (*sl.* 19) iziskivalo je gradnju jednog veoma složenog pogona za tretiranje, koji zauzima čitavih 200 hektara. Pošto je na dnu izvora gas pod pritiskom od 670 bara, što je jedan od najviših poznatih pritisaka, on izlazi na površinu pod pritiskom od 400 ili 500 bara i mora se najpre raširiti do pritiska reda veličine 100 bara.

Odstranjivanje sumpora izvodi se ispiranjem rastvorom amina, slabih organskih baza, među kojima se najviše upotrebljava dietanolamin: ovaj sa vodonik-sulfidom H_2S i ugljen-dioksidom CO_2 formira nestabilne soli koje je dovoljno zagrejati do oko 130°C u koloni za regeneraciju da bi se oslobodili ovi kiseli gasovi i ponovo dobio predašnji rastvor koji se opet koristi u koloni za ispiranje.

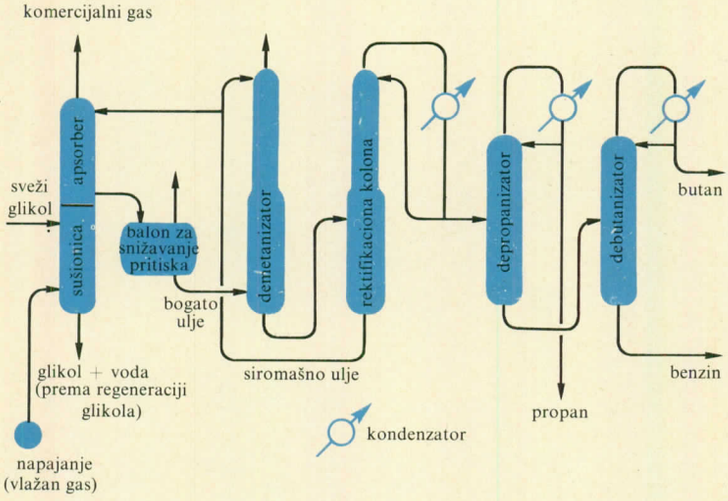
Odstranjivanje gazolina izvodi se ili apsorpcijom ili hlađenjem. U prvom tipu pogona gas dolazi u dodir sa jednim lakim uljem koje apsorbuje ugljovodonike teže od metana i etana; jedna serija kolona za frakcionisanje zatim odvaja propan, butan i gazolin. Kod drugog postupka gas se hladi do —80°C pod pritiskom od 45 bara, što ima za posledicu prevođenje u tečno stanje svih ugljovodonika težih od metana; zatim se pomoću kaskadne frakcione destilacije svaki od ovih posebno sakuplja; ovaj metod omogućuje bolje izdvajanje propana.

Pošto se ne sme dozvoliti da vodonik-sulfid dospe u atmosferu čak ni posle sagorevanja, pri čemu nastaje sumporasti anhidrid SO_2, izgrađen je jedan pogon za sumpor zasnovan na reakcijama kontrolisane oksidacije vodonik sulfida H_2S

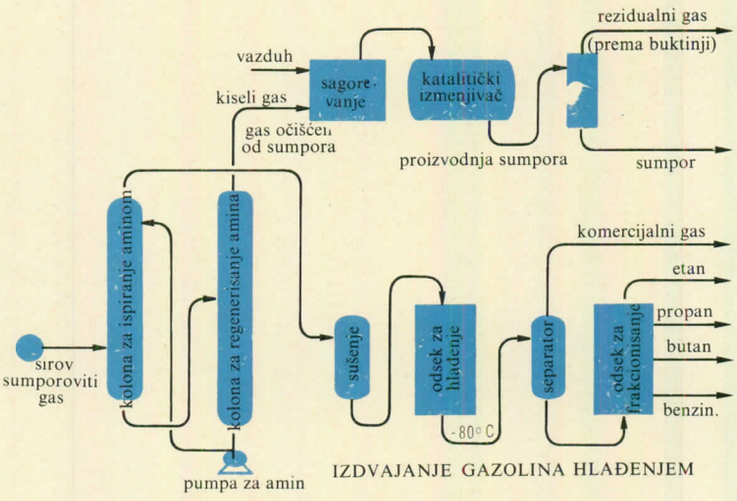
$$H_2S+\frac{3}{2}O_2\rightarrow SO_2+H_2O$$
$$2\,H_2S+SO_2\rightarrow 3S+2\,H_2O.$$

Sumpor koji se dobija u gasovitom stanju, kondenzuje se, sipa u rupe za očvršćavanje, drobi, transportuje u Bajon železnicom i ukrcava u brodove koji ga odvoze u sve krajeve Evrope. Lak je najveća fabrika sumpora na svetu, sa proizvodnjom od 4 000 tona dnevno.

Što se tiče gasa iz Groningena (izvor kod Slohterena), iako ovaj zadaje manje teškoća od gasa iz Laka, ipak njegovo tretiranje nije manje zbog njegovog sadržaja vode; pošto je ovaj sadržaj oko 0,05 g/m³, on je dovoljan za formiranje hidrata koji mogu da poremete eksploataciju gasovoda. Sušenje gasa vrši se ubrizgavanjem glikola, proizvoda koji se koristi protiv zamrzavanja, koji apsorbuje vodu i može zatim u regeneratorima da se ponovo dobije, regeneriše i opet koristi. Osobenost gasa iz Groningena je u tome što sadrži 14 molekulskih procenata azota; prisustvo ovog inertnog gasa, koji se ne može izdvojiti, ima za posledicu snižavanje kalorične vrednosti gasa, koja iznosi 8 000 kcal/m³, umesto uobičajenih 9 500 do 10 000.



Sl. 18. — Izdvajanje gazolina apsorpcijom.



Sl. 19. — Prečišćavanje gasa iz Laka.

Petrohemija

OPŠTI POJMOVI. Proučavanje ovog termina i njegovog brata blizanca »petroleohemije« moglo bi dati temu za disertaciju iz semantike. Naime, nije moguće da se na precizan način definiše ova sve važnija grana industrije nafte, čija je svrha da proizvodi ne više tečna i druga goriva, već hemijske proizvode čija je svrha da proizvodi ne više tečna i druga goriva, već hemijske proizvode ili baze koje se koriste kao polazni materijali u hemijskoj industriji. Složenost i značaj ove hemije izvedene iz nafte imaju za posledicu brzinu razvoja koja je nesumnjivo najveća među krupnim industrijama. Sledeće cifre, koje se odnose na Sjedinjene Države, dobro ilustruju ovaj porast značaja nafte kao snabdevača hemijske industrije (*v. tabelu, desno*).

Hemijska proizvodnja Sjedinjenih Država (u milionima tona)	Godina	Ukupna proizvodnja	Proizvodnja petrolejskog porekla
	1950.	50	7,3
	1955.	61	14,6
	1960.	84	25,2
	1964.	120	36,0

Učešće nafte u hemijskoj proizvodnji je, dakle, poraslo za petnaest godina od 15 na 30 težinskih procenata; međutim, kako su derivati nafte najviše prera-

divani proizvodi, pa i najskuplji, oni danas predstavljaju po vrednosti oko 60% hemijske industrije. Procenjuje se da se 5% proizvodnje nafte i prirodnog gasa severnoameričkog kontinenta danas transformiše u hemijske proizvode. Ovaj porast, koji je, uostalom, bar isto toliko brz u Evropi kao i u Sjedinjenim Državama, lako se objašnjava jer sinteza brojnih organskih proizvoda dovodi do cene koštanja koja je mnogo niža nego pri njihovoj tradicionalnoj proizvodnji koja polazi od nekog životinjskog ili biljnog materijala. Tako se običan etil-alkohol ili etanol već dugo ne bi dobijao destilacijom biljnih alkohola (repa, vino itd.) da razlozi na nivou nacije nisu naveli vlade mnogih zemalja da zaštite svoju poljoprivredu.

Ako se tome doda da se petrohemija upravo spojila, kao što smo videli na primeru prirodnog gasa, sa proizvodnjom sumpora, koji predstavlja polazni materijal za najvažniju klasičnu hemijsku industriju — proizvodnju sumporne kiseline, i da se proizvodnja aromatičnih ugljovodonika (benzol, toluol, ksilol), koji su nekada bili isključivo sporedni proizvod koksara, razvija u rafinerijama nafte izvanredno brzim tempom, da ne samo što hemijska industrija koristi sve više baze dobijene iz nafte već i industrija kamenog uglja koristi primer rafinerija i stvara »karbohemiju« ekvivalentnu petrohemiji, povezujući se sa industrijama gasa i nafte radi izgradnje zajedničkih fabrika, onda se vidi nemogućnost da se tačno definiše gde počinje i gde se završava petrohemija.

UDRUŽIVANJE NAFTE S HEMIJOM

Ova dva giganta modernog sveta na industrijskom planu ostaju još sasvim nezavisni: oni nemaju težnju da se ujedine u jednu superindustriju, već da konkurišu jedan drugom, bar u Sjedinjenim Državama. Da bismo ocenili njihovu snagu, podsetimo se da je u 1964. proizvodnja industrije nafte izražena dvostruko većom cifrom nego proizvodnja hemijske industrije, dok je industrija automobila bila tek na trećem mestu.

Od osnivanja petrohemije, nešto posle drugog svetskog rata, stvorena su mnoga udruženja u koja je nafta unela svoju tehniku rafinacije, koja je bila modernija u oblasti postupaka i automatskog obrađivanja proizvoda, a hemija dublje poznavanje potreba tržišta i trgovačkih poslova. Posle dvadesetak godina i jedni i drugi imali su koristi od zajedničkog iskustva, pri čemu su se naftaši ne samo upoznali sa proizvodnjom i prodajom hemijskih proizvoda, već i sa proizvedenim predmetom: stoga su najkrupnija petrolejska društva odvojila trećinu svog istraživačkog budžeta za petrohemiju, iako prodaja hemijskih proizvoda u užem smislu ne iznosi više od 5% njihovih poslova; s druge strane, sve veći broj hemijskih fabrika i proizvodnje predmeta od plastičnih materija prelazi pod kontrolu petrolejskih kompanija.

Obrnuto, izvesne grupe hemijske industrije imaju svoje rafinerije u kojima tretiraju sirove nafte koje najbolje odgovaraju njihovim potrebama, umesto da kupuju baze od rafinerija. Na taj način se moglo predviđati da u daljoj evoluciji više neće biti bitnih razlika između ove dve industrije: industrija nafte, koja želi da obezbedi plasman proizvoda svojih rafinerija, teži da sama preduzme njihovo pretvaranje u hemijski proizvod ili proizvedeni predmet; hemičari, sa svoje strane, žele da obezbede snabdevanje svojih fabrika, bojeći se da njihove izvore snabdevanja prioritetno ne koristi snabdevač koji sve više dobija oblik konkurenta.

Ova evolucija je približno ista u svim zemljama: ona se u Sjedinjenim Državama vrši pod dejstvom slobodne igre totalne konkurencije, u sovjetskoj ekonomici planiranjem, a u drugim zemljama posrednim dejstvom ekonomskih zakona koji su delimično dirigovani.

Hemijska proizvodnja, koja stvarno čini integralni deo industrije nafte, pre svega zato što se vrši u rafinerijama nafte i u bliskoj vezi sa tretiranjem drugih ugljovodonika, jeste proizvodnja etilena i propilena, koja se vrši krekovanjem uz pomoć vodene pare, zatim aromatičnih ugljovodonika i amonijaka.

Za razliku od toga, proizvodnja sintetičke gume, deterdženata, plastičnih masa, veštačkih vlakana, đubriva i insekticida, iako je takođe izvedena od petrolejskih materija, potpuno je odvojena od rafinacije i mora se razmatrati kao moderna evolucija odgovarajućih tradicionalnih industrija, koje su nedavno koristile neorganske, biljne ili životinjske sirovine.

KREKOVANJE VODENOM PAROM

Tokom godina vršena su značajna istraživanja radi uvođenja i usavršavanja ekonomične proizvodnje acetilena, polazeći od gasova ili benzina u rafinerijama nafte; ipak, bazični postupak petrohemije ostaje, i izgleda da mora da ostane, termičko krekovanje ovih istih osnovnih proizvoda, gasovitih ili tečnih, radi dobijanja *olefina* ili ugljovodonika sa dvostrukom vezom, pre svega etilena C_2H_4, koji treba pisati $H_2C=CH_2$ i propilena C_3H_6, koji treba pisati $H_3C-\underset{H}{C}=CH_2$.

Proizvodnja etilena i propilena se industrijski ostvaruje u jednom krupnom pogonu rafinacije (*sl.* 20), koji se naziva *steam cracking*, tj. krekovanje sa vodenom parom. Piroliza, koja je, u stvari, razlaganje samo pod uticajem temperature, bez pomoći katalizatora, ovde se postiže vrlo kratkotrajnim zagrevanjem smeše ugljovodonika i pregrejane pare na 700° ili 800°C. Da bi se postigao ovaj cilj, koriste se specijalno konstruisane peći da bi izdržale ovako visoke temperature, koje sadrže cevi od nerđajućeg čelika. Uloga vodene pare sastoji se u tome da snizi parcijalni pritisak ugljovodonika, dakle, da ih razblaži, čime se izbegava formiranje koksa unutar cevi peći. Postupak je prilično slabo selektivan, što je, možda, samo zbog složenog hemijskog sastava tretiranih benzina, i rezultat pirolize je smeša mnogih proizvoda koje treba razdvojiti; npr., na izlazu iz peći mogu se naći sledeći proizvodi:

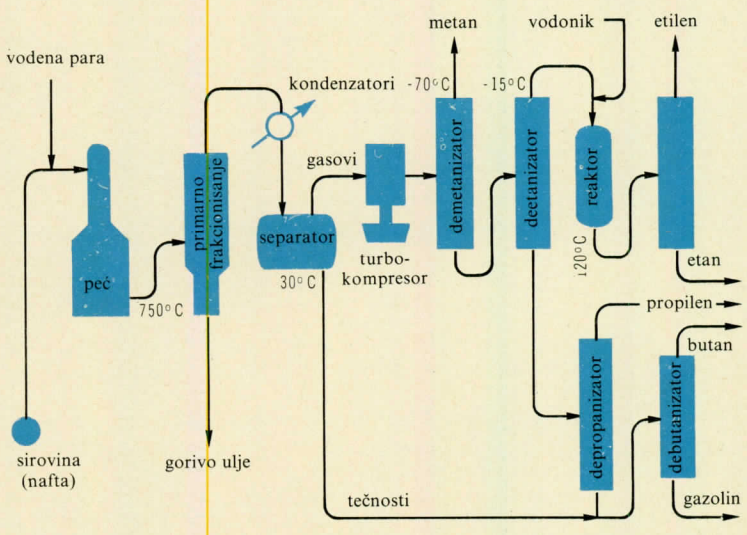
Formula	*Proizvod*	*Težinski procenti*	*Tačka ključanja* °C
H_2	Vodonik	5	— 160
CH_4	Metan	10	— 104
C_2H_4	Etilen	17	— 89
C_2H_6	Etan	7	— 84
C_2H_2	Acetilen	0,5	— 48
C_3H_6	Propilen	18	— 6,5
C_4H_8	Butilen	4	— 6,6
C_4H_8	Izobutilen	4	— 4,7
C_4H_6	Butadijen	2	— 0,5
C_4H_{10}	Butan	1	
	Benzin	27	
	Gorivo ulje	1,5	
	Razno	3	

Posle brzog hlađenja da bi se izbegla polimerizacija, vrši se razdvajanje proizvoda, pri čemu se koristi razlika u njihovim tačkama ključanja: serija kolona za frakcionisanje omogućuje da se bez mnogo teškoća dobiju i izoluju etilen i propilen. Da bi se ostvarilo njihovo prevođenje u tečno stanje, potreban je neki fluid za hlađenje, a to je upravo sâm etilen (ili propilen) koji se ispari, ponovo sabije i pusti da cirkuliše kroz kondenzatore. Izvesni proizvodi, naročito acetilenski ugljovodonici, predstavljaju veoma nepoželjne primese pri kasnijem korišćenju etilena, pa se radi njihovog odstranjivanja mora predvideti jedna specijalna instalacija za katalitičko hidrogenizovanje.

Za razliku od prethodnih, grupa od četiri ugljovodonika sa po četiri C-atoma (butilen, izobutilen, butadijen i butan) ima izvanredno bliske destilacione karakteristike, pa se kondenzuje u jedno| istoj frakciji. Ona, međutim, sadrži dva veoma interesantna proizvoda: *izobutilen*, olefin sa samo jednom dvostrukom vezom, koji treba pisati $H_3C-\underset{CH_3}{C}=CH_2$ i *butadijen*, diolefin sa dve dvostruke veze koji se piše $H_2C=\underset{H}{C}-\underset{H}{C}=CH_2$. Kao opšte pravilo postoji, dakle, interes da se oni razdvoje, što zahteva ekstrakciju nekim rastvaračem kao što je kupro-amonacetat, koji zadržava butadijen, i sumporna kiselina koja ga vezuje.

Benzin proizveden krekovanjem sa vodenom parom takođe je koristan sporedni proizvod, jer sadrži visok procenat aromatičnih ugljovodonika koji se mogu ekstrahovati i koji mu, u svakoj slučaju, daju visok oktanski broj i od njega čine odličan sastojak za unošenje u superbenzin. Na žalost, on takođe sadrži više diolefine koji su nestabilni, imaju miris i stvaraju gumaste naslage u motorima automobila. Stoga je potrebno da se ovaj benzin preradi, što se bez teškoća čini katalitičkim krekovanjem.

Najzad, ostatak je gorivo-ulje bez naročitog značaja.



Sl. 20. — Uprošćena shema »krekovanja sa vodenom parom«.

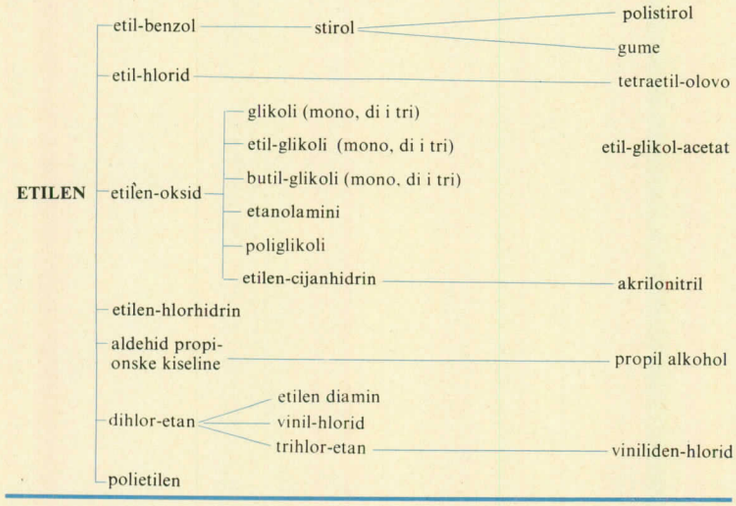
ETILEN

Od svega što se proizvodi krekovanjem sa vodenom parom, etilen je osnovni proizvod. Postoji običaj da se veličina ovih pogona određuje po njihovom godišnjem kapacitetu proizvodnje etilena, što dosta tačno prikazuje petrohemijski kapacitet fabrike, kompanije ili zemlje.

Proizvodnja etilena u milionima tona godišnje (1966-1967)

SAD	5,70
Japan	1,40
Zapadna Nemačka	0,95
Velika Britanija	0,85
Francuska	0,75
Beneluks	0,50
Italija	0,30
Kanada	0,25
Razno	0,30
UKUPNO	11,00

HEMIJA ETILENA



Sjedinjene Države poseduju više od polovine svetske proizvodnje etilena. Njihova proizvodnja je pretežno zasnovana na gazolinima koji potiču iz prirodnog gasa, a proizvodni troškovi ne prelaze 80 dolara po toni. Nasuprot tome, u Evropi su potrebe za tečnim gorivom manje, te postoje viškovi direktno dobijenog benzina, koji se dalje krekuju sa vodenom parom. Samo najkrupnije instalacije postižu tako nisku cenu koštanja kao u Sjedinjenim Državama.

U Francuskoj bi trebalo da instalisani kapacitet do 1970. dostigne cifru reda veličine 1 000 000 tona godišnje, uključujući i jednu instalaciju za krekovanje blizu Liona sa kapacitetom 280 000 tona godišnje, koja je najveća na svetu. Jedan pogon ove veličine prevazilazi mogućnosti snabdevanja jedne rafinerije, kao i mogućnosti korišćenja jedne hemijske fabrike: on, stoga, prima benzine za krekovanje iz više rafinerija i gazoline koji potiču iz prirodnog gasa iz Sahare (kondenzat iz Hasi-R'Mela); iz njega se šalje etilen naftovodima do potrošača koji se nalaze na dosta velikim rastojanjima — u oblasti Grenobla ili u Juri, jer je mnogo lakše i zaista ekonomičnije transportovati proizvod u postojeće fabrike nego graditi nove u blizini rafinerije. Transport etilena se lako ostvaruje pod uslovima bliskim njegovim kritičnim veličinama: pod pritiskom između 50 i 100 bara to je fluid sa osobinama sličnim tečnosti.

Od etilena se dobija čitava serija derivata, uglavnom preko njegovih oksida $(CH_2)_2O$.

Među ovim derivatima ipak treba istaći polietilen, čija je priroda upravo petrohemijska.

POLIETILEN. Postoje, u stvari, dva dosta različita tipa ovog polimera etilena:

— polietilen niske gustine, manje tvrd i elastičniji, koji se dobija katalizom na visokom pritisku;

— polietilen visoke gustine, tvrđi i krut, koji se proizvodi pod niskim pritiskom.

Već je rečeno da se današnja američka kompanija ne može zamisliti bez elastičnog polietilena, ovog čudesnog plastičnog materijala sa mnogobrojnim primenama. Ne prođe dan a da se njemu ne otvore nove mogućnosti uvođenjem neke pametne primene u industriji ili u domaćinstvu, gde se najviše koristi kao sredstvo za ambalažu, za pakovanje i transport hrane i zemljoradničkih proizvoda: nelomljive boce za mleko, kutije od kartona i kese za tečnosti i čvrste materije, konzerve koje se otvaraju bez opasnosti, torbe protiv vlage, naročito za održavanje hleba u svežem stanju, niz proizvoda koji ovaj način čuvanja čine naročito pogodnim za prodaju u samouslugama. Da bi se dobila ideja o raznovrsnosti primene elastičnog polietilena, treba pomenuti i industrijske primene, kao što su izolatorski omotači električnih kablova, livenje najrazličitijih predmeta pod pritiskom, naročito boca za farmaceutske i prehrambene proizvode, provizorna skloništa od nepogode koja se koristi na gradilištima javnih objekata ili kao staklene bašte za ubrzano sazrevanje biljaka. Tržišta su tolika da su svetske potrebe u 1971. procenjene na oko 4 miliona tona, od čega 40% u Sjedinjenim Državama; elastični polietilen biće onda na putu da svrgne sa prestola polivinil kao najrasprostranjeniji plastični materijal. On mu, uostalom, već konkuriše u mnogim industrijskim primenama.

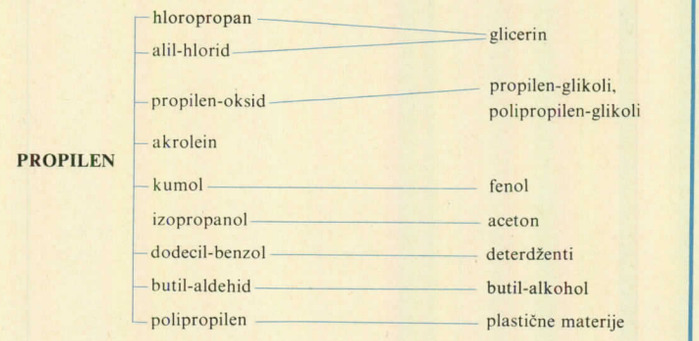
Što se tiče krutog polietilena, čija je cena koštanja viša, on je tvrđi, otporniji na lomljenje i omekšavanje, manje otporan na udar, na deformacije i pri niskim temperaturama. On je naročito pogodan za proizvodnju livenih predmeta: igračaka, predmeta za domaćinstvo, automobilskih delova, rezervoara za benzin, sudova za tečnosti, naročito kanti za ulje i boca za mleko, cevi koje služe za prolaz tečnosti, naročito u slučajevima gde bi došlo do korozije običnog čelika, cevi koje služe kao zaštita električnih kablova. Danas se samo u Sjedinjenim Državama proizvodi godišnje 1 milijarda ambalaže od krutog polietilena. Ipak, ova proizvodnja predstavlja samo trećinu od proizvodnje elastičnog polietilena.

Ova džinovska industrija polietilena izgledala bi pre samo jedne generacije, utoliko neverovatnija što kao polazni materijal koristi jedan tako izrazit gas kao što je etilen, koji je volatilan do —100°C.

PROPILEN

Hemija propilena nije bez analogije sa hemijom etilena. Broj reakcija u kojima učestvuje propilen je možda manji, ali ekonomična sinteza organskih materija kao što su glicerin i aceton stvara čitavu jednu industriju.

HEMIJA PROPILENA



Polipropilen se takođe dobija, bez velikih teškoća, katalitičkom polimerizacijom. To je čvrst materijal sličan krutom polietilenu, koji je nešto skuplji, ali je lakši i tvrđi, koji bolje izdržava visoke temperature i otporniji je prema abraziji i deformacijama. Njegov glavni nedostatak je lomljivost na niskim temperaturama, što isključuje mnoge primene. On ipak ima veoma širok spektar primene, od boca za Žavelovu vodu i za sredstva za čišćenje, do tekstila, kanapa, užadi i ostale primene vlakana koja ne trule i po otpornosti nemaju premca.

AROMATIČNI UGLJOVODONICI

Većina sirovih nafti sadrži prilično mali procenat aromatičnih ugljovodonika, u svakom slučaju suviše mali da bi bilo opravdano izdvajanje najinteresantnijih među njima, odnosno u nizu opadajuće volatilnosti:

benzol	C_6H_6	ključa na	80°C
toluol	C_7H_8	ključa na	111°C
metaksilol	C_8H_{10}	ključa na	139°C
paraksilol	C_8H_{10}	ključa na	138°C
ortoksilol	C_8H_{10}	ključa na	145°C

Jedino je rafinerija u Abadanu, u Persijskom zalivu, pustila u pogon za vreme II svetskog rata jedno postrojenje za izdvajanje benzola sadržanog u benzinima iz persijskih nafti, što je bio opravdan postupak s obzirom na vojne potrebe u

avijacionom benzinu i na veličinu ovog pogona, koji je dugo bio najkrupniji na svetu.

Situacija se sasvim izmenila počev od 1950, kada su se pojavila dva postupka za rafinaciju, kojima je ostvarena sinteza aromatičnih ugljovodonika: katalitički reforming benzina i krekovanje sa vodenom parom. Zatim je bio uveden pogodan metod ekstrakcije jednim glikolom, selektivnim rastvaračem, koji od svih ugljovodonika zadržava samo aromatične. Otada je proizvodnja aromatičnih ugljovodonika petrolejskog porekla postala ekonomična, bar toliko koliko su potrebe tržišta prevazilazile mogućnosti proizvodnje ovih materija u koksarama, njihovim tradicionalnim izvorima. Ova proizvodnja ipak i dalje ostaje vrlo skupa i osnovno je imati osigurano tržište da bi se isplatilo investiranje.

U postupku koji koristi reforming polazi se od teških benzina, koji se ne mogu koristiti kao tečna goriva; posle odstranjivanja sumpora, oni se podvrgavaju tretiranju na platinskom katalizatoru, čiji je glavni efekat u tome da ugljovodonike iz nafte transformiše u aromatične ugljovodonike (RAFINACIJA). Ekstrakcija ovih poslednjih glikolom ili nekim drugim rastvaračem daje smešu koju je dovoljno zatim frakcionisati destilacijom, da bi se dobila čitava serija frakcija, i to u nizu od najlakših do najtežih:

— Jedan laki benzin, pogodan za upotrebu kao obično tečno gorivo;

— benzol;

— toluol;

— ugljovodonici sa C_8 (orto- i paraksiloli);

— ugljovodonici sa C_9, koji služe kao aromatični rastvarači.

U postupku koji koristi krekovanje sa vodenom parom, krekovani gazolin sadrži, posle hidrogenizovanja koje se vrši da bi se zasitili diolefini, oko 20% aromatičnih ugljovodonika, koje je lako ekstrahovati i frakcionisati kao u prethodnom slučaju.

Upotreba aromatičnih ugljovodonika je veoma raznovrsna. Najtraženiji je *benzol*, jer služi kao intermedijarni proizvod u krupnim industrijama, i to, po redu, proizvodnji sintetičke gume koja koristi stirol, industiji fenola, proizvodnji deterdženata koja koristi dodecil-benzol i, najzad, industriji sintetičkih vlakana (najlon). U poređenju sa benzolom, toluol se mnogo manje traži, jer je njegova potrošnja kao eksploziva (trinitrotoluol) neznatna za vreme mira. Stoga preostaje znatan višak koji se koristi za proizvodnju tečnih goriva sa visokim oktanskim brojem; međutim, ovo tržište naglo opada zbog smanjivanja broja aviona sa klipnim motorima. Posle dugih istraživanja, danas se raspolaže jednim postupkom za transformisanje toluola u benzol oduzimanjem radikala CH_2 (dezalkilovanje hidrogenizovanjem).

Ksiloli čine grupu ugljovodonika sa sličnim osobinama, a najinteresantniji među njima je *paraksilol*, koji služi kao polazni materijal za jedno od najznačajnijih sintetičkih vlakana, *tergal*.

Ortoksilol, sa svoje strane, ima mnogobrojne primene u raznim oblastima, kao što su industrija plastičnih materija, insekticida, sintetičkih smola, boja, rastvarača itd.

Potrebe Sjedinjenih Država u aromatičnim ugljovodonicima sa C_6, C_7, C_8 mogu se proceniti na oko 3 miliona tona, od čega gotovo dve trećine otpadaju na benzol. Potrebe ostalog dela zapadnog sveta su istog reda veličine i takođe rastu ubrzanim ritmom. Normalno je, dakle, što se sve više savremeno opremaju velike rafinerije za izolovanje ovih petrolejskih ugljovodonika, koji su suviše dragoceni da bi i dalje bili sagorevani kao tečna goriva.

AMONIJAK

Sinteza amonijaka datira od 1913; ona je bila industrijski ostvarena u Nemačkoj za vreme I svetskog rata, i to radi zamene dotle uvoženih nitrata. Danas se gotovo čitava količina amonijaka proizvodi sintezom, polazeći od vodonika iz nafte i atmosferskog azota, u pogonima koji čine integralni deo rafinerija ili fabrika za tretiranje prirodnog gasa.

Proizvodnja vodonika polazeći od metana vrši se reformingom sa vodenom parom u prisustvu katalizatora na bazi nikla, pri temperaturi od 1 100°C i pod pritiskom od 25 bara. Tako se dobija smeša vodonika, ugljen-dioksida CO_2 i neizreagovanog metana, sa malo ugljen-monoksida CO. Ugljen-dioksid se lako odstranjuje apsorpcijom u jednom rastvaraču (monoetanolamin). Zatim se odstranjuje ugljen-monoksid, koristeći, npr, reakciju katalitičkog dobijanja metana, inverznu onoj kojom ugljen-monoksid nastaje:

$$CO + 3\,H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$$

Azot se uzima iz vazduha, ili direktno ili posle njegovog prevođenja u tečno stanje hlađenjem, pošto je tečan kiseonik veoma koristan proizvod naročito tražen u crnoj metalurgiji. Sinteza $3\,H_2 + N_2 \rightarrow 2\,NH_3$ vrši se zatim sa gvožđem kao katalizatorom, koji je pronašao Haber još pre više od pedeset godina.

Ove instalacije se ponekad dopunjavaju pogonom za sintezu karbamida $(NH_2)_2CO$, reakcijom amonijaka sa CO_2. Razdvajaju se dva kvaliteta karbamida, od kojih je jedan namenjen proizvodnji đubriva, a drugi proizvodnji plastičnih materija

Računari

OPŠTI POJMOVI. Slično prostornoj i nuklearnoj industriji, i za industriju nafte karakteristična je sve opštija primena automatizacije, naročito u njenom najnovijem i za neupućene najtajanstvenijem vidu, naime, u obliku numeričkih računara koji se često nazivaju »kompjuteri«.

Upotreba ovih mašina u svim stadijumima otkrivanja, eksploatacije i rafinacije ugljovodonika može da ilustruje sve veći značaj uloge koju one igraju u modernom svetu; one su ipak samo mašine, tj. oruđa koja je napravio čovek, koja su neuporedivo bolja od njega u brzom i preciznom obavljanju datog posla, ali nesposobna za bilo kakvu inicijativu ili akciju koju čovek prethodno nije želeo i predvideo.

Podjednako je smešno nazivati ove mašine elektronskim »mozgovima«, kao i, recimo, mikroskop ili teleskop za koje bi se mogao naći izgovor da vide bolje od ljudskog oka. Ovaj naziv bi se mogao dati od milja ili od šale i to da bi se njime koristili inženjeri, ali nije trebalo da bude pušten u javnost, gde stvara osećanje nemira i kod običnih ljudi i kod filozofa, koji u njemu vide predviđanje budućeg sveta u kome će mašina ovladati čovekom.

Međutim, tačno je da složenost jedne industrije ili, pre, jedne grupe integrisanih industrija, kao što su petrolejske, postaje takva da pamćenje i brzina računanja ljudskog uma, čak i onog prema kome je priroda bila posebno blagonaklona, nisu dovoljni da bi se brzo ispitao čak i jedan mali deo kombinacija svih okolnosti i podataka u vezi sa problemima koje treba rešiti. Uvođenje numeričkih računara snabdevenih »pamćenjem«, tj. jednim sistemom registrovanja podataka, koji je u principu sličan snimanju neke emisije sa radija ili televizije na magnetnoj traci, i sposobnih da fantastičnom brzinom izvode četiri osnovne računske radnje, dolazi upravo da pomogne čoveku u njegovom poslu.

Ova pomoć se koristi u dve oblasti koje se dosta jasno međusobno razlikuju, naime, u tehničkom rukovođenju i upravljanju preduzećem.

• *Tehnički računar* vrši određeni precizni posao kakav je dosada bio poveravan inženjeru ili računovođi, ali ga izvodi brže i sa manje mogućih grešaka. Ovaj prvi aspekt je samo nastavljanje napora ka automatizaciji uz pomoć aparata koji su u početku bili rudimentarni, ali su sve više usavršavani.

• *Računar za upravljanje* proučava, obično uz pomoć sistema prostih ali mnogobrojnih jednačina, način buduće najekonomičnije eksploatacije neke grupe fabrika, brodske flote ili, u krajnjem stadijumu, čitavog jednog preduzeća; reč je o metodu pomoći pri odlučivanju koji je nazvan »operativno istraživanje«.

TEHNIČKI RAČUNARI

Praktično ne postoji grana petrolejske industrije u kojoj se ne bi mogla koristiti ova čudesna oruđa — računari. Kao što su u prošlom veku para, a zatim elektricitet sve više zamenjivali ljudsku ili životinjsku snagu, danas smo svedoci sve veće zamene ljudskog pamjenja, toliko nepreciznog i sklonog greškama, elektronskim pamćenjem, koje je, kad god je to moguće, snabdeveno automatskim uključivanjem: račune su ranije izvodili inženjeri sa olovkom u ruci, ali su oni naučili mašinu da računa mnogo brže.

• *U proizvodnji nafte*, računari se koriste za automatsku eksploataciju nalazišta. Uzmimo za primer izvesno petrolejsko polje u oblasti Stenovitih planina u Sjedinjenim Državama, zemlji u kojoj zakon daje vlasniku zemljišta i pravo svojine nad naftom, što dovodi do naročito komplikovanih ugovora o eksploataciji; pretpostavimo da ima 250 bušotina koje snabdevaju zajedničku mrežu za sakupljanje koja pokriva teritoriju širine 250 km: sigurno je da koordinacija i dobro funkcionisanje jedne takve zajednice zahteva mnogo osoblja. Međutim, uz pomoć jednog računara sa pamćenjem, moguće je da se svaka bušotina ispita svakih 5 minuta, da se registruje njen protok i proveri da li su uslovi rada u njoj normalni, da se reguliše protok daljinskim komandovanjem otvaranja proizvodnog ventila, da se tečnost koja ističe usmeri prema specijalnom rezervoaru ukoliko kvalitet sirovine ne zadovoljava, da se proveri sistem brojanja i da se knjiži proizvodnja prema količini i vrednosti, da se kontroliše rad instalacija na dnu bušotina, kao što je ubrizgavanje hemijskih proizvoda, da se bušotine, puste u pogon, proveri i registruje njihov protok, a da se zatim po želji zaustave.

• U *rafinaciji nafte* takođe je moguće automatsko upravljanje pogonima za tretiranje, ali se ono zbog troškova — koliko za investicije toliko i za visokokvalifikovano naučno osoblje — opravdava samo u najkrupnijim instalacijama ili onim kojima se najteže upravlja. Princip je i ovde naizmenično registrovanje, svaka 2 ili 3 minuta, svih karakteristika značajnih za rad; tako će se u pogonu destilacije registrovati temperatura sirove nafte posle razmene toplote i zagrevanja u pećima, protoci svih frakcionisanih proizvoda, nivoi i pritisci u aparaturama, kvalitet glavnih proizvoda (gustina, sadržaj sumpora, viskoznost ili tačka omekšavanja, sadržaj pojedinih destilacionih proizvoda). Kada radni uslovi variraju zbog toga što se hemijski sastav sirove nafte razlikuje od prosečnog,

ili prosto zato što je posle kiše ili vetra zasijalo sunce, utičući na gubitke toplote sa spoljašnje strane pogona, a tim pre ako se namerno menja protok ili željeni prinos nekog proizvoda, sve promenljive koje se registruju menjaju se u većem ili manjem stepenu.

Varijacije dobijene uz pomoć kontrolnih instrumenata mogu se koristiti kao elementi koji se daju računaru pogona da bi on odredio nove uslove: priticanje goriva za zagrevanje peći, protok vode za hlađenje, brzinu opadanja pritiska i tako redom. Računar može, čak, i da *izdaje naredenja*, tj. da pneumatičkim ili električnim impulsima dejstvuje na servouređaje koji regulišu odgovarajuće protoke. Dovoljno je naći matematičke jednačine koje prikazuju međusobnu zavisnost ovih veličina; ovo, međutim, može da iziskuje godine rada čitave ekipe stručnjaka.

• U oblasti *distribucije proizvoda nafte* pre kratkog vremena su uvedeni računari sa pamćenjem za kontrolu utovara u kamione-cisterne: operacije se komplikuju elementom slučaja, od koga zavisi red dolaska vozila u koja se utovaruje, kojih u jednoj rafineriji dođe po više stotina dnevno, kao i tonaža i priroda željenih proizvoda; čim se vozač kamiona javi kancelariji fabrike, o njemu počne da vodi računa elektronski računar koji mu određuje mesto parkiranja, poziva ga čim se oslobodi neko mesto za utovar željenog proizvoda, proverava da nije zaboravljeno spuštanje na zemlju, registruje utovarenu količinu, izračunava težinu ili zapreminu za fakturisanje, popunjava dokumenta potrebna za carinu, propusnicu, račun za potrošača i daje nalog za polazak kamiona.

• U oblasti *inženjerstva*, tj. proučavanja i gradnje fabrika, upotreba računara je sve češća. Oni omogućuju, pre svega, da se veoma brzo izvedu najteži računi, kao što su oni u vezi sa projektovanjem kolona za frakcionisanje i izmenjivača toplote, koji se sastoje od komplikovanih jednačina koje se rešavaju uzastopnim aproksimacijama. Nalaženje pogodnih jednačina za neke aparate zahtevalo je ranije višenedeljni rad inženjera, pa se često pribegavalo korišćenju ranijih izračunavanja, prilagođavajući ih više ili manje novim slučajevima koji se mogu pojaviti. Kada su jednom nađene jednačine koje omogućuju korišćenje računara, što, doduše, može da zahteva višemesečni rad inženjera, može se izračunati koliko god se želi specijalnih slučajeva pošto će mašina za nekoliko minuta izvršiti sve ove operacije.

• Isto tako, *snabdevanje* hiljadama različitih delova kao što su cevi, slavine, ventili, spojnice, zaptivači i zavrtnji, kakvi su potrebni za gradnju jedne rafinerije, i upravljanje odgovarajućim skladištima vrši se uz pomoć računara, koristeći se poznatom tehnikom bušenih kartica.

• U sektoru *komercijalne prodaje*, problemi koje postavlja administracija masovne klijentele, naročito u Sjedinjenim Državama, gde se tečna goriva prodaju na kredit uz pokazivanje pretplatne karte koju ima svaki vozač i gde se rezervoari gasnog ulja za instalacije centralnog grejanja stambenih zgrada stalno dopunjavaju na osnovu godišnjih ugovora, po veličini računovodstva i statistika koje se moraju voditi, odgovaraju problemima osiguravajućih društava ili banaka. Ovaj posao se sada poverava administrativnim računarima, koji centralizuju komercijalne podatke, koji se odnose, na primer, na 100 000 klijenata razasutih po obsluživanoj teritoriji. Ova obaveštenja služe ne samo za fakturisanje već i za uspostavljanje kartoteka, koje služe industrijalcima da se tačno informišu o svim karakteristikama svog tržišta.

• Najzad, u oblasti *administracije preduzeća*, sve računovodstvene operacije već jesu ili će uskoro biti poverene računarima sa pamćenjem; njihovi glavni elementi su: upravljanje osobljem, što u velikim preduzećima postaje važan problem, bilo da je reč o određivanju plate, statističkim podacima o zaposlenju i odsustvovanju sa posla, predviđanju broja zaposlenih i penzionisanih; zatim, upravljanje petrolejskim skladištima, što pretpostavlja poznavanje u svakom momentu količine sirovina i konačnih proizvoda, proveru prinosa, proučavanje grešaka; najzad, uopšte uzevši, potpuno mehanizovano računovodstvo koje odgovornima omogućuje da tačno poznaju tehničke i finansijske rezultate svog upravljanja i koje daje elemente za proučavanje rukovođenja preduzećem.

OPERATIVNO ISTRAŽIVANJE

Kada neko preduzeće postane veoma veliko, a najbolji primer predstavlja najkrupnije do sada poznato preduzeće — ratni napor jedne nacije, nikakav ljudski mozak više nije u stanju da obuhvati njegov celokupni vid, a još manje da poznaje sve njegove detalje. Stoga su se do sada morali raščlanjivati problemi i izvesnom broju sektora ostavljati gotovo potpuna autonomija u odnosu na druge sektore. U primeru klasičnog rata, ovi sektori su bile armije koje, kada se nađu u borbi, dejstvuju nezavisno jedne od drugih. Što se tiče industrije, ovi sektori su bile razne grane jedne industrije koje su bile povezane samo cenama razmenjenih proizvoda ili godišnjim bilansima uprave. Stoga se došlo na ideju da se iskoristi moćno istraživačko sredstvo kakvo je računar, da bi se pokušala izraziti jednačinom interakcija različitih mogućih strategija za rukovođenje preduzećem: tako je rođeno operativno istraživanje. Reč je o tome da se stvori *model* preduzeća, tj. uprošćena i simbolična slika, koja omogućuje eksperimentisanje politikom upravljanja, utvrđivanja cena, izbora snabdevanja i odlukama o investiranju ili o novim proizvodima, na isti način kao što istraživač u laboratoriji ispituje neki novi proizvod, novi postupak, novu ideju u probnoj industrijskoj instalaciji u smanjenom obimu, gde se simuliraju uslovi rada kakvi vladaju u stvarnom industrijskom pogonu.

U izvesnim prostim slučajevima, model preduzeća postoji u stvarnosti: to je aparat u kome se, zahvaljujući mehanici ili elektronici, direktno očitavaju kretanja koja više ili manje predstavljaju rezultat dobijen kada se variraju osnovni podaci. Ovakvi aparati se nazivaju *analognim*, jer oni neki račun predstavljaju samo analogijom, kao što logaritmar vizuelno prikazuje operacije jednog numeričkog računara. Međutim, obično, model preduzeća nije ništa drugo nego čista matematička konstrukcija, tj. skup jednačina koje prikazuju međusobnu interakciju podataka, sile kojima su podvrgnute, kao što su fizička ograničenost kapaciteta fabrika, brodova, naftovoda.

Jedna od glavnih aktivnosti operativnog istraživanja sastoji se u određivanju programa najekonomičnijeg rada postojećih instalacija, npr. jedne flote brodova ili grupe rafinerija. Do toga se dolazi uz pomoć računara rešavanjem jednog skupa od više stotina jednačina prvog stepena koje međusobno povezuju promenljive i poznate podatke o problemu, odakle potiče naziv *linearno programiranje*, koji je dat ovoj tehnici. U drugom stadijumu, koji nije manje značajan, istraživaće se najrentabilnije investicije, tj. uvešće se nove promenljive pretpostavljajući da su broj i veličina brodova ili fabrika i njihove mogućnosti povećani. Poređenje mnogobrojnih mogućih kombinacija vršiće se proučavajući promene jedne ekonomske funkcije, koja može biti, npr. ostvareni profit, tonaža proizvoda ili ukupan utrošak novca. Kada je reč o programu korišćenja jedne morske flote, glavne petrolejske kompanije treba da koordiniraju na najefikasniji mogući način kretanje desetina, ponekad i stotina brodova svih veličina i starosti. Transport koji treba obezbediti polazi od mesta utovara sirovina i od rafinerija koje se nalaze u pet delova sveta. Tankeri mogu transportovati bilo sirovine bilo konačne proizvode, ali je u izvesnim slučajevima, potrebno čišćenje rezervoara pre utovara tečnih goriva; brodovi moraju periodično odlaziti u brodogradilišta radi održavanja; izvesna pristaništa, izvesne linije, kao što je ona koja prolazi kroz Suecki kanal, ograničavaju veličinu brodova koji mogu onuda proći. Transportni troškovi variraju od broda do broda, pri čemu su najekonomičniji oni brodovi koji su najnoviji i najveći. Sva ova ograničenja moraju se uneti u sistem jednačina koji prikazuje *model* pomorske flote. Ako je, zatim, u svakom momentu poznata tonaža raznih proizvoda koji se prevoze, kao i mesta njihovog polaska i dolaska, računaru se može poveriti i određivanje ekonomske funkcije koja će prikazivati minimalne ukupne transportne troškove. Korišćenje uređaja je delikatno, jer nije retko da optimalno rešenje bude sasvim neočekivano, npr., namena izvesnih brodova za duge neuobičajene maršrute, što stvara teškoće pri rotiranju posade. U sličnim slučajevima moraju se uvesti nova ograničenja koja prikazuju razne ljudske faktore o kojima treba voditi računa.

Programi snabdevanja rafinerija izračunavaju se na isti način; u jednačinu se unosi:

— prinos benzina, gasnog ulja, gorivog ulja iz raznih mogućih sirovina;

— prinos drugih operacija rafinacije, reforminga ili krekovanja;

— uticanje na kvalitet tečnih goriva dodavanjem većih ili manjih količina tetraetil-olova, skupog aditiva koji služi za poboljšavanje oktanskog broja benzina;

— bilans operacija u odnosu na viskoznost ili sadržaj sumpora, radi obezbeđenja da ga goriva ne sadrže više nego što je propisano.

U prvo vreme računar će određivati optimalnu raspodelu sirovina na različite rafinerije, zatim će nađeno rešenje uskladiti sa programom pomorskog transporta. U daljem stadijumu evolucije operativnih istraživanja, uvodiće se jednačine koje definišu troškove rafinacije i transporta sirovine i konačnih proizvoda do zona potrošnje. Tada će biti moguće na najrentabilniji način uravnotežiti programi rada rafinerija, maksimalizacijom zarade; može se shvatiti da se jedno isto tržište gorivog ulja može da zadovolji ako se u početku snabdeva iz ove ili one rafinerije koja obrađuje ovakvu ili onakvu sirovinu. Međutim, jedan jedini veliki računar, koji rešava stotine simultanih jednačina, moći će da raspodeli, npr., tržišta šest evropskih zemalja, sa tri velike kategorije proizvoda, na šest rafinerija koje se snabdevaju sa deset sirovina iz Persijskog zaliva, Afrike ili istočnog Sredozemlja uz pomoć pedeset brodova. Tako, međutim, izgleda problem glavnih internacionalnih petrolejskih preduzeća koji treba rešiti.

Upotreba

OPŠTI POJMOVI. Upotreba petrolejskih proizvoda je vrlo široka oblast u kojoj se neprekidno i uporno vrši istraživanje radi otkrivanja novih tržišta, od kojih se neka još jedva naslućuju. Rafinerije proizvode, ili mogu da proizvode na zahtev, stotine varijanti kvaliteta, tako da neke krupne fabrike u Sjedinjenim Državama imaju blizu hiljadu proizvoda koje nude u svojim prodajnim katalozima; često se međusobno razlikuju samo u detaljima karakteristika, bilo da je reč o tečnim gorivima, drugim gorivima ili mazivima, što su tri klasične upotrebe nafte.

NAJVAŽNIJE PRIMENE PROIZVODA NAFTE
od najlakših do najtežih

Gas	grejanje i upotreba u domaćinstvu, petrohemija (etilen, amonijak, sumpor)
Propan	grejanje u industriji
Butan	grejanje i upotreba u domaćinstvu, aerosolovi, upaljači
Tečna goriva i supergoriva	transport
Specijalni benzin i beli alkohol	industrijski rastvarači, slikarstvo i proizvodnja boja
Laki benzin	petrohemija (etilen)
Teški benzin ili nafta	petrohemija (aromatični ugljovodonici)
Petrolej za osvetljavanje, ili kerozin	reaktivna goriva, osvetljenje
Gasno ulje	transport (dizel)
Domaće gorivo ulje	kolektivno i individualno grejanje, nepokretni dizel-motori
Lako ulje	grejanje u industriji, brodski dizel-motori
Teško ulje ili mazut	termocentrale, crna metalurgija, fabrike stakla i cementa, grejanje u industriji
Maziva	podmazivanje, mašine, motori, transformatori
Parafini	pakovanje, sveće
Bitumeni	pokrivanje puteva, krovovi

TRANSPORT

Automobilska industrija, avijacija, železnice, rečni i morski brodovi, kosmičke rakete, sva transportna sredstva gotovo bez izuzetka imaju kao zajednički imenitelj tečno gorivo potrebno za kretanje. Do danas se ovo tečno gorivo moglo ekonomično dobiti samo iz nafte, koja se, u ovom ili onom obliku, može smatrati kao pokretačka snaga gotovo celokupnog transporta.

• *Motor sa unutrašnjim sagorevanjem* sa paljenjem pomoću svećica sigurno je izvanredno tehničko otkriće, ako se uzme u obzir da praktično nije evoluirao od njegovog uvođenja pri kraju prošlog veka. Doveden je do takvog savršenstva, u odnosu na cenu i težinu po jedinici snage, da se praktično odustalo od njegovog poboljšavanja, tako da su istraživanja orijentisana na radikalno različite principe, kao što su gasna turbina ili gorivi elemenat. Naime, poboljšanje rada eksplozivnog motora je prosto ograničeno kvalitetom tečnog goriva: bilo bi lako da se njegova snaga podigne povećavanjem kompresionog odnosa preko 10 prema 1, što se danas smatra za gornju granicu, kada ne bi postojao problem detonacije, ta pojava samopaljenja, do koje dolazi kod nedovoljno »antidetonatorskih« tečnih goriva. Od 1932. vrednost benzina se meri pomoću empirijske skale zasnovane na dva čista ugljovodonika: jednom od njih, *normalnom heptanu*, koji je naročito loš, pripisana je po definiciji vrednost 0; drugom, *izooktanu*, koji je u to vreme smatran za najkvalitetniji, pripisana je vrednost 100. Međutim, današnja supergoriva i benzini za avionske klipne motore imaju oktanske brojeve mnogo veće od 100, što daje predstavu o poboljšanju postignutom rafinacijom. I pored toga se uporno koriste ove proročanske vrednosti od oko 100 za oktanski broj i oko 10 za kompresioni odnos i ne izgleda da bi bilo rentabilno skupom sintezom proizvoditi veštačka tečna goriva koja bi omogućila prekoračivanje ovih granica.

• *Dizel-motor* u raznim varijantama, koje se kreću od brzog, relativno lakog tipa pogodnog za turističke automobile, do sporih motora snage 25 000 KS. za velike brodove, koristi se čitavom serijom proizvoda — od gasnog ulja do lakog goriva (dizel-ulje). Njegova glavna prednost u odnosu na eksplozivni motor jeste, dakle, u tome što se za sagorevanje koriste proizvodi koji se veoma lako dobijaju iz srednjih frakcija sirove nafte, pod osnovnim uslovom da gasno ulje bude uvek tečno, čak i pri najnižim zimskim temperaturama i da ne sadrži teške koksujuće frakcije koje bi mogle začepiti pumpe i otvore za ubrizgavanje, koji su osetljivi organi motora. Praktično je izvodljivo da dizel-motor funkcioniše sa bilo kojim tečnim ili gasovitim gorivom; npr., američke železnice sve više koriste propan.

• *Reaktivni motori* koriste proizvode koji se nazivaju reaktivna goriva, koji se nalaze na sredini između benzina i petroleja za osvetljenje ili kerozina. Proizvode se na vrlo jednostavan način pri prvoj destilaciji sirove nafte.

• Najzad, izvesne *rakete* koriste za kretanje *propergole*, dobijene petrohemijskim putem.

PROIZVODNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Proizvodnja električne energije je drugi glavni potrošač nafte i prirodnog gasa, naročito u zemljama koje su siromašne ugljem i hidroenergijom.

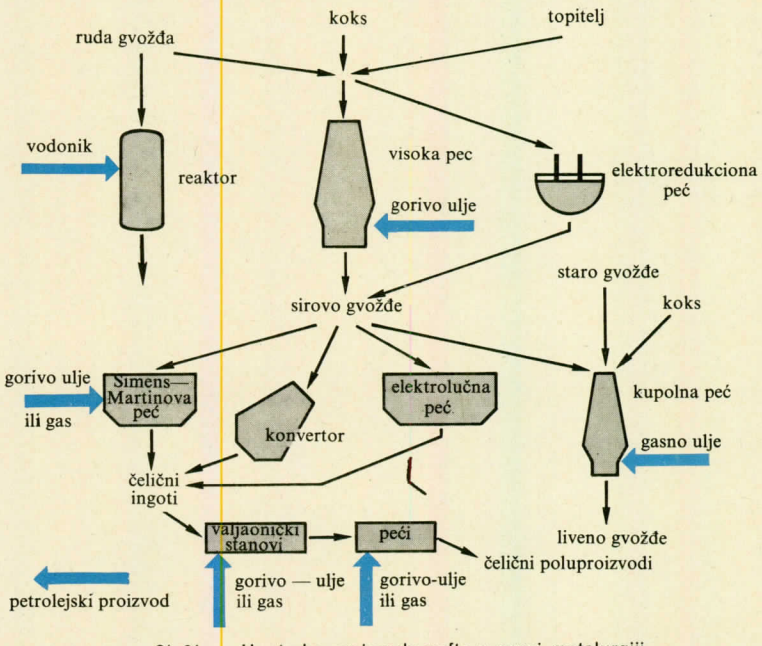
U Francuskoj je predviđeno da se nove centrale kompanije Electricité de France opreme instalacijama od 600 MW koje pokreće teško ulje. Ipak, ovo gorivo može imati kao nedostatak dosta visok sadržaj sumpora, naročito ako se dobija iz sirovina na Srednjem istoku: borba protiv zagađivanja atmosfere može stoga da nametne neka ograničenja u korišćenju ovih goriva. Na taj način, uprkos dimnjacima visokim preko 200 m, moraće se odustati od sagorevanja ovog goriva, ukoliko se njegovi gasovi usled pravca vetra ili nepostojanja vetra ne rasture u atmosferi. Problem goriva sa malim sadržajem sumpora ili, tačnije, izbacivanja dima sa striktno ograničenim sadržajem sumpora, može se rešiti na više načina. Najprostije je korišćenje goriva dobijenih iz sirovih nafti bez sumpora, npr, iz Sahare. Na žalost, ovakve lake sirovine sadrže veoma malo teškog ostatka, tako da bi samo centrale u jednom gradu kao što je Pariz trošile u budućnosti celokupnu proizvodnju dobijenu iz sirove nafte Hasi Mesauda! Drugo rešenje se sastoji u tome da se od rafinerija zahteva da proizvode goriva iz kojih je odstranjen sumpor. Nova tehnika hidrokrekovanja omogućuje postizanje ovog rezultata, ali je ona jako skupa.

Ekonomičnije rešenje može biti da se termičkoj centrali iporučuje gas umesto gorivog ulja, jer je odstranjivanje sumpora iz gasa relativno jednostavna operacija, čija je i cena prihvatljiva, kao što pokazuje primer gasa iz Laka. Takođe može biti od interesa da se isporučuje gorivo u obliku proizvoda koji treba prevesti u gasovito stanje: ako je rastojanje od centrale veliko, transport tečnosti će, po pravilu, biti manje skup nego što bi bio gasovodom. Ovo rešenje ima i tu prednost što olakšava prođu proizvoda koji se najteže mogu učiniti rentabilnim; npr., teški benzini nepogodni za sagorevanje, ili »nafte«, čiji je sadržaj visok u nekim sirovinama, mogu se prodati samo u obliku goriva za reaktivne motore ili gasnih ulja, ali sada postoje postupci prevođenja u gas krekovanjem, što liči na katalitičko krekovanje i krekovanje sa vodenom parom. Ovi postupci omogućuju proizvodnju gasa koji sadrži 75% metana, posle odstranjivanja ugljen-dioksida i koji, dakle, ima mnogo višu kaloričnu vrednost nego običan gradski gas, i to uz cenu koja je izrazito niža od cene uvezenog tečnog prirodnog gasa.

Najzad, poslednje rešenje, na koje se treba odlučiti u slučaju izvesnih centrala koje se nalaze u velikim naseljenim centrima, npr., u Londonu, sastoji se u ispiranju i odstranjivanju sumpora iz dimova po izlasku iz ložionica, pre njihovog izbacivanja u atmosferu.

CRNA METALURGIJA

Upotreba petrolejskih proizvoda u industriji gvožđa i čelika (*sl.* 21) relativno je nova, jer se ove industrije tradicionalno podižu u blizini rudnika kamenog



Sl. 21. — Upotreba proizvoda nafte u crnoj metalurgiji.

uglja i ne mogu se odreći koksa, koji ostaje osnovni izvor potrebne energije za topljenje rude u visokoj peći. Ipak, konkurenciju novih fabrika crne metalurgije, smeštenih u pristaništima, koje mogu da dobiju rudu gvožđa i ugalj po nižoj ceni, jako osećaju fabrike u unutrašnjosti i to ih podstiče da u nafti ne vide više stranca, nego saveznika: procenat proizvoda nafte koji se koriste u crnoj metalurgiji ne prestaje da raste i dostiže količinu koja već predstavlja 5 do 10% prodaje nafte, zavisno od zemlje.

Oko 1960. počelo je eksperimentisanje sa upotrebom gorivog ulja ubrizgavanjem u otvore za vreo vazduh na donjem delu visokih peći: time se pokušavalo ne samo smanjiti potrošnju metalurškog koksa, proizvoda koji po kaloriji staje mnogo više nego gorivo ulje, već i povećati kapacitet proizvodnje smanjivanjem prostora koji zauzima koks. Do sada dobijeni rezultati su vrlo interesantni pošto se za jednu srednju visoku peć, kapaciteta 1 000 t/dan sirovog gvožđa, ubrizgavanjem 100 t/dan gorivog ulja smanjuje potrošnja koksa od 700 na 550 t/dan, uz istovremeno povećavanje proizvodnje sirovog gvožđa za 10%; pošto je temperatura topljenja nešto viša, postiže se i smanjenje količine šljake i povećanje kalorične vrednosti visokopećnog gasa, tako da je, sve u svemu, rezultat operacije veoma značajna dobit i tendencija proširivanja postupka na čitavu industriju.

Druge upotrebe proizvoda nafte u crnoj metalurgiji su klasične i datiraju odavno, bilo da je reč o ubrizgavanju gorivog ulja ili gasa u Simens-Martinove peći, gasnog ulja u kupolne peći za liveno gvožđe ili, razume se, o upotrebi ulja ili gasa kao goriva za zagrevanje peći u valjaonicama.

Kao primena nafte u industriji gvožđa može se, najzad, razmatrati direktna redukcija rude u reaktoru za hidrogenizovanje: redukcioni agens — smeša ugljen-monoksida i vodonika — dobija se, u stvari, umerenim krekovanjem metana (prirodnog gasa) ili gorivog ulja.

Proširivanje upotrebe proizvoda nafte na sve grane crne metalurgije objašnjava interes za spajanjem ove dve industrije i za konstruisanjem kompleksa rafinacija-čeličana u zonama koje će se razviti.

POLJOPRIVREDA I ISHRANA

Sve što ima veze sa biologijom i, na taj način, sa ishranom — ovom osnovnom potrebom — sve više privlači istraživače. Ne govoreći o indirektnim uslugama koje su zemljoradnji učinila tečna i druga goriva — za transport, vuču, zagrevanje ili osvetljenje, istraživanje novih primena nafte dovelo je, ponekad na nepredviđeni način, do primena koje su koliko raznovrsne toliko i neočekivane.

Direktna primena ugljovodonika kao insekticida, koja je istraživana u prvom redu, pokazala se kao varljiva; slabo efikasna raspršivanja benzina ili kerozina zamenjena su čitavim arsenalom pesticida, fungicida, oplevljivača i drugih pomoći usevima koje isporučuje hemijska industrija u jednom od svojih najplodnijih udruživanja sa naftom. Današnje istraživanje odnosi se na selektivnu efikasnost, koja bi bila u stanju da izbegne sterilizovanje vegetacije, toksičnost za životinje ili čoveka i uništavanje nekih vrsta insekata ili korisnih biljaka, bilo direktno ili lišavanjem prirodne hrane, kao kod ptica.

Jedna od primena u zemljoradnji koja obećava, iako je jedva uvedena u praksu, jeste razlivanje proizvoda nafte na velikim površinama radi otklanjanja uticaja nepovoljnih klimatskih uslova, naročito u oblastima sa ekstremnom klimom. Najpre se uspelo sa izvesnim brojem eksperimenata stabilizovanja zemljišta raspršivanjem i nanošenjem tankog sloja ulja, gorivog ulja ili bitumena, pomešanih sa nekim adhezivnim proizvodom kao što je lateks. Konstatovano je da u oblastima kao što je Australija, ovo stabilizovanje može biti vrlo efikasno u borbi protiv erozije dejstvom vetra; zemljište ostaje pogodno za razvijanje biljaka, jer ulje ne stvara barijeru protiv prirodnog dejstva kiše i vazduha, koji mogu da prodru do semena i omoguće njegovo normalno klijanje. Misli se čak i da bi cvetanje žitarica moglo da bude olakšano ili ubrzano metodima ove vrste.

U drugim ispitivanjima u tropskim oblastima Afrike dobijeni su ohrabrujući rezultati u jednoj naročito teškoj oblasti eksperimentisanja — u oblasti atmosferskih padavina. Ako je neka velika površina asfaltirana, zemljište se brže zagreva, što ima za posledicu uzlazno strujanje toplog i vlažnog vazduha. Ova struja se na visini susreće sa hladnijim vazdušnim slojevima, što pod povoljnim uslovima može da izazove ili aktiviše kondenzovanje, odnosno kišu. Kiša se zatim sakuplja na površini zemljišta koju je asfaltiranje učinilo nepropustljivom.

Rezultati koji nisu zanemarljivi, takođe su dobijeni i u borbi protiv gubitka slatke vode, uz pomoć tankog sloja ulja koji pliva na površini i smanjuje isparavanje.

Međutim, najupadljivije otkriće je učinjeno 1962, kada je prvi put uspelo gajenje živih mikroorganizama na frakcijama nafte. Već odavno je bilo poznato da se mnogi »mikrobi« razmnožavaju u izvorima nafte, na dnu rezervoara u skladištima, čak i u rezervoarima avionskog goriva; međutim, jedna grupa istraživača u Laveri, blizu Marseja, došla je na ideju da identifikuje ove mikroorganizme, i zaista je našla bakterije, slične onima u nekim prehrambenim kvascima, koje uspevaju i razvijaju se hraneći se parafinskim ugljovodonicima iz gasnog ulja. Ovi kvasci su odgajeni u fermentatoru sa teškim gasnim uljem; oni apsorbuju oko 10% parafina koje to ulje sadrži i ostatak je gasno ulje ne samo nedirnuto već i poboljšano, pošto je parafin nepoželjan sastojak pri postizanju potrebne fluidnosti na hladnom vremenu; mikroorganizmi odvojeni od ugljovodonika predstavljaju koncentrat proteina i vitamina pogodnih za unošenje u stočnu hranu. Tako se može dobiti tona proteina polazeći od jedne tone parafina ili od 100 t sirove nafte: međutim, glavna karakteristika ovog otkrića, zbog koje se ono prati sa interesovanjem u celom svetu, u kome je nedostatak proteina najvažniji među problemima ishrane, jeste ubrzavanje ciklusa proizvodnje ovih proteina: izračunato je da se u nafti oni proizvode dve hiljade puta brže nego u prirodnom ciklusu gajenjem goveda. Ipak, biće potrebno veliko usavršavanje pre nego što bude moguće da se direktno proizvede »biftek od nafte«.

Ekonomski aspekti nafte

OPŠTI POJMOVI. Industrija nafte je kompleksna i integralna celina, koja povezuje jednu nepoznatu, otkriće nalazišta, sa potrošačkim dobrima za kojima moderno društvo ima sve imperativniju potrebu, jer je reč o tako bitnim materijama za naš svakodnevni život kao što su gorivo za naš automobil ili upaljač, gorivo koje nam služi kao ogrev, odelo koje oblačimo, a možda jednog dana, i deo naše ishrane. Široka javnost je od početka osetila ekonomski značaj nafte, tako da se čak verovalo da su neke vlade, razume se inostrane, u stanju da rizikuju rat da bi posedovale izvore crnog zlata. Sadašnje javno mišljenje se gotovo oslobodilo ovakve donekle naivne slike koja se može objasniti dalekim, egzotičnim i misterioznim karakterom jednog bogatstva za koje je Francuska dugo morala da moljaka.

GEOGRAFIJA NAFTE

Čitava industrija nafte i prirodnog gasa obeležena je ovom egzotikom koja se jasno pokazuje ako se uporede cifre proizvodnje i potrošnje glavnih zemalja.

Sjedinjene Države i Sovjetski Savez su jedine zemlje koje na svojoj teritoriji nalaze količinu koja gotovo zadovoljava njihove potrebe. U stvari, ako bi se ove zemlje podelile u ekonomske jedinice veličine evropskih zemalja, videlo bi se da su retke one koje, kao Nemačka, proizvode 10% svoje potrošnje; Kina, Australija, Francuska imaju proizvodnju koja je ispod 5%, a Velika Britanija i Japan praktično nulu.

Obrnuto, Srednji istok, severna Afrika, ostali deo Afrike, Venecuela proizvode deset puta više od svojih potreba, kao da se priroda zlobno našalila komplikujući posao ljudi. Jedno objašnjenje bi se moglo dati na bazi pretpostavke da se nafta nalazi poglavito u velikim sedimentnim basenima tropskih oblasti, sa negostoljubivom klimom i obalama, dok se stanovništvo zemlje razvijalo naročito u umerenim oblastima Severne polulopte, na plodnom zemljištu i na pristupačnim obalama koje su olakšavale saobraćaj.

Zatim, velike industrijske sile, koje do naših dana žive u tržišnoj privredi, rođene su spajanjem uglja, gvožđa i pomorske trgovine. Njihov razvoj danas karakterišu potrebe u energiji koje se udvostručuju približno svakih dvadeset godina.

Udeo hidroenergije retko prelazi 10%, izuzev u izvesnim planinskim oblastima, i njena upotreba postaje utoliko skuplja ukoliko su glavni rečni tokovi više iskorišćeni; ugalj, uopšte uzevši, zavisi od nalazišta, i samo oni rudnici koji se najlakše eksploatišu zaista su rentabilni; nuklearna energija iziskuje, da bi postala kompetitivna, mnogo duža tehnička usavršavanja nego što se mislilo pre deset godina; ostaje, dakle, nafti i prirodnom gasu da isporuče potrebne količine za zadovoljenje sve većih potreba. U Sjedinjenim Državama ugljovodonici čine već 75% energetskih izvora, i to uprkos činjenici da ova zemlja raspolaže rudnicima uglja sa površinskim kopom, koji su najekonomičniji na svetu, najsnažnijim i najregulisanijim rekama i nuklearnom industrijom koja je starija i naprednija nego u bilo kojoj drugoj zemlji. U Francuskoj, kao i u ostalom delu Evrope, nafta i prirodni gas uskoro će pokriti polovinu potreba i trebalo bi da dostignu udeo od tri četvrtine pre kraja stoleća.

NAFTA U SVETU (1965)

(u milionima tona sirove nafte)

PROIZVODNJA AMERIKA I PACIFIK		POTROŠNJA AMERIKA I PACIFIK	
Sjedinjene Države	430	Sjedinjene Države	545
Kanada	44	Kanada	56
Venecuela	182	Japan	89
Meksiko	19	Australija	20
Argentina	14	Ostali	101
Ostali	56		
	745		811

SREDNJI ISTOK		*SREDNJI ISTOK*	35
		ZAPADNA EVROPA	
Kuvajt	107	Nemačka	77
Saudijska Arabija	99	Velika Britanija	73
Iran	93	Francuska	53
Irak	63	Italija	52
Neutralna zona	19	Beneluks	41
Ostali	29	Ostali	81
	410		377
ZAPADNA EVROPA	22		
AFRIKA		AFRIKA	32
Libija	58	AZIJA	42
Alžir	26		
Ostali	22		
	106		
SSSR	240		
Kina, Istočna Evropa, razno	29	SSSR, Kina i Istočna Evropa	220
	269		1517
	1552		

ULAGANJA NA PODRUČJU NAFTE U SJEDINJENIM DRŽAVAMA (1965)

Aktivnost	Milijarde dolara
Bušenje i proizvodnja	3,70
Cevovodi za prirodni gas	0,94
Rafinacija	0,71
Naftovodi za sirovu naftu i konačne proizvode	0,13
Ostali transport	0,10
Petrohemija	0,43
Prodaja	0,92
Razno	0,40
	7,33

ENERGETSKE POTREBE ZAPADNE EVROPE

(u milionima tona ekvivalenta uglja)

	1955.	1965.	1975.
Potrebe u primarnoj energiji	777	1010	1325
Proizvodnja			
Ugalj	477	460	462
Lignit	30	45	60
Sirova nafta	13	30	50
Prirodni gas	7	25	55
Hidroenergija	56	95	140
Nuklearna energija	—	18	60
Ostala energija	20	20	20
	603	693	847
Uvoz	146	285	440
Nafta	—	5	42
Prirodni gas	28	35	35
Ugalj			
	174	325	517
Ukupni energetski izvori	777	1018	1364

(Cifre za 1975. su srednje vrednosti iz maksimalne i minimalne hipoteze.)

Stoga nas ne iznenađuje da je ova industrija koncentrisana u malom broju internacionalnih grupa: američkih (Esso, Gulf, Mobil, Texaco), britanskih (BP), anglo-holandskih (Šel), francuskih (Total), belgijskih (Fina) itd. Međutim, ovom privatnom kapitalizmu pridružuje se državni, jer su mnoge zemlje ili potpuno nacionalizovale svoju industriju nafte (SSSR, Meksiko, Iran, Egipat, Indonezija) ili formirale autonomne uprave koje kontroliše država (ENI u Italiji, ERAP u Francuskoj) i preko kojih vlade mogu da utiču na industriju nafte uopšte i da vode nacionalnu politiku.

Tako je Francuska, opredelivši se 1928. za jedan originalan režim, nazvan *delegiranim monopolom*, podelila svoje tržište na dva približno jednaka dela između internacionalnih grupa i nacionalnih uprava. Upravo ove poslednje su u smislu politike istraživanja i raznoobraznosti snabdevanja sirovom naftom, kakvu su želele javne vlasti, velikim delom otkrile i uvele u eksploataciju nalazišta u zoni franka, kako u metropoli tako i u Sahari, jer se privatna štednja ranije vrlo malo interesovala za ove zone prospekcije.

Primer Afrike je takođe interesantan u ovom pogledu: pošto su mnoge zemlje imale svoju proizvodnju sirove nafte, zvanična politika se sastojala u podstrekavanju petrolejskih društava na udruživanje radi gradnje jedne rafinerije uz participaciju države. Ove fabrike su same po sebi malo rentabilne, ali one simbolizuju industrijalizovanje ovih mladih nacija i imaju tu prednost nad teškom industrijom da prerađuju sirovinu ili lokalnu ili koja se lako pribavlja i da izrađuju proizvode koji se mogu direktno upotrebiti.

Sve u svemu, može se reći da u svim zemljama, čak i u Sjedinjenim Državama, petrolejsku politiku sve više kontrolišu javne vlasti.

BUDUĆNOST NAFTE

Količine tečnih ili gasovitih ugljovodonika koje su hiljadama godina čekale u dubini zemlje da do njih dopre sonda, sigurno su ograničene, a troše se tempom koji se ne može uporediti sa vremenom potrebnim za njihovo nastajanje iz morskih organskih materija. Pošto se lako može predvideti ritam porasta potreba u budućnosti, dosta je primamljivo proricati iscrpljivanje poznatih izvora i računati sa trenutkom kada će čovečanstvo morati ili da otkrije proizvode koji bi zamenili naftu, ili da se liši izvesnih koristi koje danas uživa. U stvarnosti, ovakva proročanstva i teoretisanja uvek su se pokazivala kao pogrešna ili zasnovana na slučajnosti, pošto se uspostavlja ravnoteža između raspoloživih količina ili utvrđenih rezervi i istraživačkih napora koji se usmeravaju i na nova nalazišta i na nove metode eksploatacije. Tridesetih godina bilo je rasprostranjeno mišljenje da rezerve nafte neće preći petnaest godina eksploatacije i da su glavna petrolejska polja otkrivena. Vreme se postaralo da negira ovakve pesimiste.

Deo sveta o kome postoji najviše podataka su Sjedinjene Države, pre svega zato što je tamošnja industrija nafte stara i veoma razvijena, a zatim i stoga što poreski i administrativni režim snažno podstiču privatnu inicijativu: tamo se buši pedeset hiljada bušotina svake godine. Tamošnje utvrđene rezerve nafte procenjuju se danas na 5 milijardi tona, što predstavlja zalihu za dvanaestak godina, a rezerve prirodnog gasa su 8 200 milijardi kubnih metara, odnosno za petnaestak godina. Međutim, ono što je važno, jeste to da se tečne rezerve pri sadašnjem tempu prospekcije svake godine uvećavaju za 75 miliona tona, tj. dva ili tri puta brže nego što raste proizvodnja. Istina je da se ova dopunjava veoma krupnim uvozom, iako striktno zakonski ograničenim, i kontrolisanim.

Za čitav svet, poznate rezerve su oko 50 milijardi tona, tj. za dobrih tridesetak godina. Međutim, različiti činioci daju za pravo mišljenju da će ove rezerve biti dovoljne bar do kraja XX veka.

1. Potpuno istražene zone, kao što su Sjedinjene Države, predstavljaju samo deo koji je manji od polovine sedimentnih basena. Praktično se ništa ne zna o ogromnim oblastima Centralne Afrike, Južne Amerike, severne Azije.

2. Kopno predstavlja samo 29% Zemljine površine, a nema razloga da se misli da nalazišta nafte pod morem nisu podjednako obilna. Tehnike podmorskog bušenja napreduju džinovskim koracima i omogućiće da se jednog dana izvrši prospekcija najvećeg dela okeana.

3. Metodi dobijanja su predmet neprekidnih istraživanja i eksperimenata. Nekada se neko nalazište napuštalo kao »iscrpljeno« kada pumpe više nisu bile u stanju da crpu naftu iz njega; tada je ostajalo 75% nafte u kamenom rezervoaru. Danas, zahvaljujući tehnikama koje se koriste vodom, gasom ili vatrom, mogu proporcije biti obrnute.

4. Polja tečne nafte i gasa nisu jedine rezerve ugljovodonika: postoje basnoslovna nalazišta bituminoznih škriljaca i peska, čija je eksploatacija tehnički izvodljiva i postaće rentabilna u onoj meri u kojoj se iscrpljuju bušotine nafte. Samo pesak iz Atabane, na zapadu Kanade, sadrži bar 100 milijardi tona asfalta koji se može eksploatisati; škriljci iz Kolorada i susednih država sadrže 200 milijardi tona nafte. Još postoji samo nejasna slika o svetskim rezervama koje sadrže ova nalazišta, gotovo nedirnuta do današnjeg dana; verovatno je da ona predstavljaju bar deset puta veće rezerve od poznatih rezervi tečne sirove nafte.

Dakle, ugljovodonici će još dugo predstavljati naš glavni izvor energije, možda još čitavo stoleće; ovo će zavisiti od brzine kojom će konkurentni oblici energije, nuklearne ili druge, postajati rentabilniji od nafte, ne samo u stadijumu proizvodnje već i primene.

Preveo **Slobodan Marinković**

Albert-Harold SAURAT

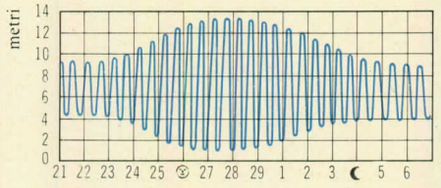
ENERGIJA PLIME I OSEKE

Teorija plime i oseke

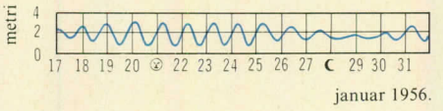
UVOD. Jednu od naizgled najsnažnijih manifestacija prirode — plimu i oseku — — proizvode veoma male sile. To je pojava koja zbunjuje, jer dok na francuskim obalama svakoga dana dvostruka pulsacija dovodi i odvodi vodu (*sl.* 1), istovremeno, pojava podizanja i nadolaska vode dešava se samo na atlantskoj obali, ali nije zapažena u Lamanšu. S druge strane, u Do Sonu u Severnom Vijetnamu (*sl.* 2) javlja se samo jedna plima i oseka u dvadeset četiri časa. Konačno, u Mon-Sen-Mišelu amplituda prelazi 15 m, dok u Sredozemnom moru dostiže samo nekoliko decimetara.

Njutn (Newton) je pokušao da objasni tu pojavu. Prema njegovoj teoriji plima i oseka su posledica promene dejstva privlačne sile Meseca i Sunca na molekule vode u okeanima tokom časova i dana. Ovim se odmah objašnjavaju pomeranja časova plime u zavisnosti od Meseca, promene amplitude tokom Mesečeve mene i visoke plime kada su Sunce i Mesec u povoljnoj konjukciji.

Međutim, kada se te sile izračunaju zbunjeni smo koliko su male. Najveća promena koju prouzrokuje Mesec na silu kojom Zemlja privlači molekul vode deset miliona puta je manja od težine molekula. Sunce deluje dva puta slabije nego Mesec. Ako bi slobodna površina mora ostala u ravnoteži, pod dejstvom promene u horizontalnoj komponenti njene težine plima i oseka iznosile bi 55 cm, a pod dejstvom promene vertikalne komponente 9/10 milimetra. Nemoguće je dakle objasniti visinu plime od 15,10 m u Mon-Sen-Mišelu. Međutim, površina mora ne može ostati u ravnoteži. Vode se kreću i sustižu bez prestanka. Laplas (Laplace) je 1774. prvi uveo hidrodinamiku u teoriju plime i oseke. Istakavši pojave rezonancije između perioda svemirskog dejstva i perioda oscilovanja raznih bazena kao Lamanš, dao je prve tačne jednačine za plimu i oseku i utvrdio teoreme. Međutim, integracija ovih jednačina, osim u izvesnim posebnim slučajevima, nije bila moguća tokom XIX veka. Veliki doprinos Anrija Poenkarea (Henri Poincaré) 1909. bio je baš u tome što je on tačno pokazao kako se problem može potpuno rešiti za sve, čak i najopštije slučajeve.



Sl. 1. Tip plime i oseke sa dve plime na dan, kod Mon-Sen-Mišela.



Sl. 2. Tip plime i oseke sa samo jednom plimom na dan, kod Do Sona (Severni Vijetnam).

KARAKTERISTIKE PLIME I OSEKE

Amplituda plime i oseke definiše se razlikom u nivou mora između uzastopne plime i oseke. Ona varira u odnosu na relativni položaj Meseca i Sunca. Dostiže svoju najveću vrednost pri tzv. »visokoj plimi«, jedan do četiri dana nakon mladog ili punog Meseca, a vraća se na najnižu vrednost pri tzv. »niskoj plimi«, jedan do četiri ili pet dana posle prve ili poslednje četvrti. Tri veličine dozvoljavaju da se precizira ova definicija: jedinica visine, koeficijenat plime i oseke i položaj luke.

JEDINICA VISINE. Jedinica visine je dogovoreni pojam koji označava visinu plime iznad srednjeg nivoa mora u određene dane. Za vreme uštapa, kada su Mesec i Sunce istovremeno na ekvatoru i na srednjem odstojanju od Zemlje, to je približno polovina visokih plima u vreme ravnodnevnice.

Jedinice visine u raznim francuskim lukama u metrima

Denkerk	2,70	Dijelet	4,45	Uesan	3,26
Kale	3,21	Kartre	5,04	Brest	3,21
Bulonj	4,17	Granvil	6,25	Duarnene	3,07
L'Trepor	4,65	Kankal	6,30	Sen-Nazer	2,63
Dijep	4,42	Sen-Malo	5,67	La Rošel	2,67
Avr	3,45	Pempol	5,22	Ruajan	2,35
Ug	2,79	Tregije	4,50	Arkašon	2,11
Šerbur	2,82	Raskof	4,02	Sokoa	2,02

KOEFICIJENAT PLIME I OSEKE. Približna amplituda plime i oseke za neku luku u određeni dan dobija se množenjem dvostruke vrednosti jedinice visine te luke i odgovarajućeg koeficijenta plime i oseke u centimetrima, datih u *Tablici koeficijenata plime i oseke*. Tablica se nalazi u *Godišnjaku plime i oseke* koji izdaje Hidrografska služba Francuske mornarice.

Ovaj koeficijenat je isti, za datu plimu i oseku, za sve tačke na obali Atlantika i Lamanša. On varira između 20 i 120, ali samo izuzetno — jednom za više godina — dostiže krajnje vrednosti.

Izuzetno visoke plime i oseke u vreme ravnodnevnice imaju koeficijenat koji može ići i do 120.



Sl. 3. Amplitude prosečno visokih plima i oseka za ravnodnevice, na raznim tačkama Zemljine kugle. Amplitude su izražene u metrima. Amplitude izuzetno visokih plima i oseka za ravnodnevice su za oko 20% veće. Podvučene brojke odgovaraju tačkama gde se sreću najveće plime i oseke.

Srednje visoke plime i oseke u vreme ravnodnevnice imaju koeficijenat 100.

Koeficijenat prosečnih visokih plima i oseka ravan je 95.

Koeficijenat prosečnih plima i oseka ravan je 75.

Koeficijenat prosečnih niskih plima i oseka je 45.

Koeficijenat najnižih plima i oseka ravan je 20.

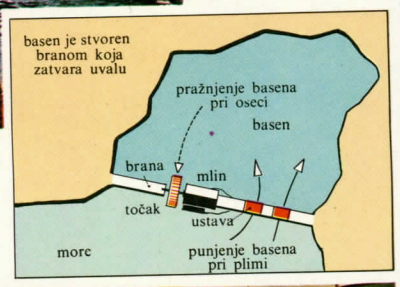
Ako se za određeno mesto ubeleže tokom godine svi koeficijenti plime i oseke, konstatuje se (*sl.* 4) da se uprkos tome što se časovi plime i oseke javljaju nakon određenih intervala vremena ne može zabeležiti bilo koji koeficijenat u bilo koje vreme. Plima i oseka mogu naići u bilo koje vreme, ali ne i bilo koja plima i oseka. Ubeležene tačke skupljene su u jednoj zoni sinusoidalnog oblika koja se slabo menja iz godine u godinu.

Veoma retke su tačke pri kojima amplituda prelazi 8 do 10 m. Takvu tačku predstavlja uvala Severn u Engleskoj, gde se amplituda plime i oseke kreće od 6,7 m pri niskim plimama do 14,5 m pri visokim plimama, i basen Mains (Mines) u Kanadi u dnu zaliva Fandi (Fundy), gde se stvaraju najveće plime i oseke na svetu: 6,4 (21,1 stopa) pri niskim i 16 m (52,2 stope) pri visokim plimama.

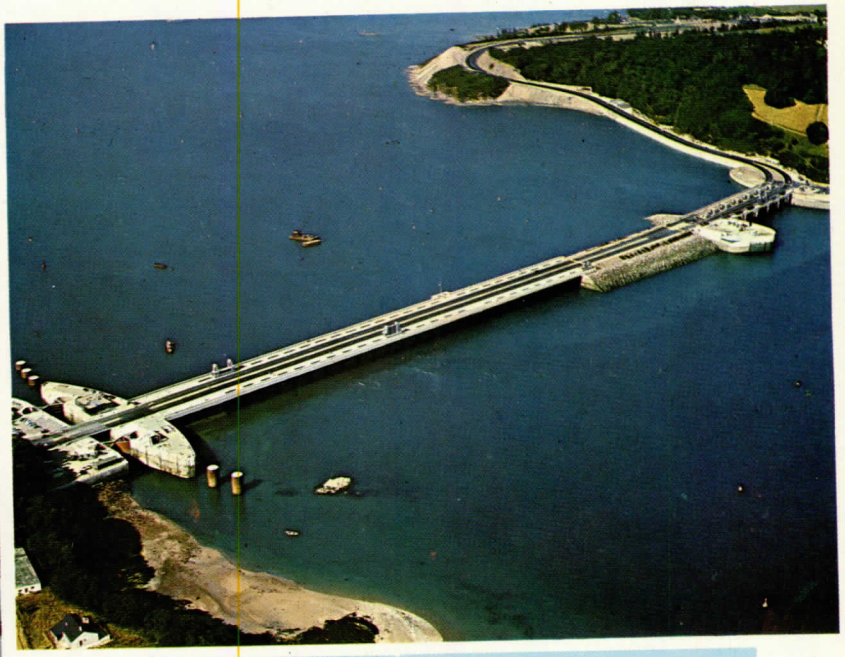
ENERGIJA PLIME I OSEKE



Stari mlin na plimu i oseku.

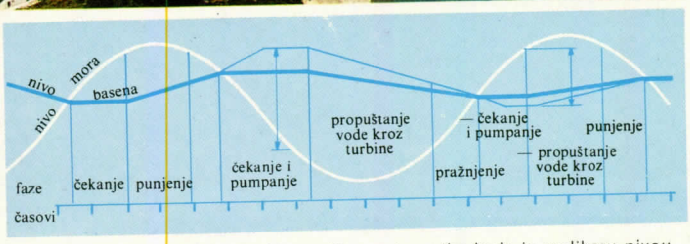


Pogled iz vazduha na elektranu na plimu i oseku Rans

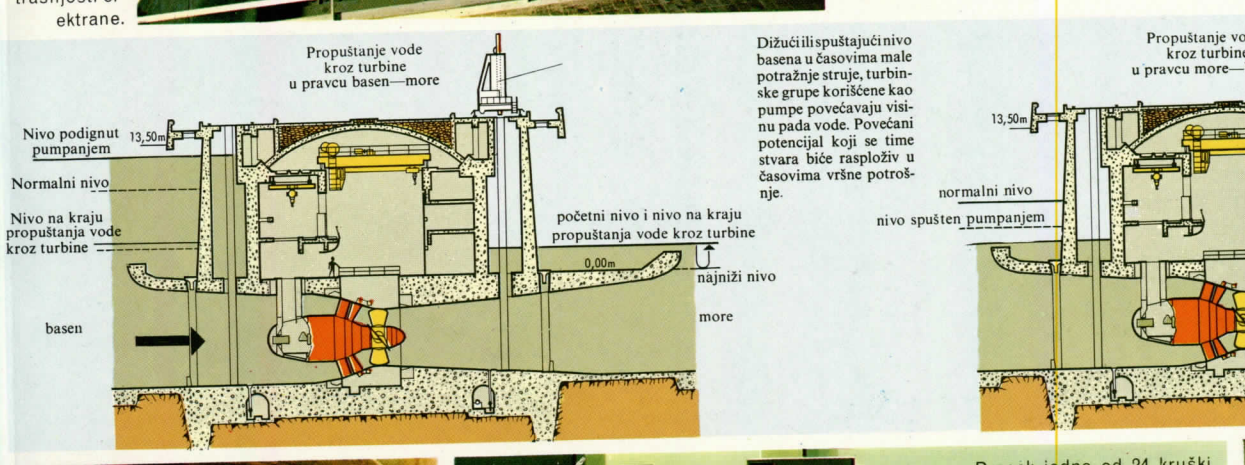




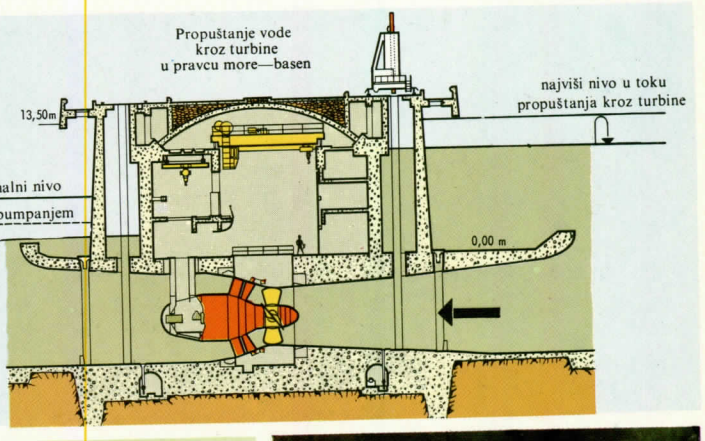
Jame za generatorske grupe u unutrašnjosti elektrane.



Propuštanje vode kroz turbine vrši se u trenutku kada je razlika u nivou vode između basena i mora najveća. Pri tome se vodi računa o eksploatacionim potrebama.

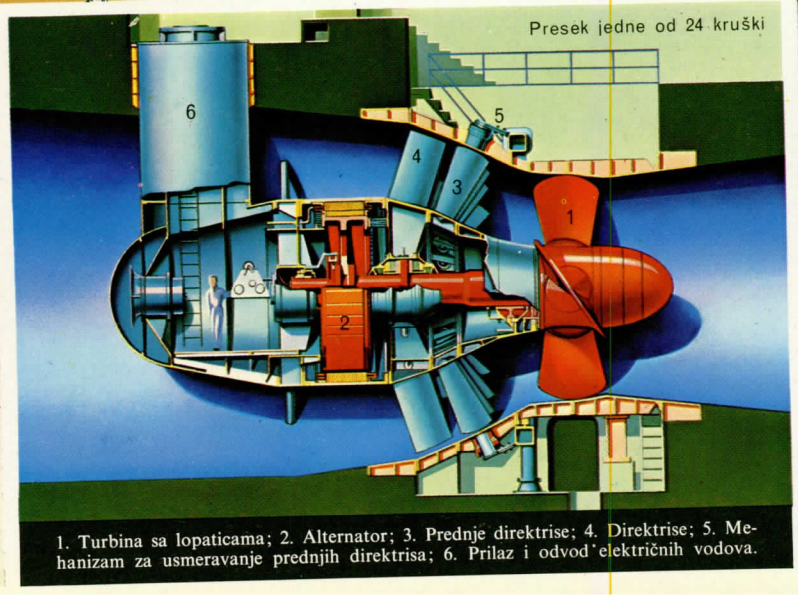


Dižući ili spuštajući nivo basena u časovima male potražnje struje, turbinske grupe koriščene kao pumpe povećavaju visinu pada vode. Povećani potencijal koji se time stvara biće raspoloživ u časovima vršne potrošnje.





Turbogeneratorska kruška, sa strane basena.



1. Turbina sa lopaticama; 2. Alternator; 3. Prednje direktrise; 4. Direktrise; 5. Mehanizam za usmeravanje prednjih direktrisa; 6. Prilaz i odvod električnih vodova.

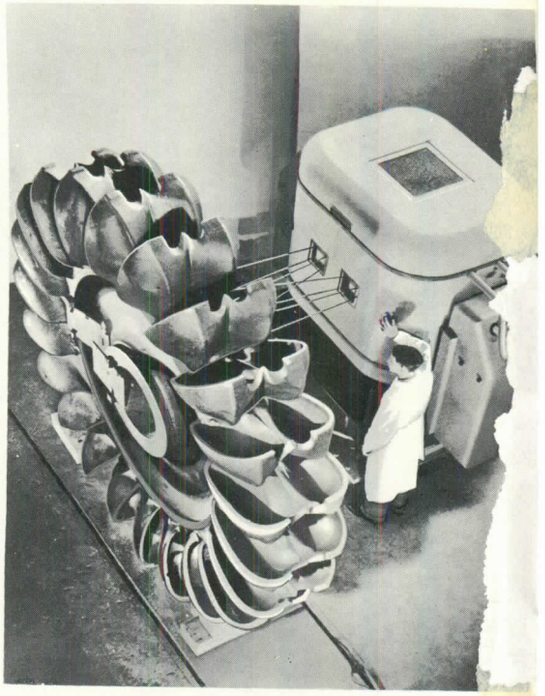


Elisa turbine, strana prema moru.

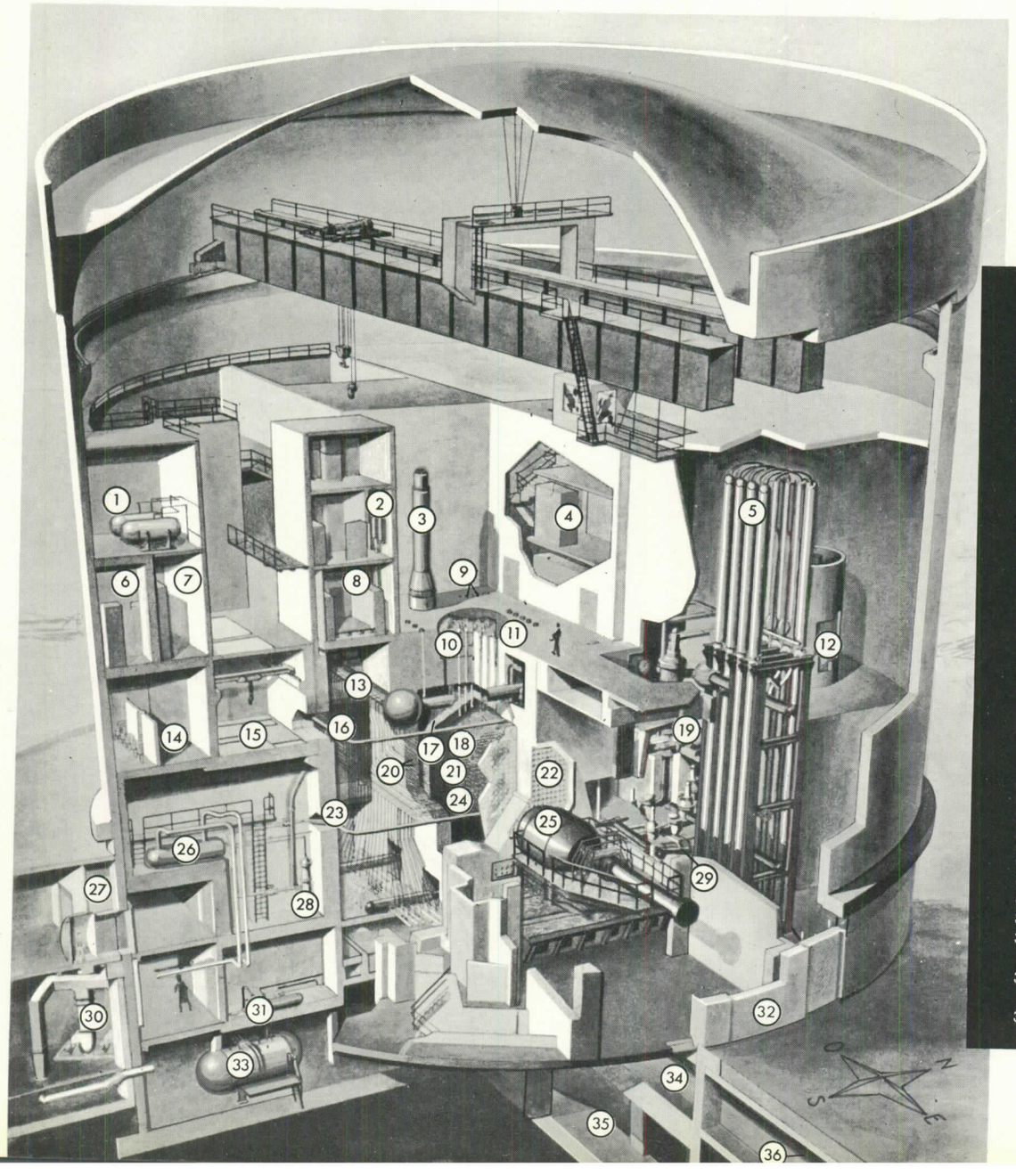
Fot. E. D. F.—Paragon-Prigaud



Opasnim radio-izotopima rukuje se iza debelih zaklona od olovnog stakla.



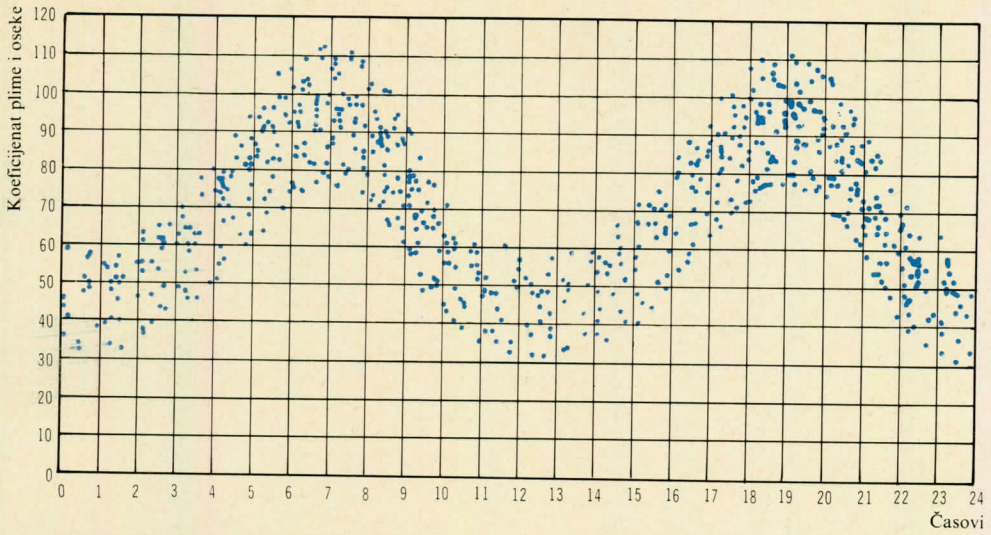
Elektroni ubrzani u betatronu proizvode gama-zrake koji su prodorniji od X—zraka. Gamagrafijom se otkrivaju greške u unutrašnjosti metalnih predmeta (ovde jedno Peltonovo kolo). *Fot. Brown-Boveri*



PRESEK KROZ REAKTOR EL 4

1. Gasni rezervoari sa helijumom
2. Rezervni kanali. Izmenjivači toplote rashladnog kola
3. Održavanje kontrolnih šipki
4. Upravljanje kolom CO_2
5. Tornjevi izmenjivača toplote
6—7. Prečišćavanje helijuma
8. Detekcija prskanja košuljice gorivog elementa
9. Rezervoar za smeštaj kontrolnih šipki
10. Kontrolne šipke
11. Udubljenje za televizijske kamere
12. Separator prečišćivača teške vode
13. Vrući kolektor
14—15. Opsluživanje teške vode
16. Kolo teške vode. Izlaz iz reaktorskog suda
17. Bočna vodena zaštita
18. Prsteni od nerđajućeg čelika
19. Gasne duvaljke
20. Obloga toplih cevovoda
21. Obloga hladnih cevovoda
22. Strana sa koje se reaktor puni gorivom
23. Kolo teške vode. Ulaz u reaktorski sud
24. Aksijalna vodena zaštita
25. Mašina za rukovanje gorivom
26. Izmenjivači toplote primarnog kola D_2O
27. Ulazni otvor za osoblje
28. Pumpe primarnog kola D_2O
29. Kolo voda—para
30. Zgrada ventilacije
31. Izmenjivači toplote za vodenu zaštitu
32. Demontabilne ploče
33. Rezervoari za smeštaj D_2O
34. Kanali za evakuaciju ozračenih gorivih elemenata
35. Ventilacija prostorija sa izmenjivačima toplote. toplote za CO_2
36. Odvođenje efluenata

Doc. C. E. A.



Sl. 4. Koeficijenat plime i oseke: na ovoj slici obeležene tačkom u funkciji časa i visine plime predstavljene su sve plime i oseke u toku godine u Sen-Malou. Konstantuje se da najveće plime u ovoj luci ne mogu da se jave u podne, a da u 19 časova nema malih plima.

POLOŽAJ LUKE. Talasu plime potrebno je izvesno vreme da se prenese iz jedne luke u drugu, pa se zato i plima javlja u različito vreme. Plime prate prolaz Meseca kroz meridijan u određenom intervalu vremena, koji se za svaku luku slabo menja tokom Mesečevih mena. *Položajem luke* naziva se veličina ovoga kašnjenja u dane punog Meseca. Razlika u položaju između dve luke označava dakle vreme za koje se talas plime prenese iz jedne u drugu. Sve francuske luke na okeanu od Sokoa do Bresta su kao jedan front zahvaćene skoro istovremeno talasom plime koji se kreće sa zapada na istok. Međutim, u Lamanšu talas se kreće sporije. To je posledica dejstva protivstruja koje stižu kanalom iz pravca istok — zapad, oblika obala, a posebno prepreka koje predstavljaju poluostrvo Kotanten (Cotentin) i zapadna obala Pa-de-Kalea (Pas de Calais). Ovo kašnjenje u odnosu na Brest je $24^h\ 15'$ u Sen-Malou (Saint-Malo), $4^h\ 10'$ u Šerburu (Cherbourg), $5^h\ 30'$ u Avru, 7^h i $15'$ u Dijepu, 7^h i $30'$ u Bolonju (Boulogne) i $8^h\ 40'$ u Denkerku. Talas plime međutim kreće se brže u danima niskih nego u danima visokih plima.

PERIODIČNOST PLIME I OSEKE. Isto kao i pomračenja Sunca i Meseca, fenomen plime i oseke se ponavlja skoro identično oko svakih 18 godina (tačnije posle 223 Mesečeva ciklusa, haldejski period). Može se čak uočiti razlika i između bilo koje plime i oseke i njoj odgovarajuće u sledećem godišnjem ciklusu. Međutim, te razlike su neznatne i dobrim delom se kompenzuju, tako da je energija kojom raspolažu plima i oseka skoro identična iz godine u godinu. Nema, dakle, ni »sušnih godina« ni »vlažnih godina«, kakve postoje kod hidrocentrala. Isto tako, raspoloživa energija i u toku dva proizvoljna Mesečeva ciklusa u toku godine razlikuje se manje od 5 % njihove srednje vrednosti. Nema, dakle, ni »suvih« ni »vlažnih« meseci, pa ni »leta« ni »zime«. Međutim, raspoloživa energija menja se iz dana u dan. Odnos najveće i najmanje proizvodnje energije je 1 : 8. Francuska je zemlja koja sigurno ima najveće pogodnosti u pogledu energije plime i oseke, i može se sa pouzdanjem nadati da godišnje odatle izvuče energiju istog reda veličina kao što u obliku uglja izvlači iz Severnog ugljenog basena i Pa-de-Kalea, tj. više desetina milijardi kilovat-časova. Razuđena obala Bretanje pruža brojne uvale pogodne za izgradnju basena, a plitko dno Lamanša u blizini obale omogućava ekonomičnu izgradnju brana.

Ciklusi korišćenja

Režimi punjenja basena i pražnjenja kroz turbine u elektrani na plimu i oseku bili su predmet mnogobrojnih istraživanja i predloga koji su prethodili studijama vršenim pod okriljem Francuske elektroprivrede (Electricité de France).

Ciklus čiji je period jedna plima i oseka

U ovom relativno prostom slučaju predviđa se isključivo korišćenje jedne plime i oseke, a rezultati se uopštavaju nezavisno od karakteristika posmatrane plime i oseke. Mogući ciklusi su razni.

PROSTO DEJSTVO. Najprostiji ciklus koristi samo jedan basen, stvoren branom koja zatvara uvalu ili zaliv. Potencijalna energija vode koristi se kada se basen prazni. To je ciklus sa prostim dejstvom pri pražnjenju (*sl.* 5). Ciklus sadrži tri faze:

— *faza punjenja* pri nadolasku plime; turbine su zaustavljenje, a ustave otvorene. Voda kroz ustave ulazi u basen;

— *faza čekanja*, turbine su zaustavljene, a ustave zatvorene. More se spušta, a nivo u basenu miruje; čeka se najpovoljniji trenutak da počne proizvodnja energije. To bi bio, na primer, onaj trenutak koji obezbeđuje maksimalnu proizvodnju, ukoliko su svi kilovat-časovi iste vrednosti;

— *faza proizvodnje*: turbine rade, a ustave su zatvorene; turbine proizvode energiju na osnovu visine pada koji je stvoren razlikama u nivou basena i mora.

U trenutku kada su turbine u pokretu, pad je uvek istog smera od basena prema moru. Za normalnu instalaciju, kretanje vode nije nikad brže nego što je bilo pre podizanja elektrane. Brzina je skoro ista pri punjenju, a nešto sporija pri pražnjenju.

Funkcionisanje je slično ukoliko turbine rade kada se basen puni (*ciklus sa prostim dejstvom pri punjenju*). Međutim, obale uvala nisu ni nagnute jedna prema drugoj ni okomite. Količine vode pri istoj razlici nivoa veće su za gornji nego za donji deo rezervoara: ciklus punjenja daće, dakle, manje energije nego ciklus pražnjenja. Na primer, za elektranu Rans (La Rance) odnos je oko dve trećine.

DVOSTRUKO DEJSTVO. Prirodno, razmatrana je mogućnost da se dva dejstva slože u jedan ciklus sa dvostrukim dejstvom (*sl.* 6). Energija se proizvodi u vreme punjenja i u vreme pražnjenja. Jednom branom (*sl.* 6a) prilikom proizvodnje energije pad vode je čas od mora prema basenu, čas od basena prema moru. Postavljanjem posebnih kanala u basenu kojima se dovodi i odvodi voda omogućava se da voda kroz turbine protiče uvek u istom smeru.

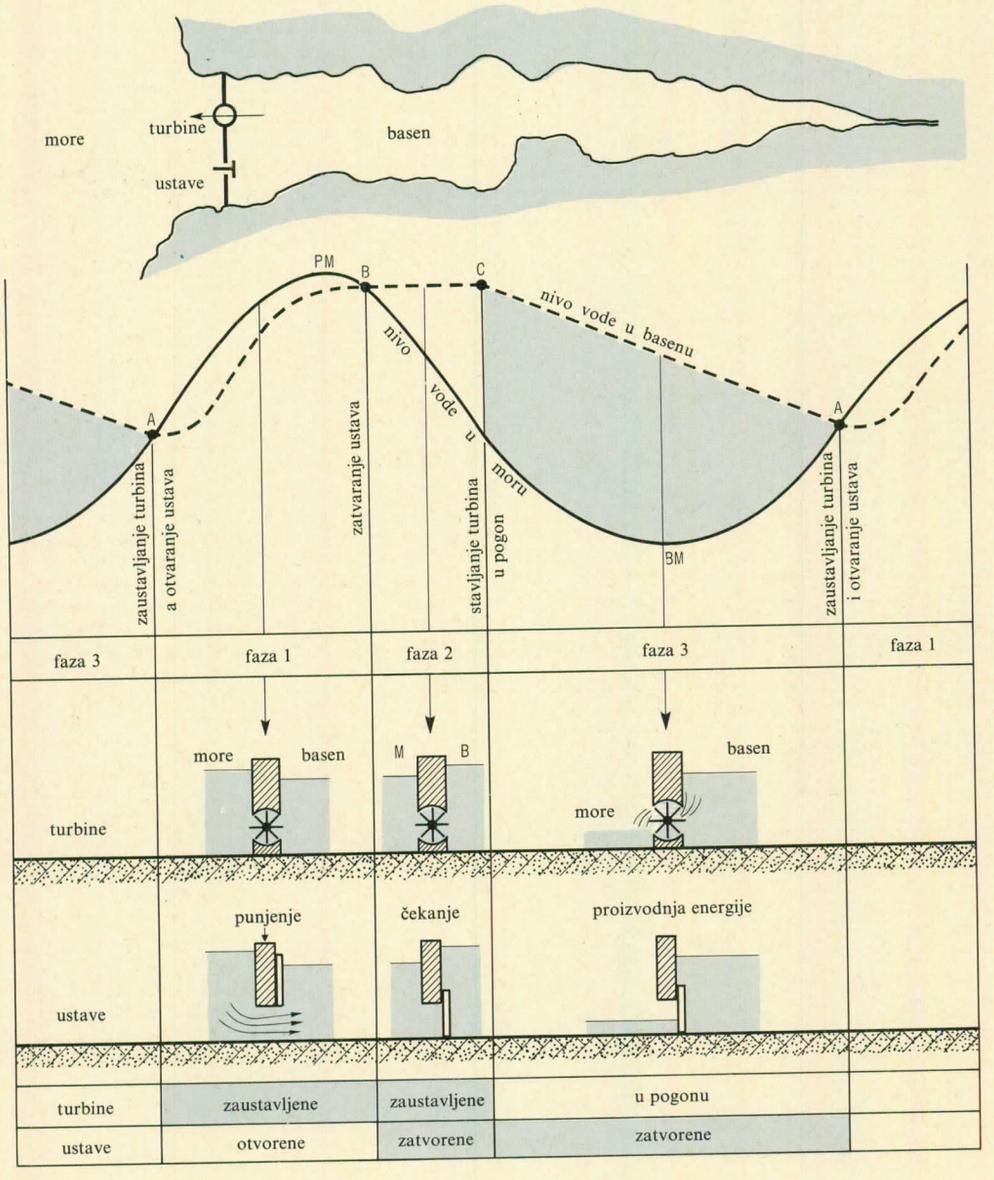
Jedan drugi uređaj sa dvostrukim dejstvom predstavlja *elektrana u obliku slova H* (*sl.* 6b). Basen je zatvoren dvostrukim nizom ustava između kojih se paralelno obalama postavi elektrana. Pogodno manevrisanje ustavama omogućava da voda prolazi kroz turbinu uvek u istom smeru.

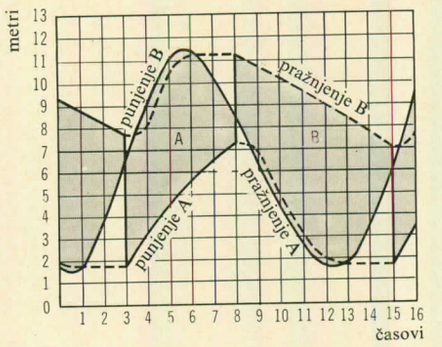
ZDRUŽENI BASENI. Dva basena sa prostim dejstvom A i B se združuju. Jedan, nazvan »donji basen A«, radi pri punjenju, drugi, nazvan »gornji basen B«, pri pražnjenju. Svaki sadrži po jednu elektranu s tim da obe mogu biti električno spojene kako bi proizvodnja bila neprekidna (*sl.* 7).

SPOJENI BASENI. Ovaj raspored, čiji je princip rada isti kao kod združenih basena (*sl.* 8), omogućuje da se postavi samo jedna elektrana, a da ona ipak radi u kontinualnom režimu. Takvo rešenje, međutim, može se primeniti samo kada se raspolaže velikim basenom, kao što su na primer zalivi. Retko se može primeniti u uvali. Predlagano je u više navrata da se ovaj ciklus koji je 1737. zamislio Belidor primeni na određenim zalivima.

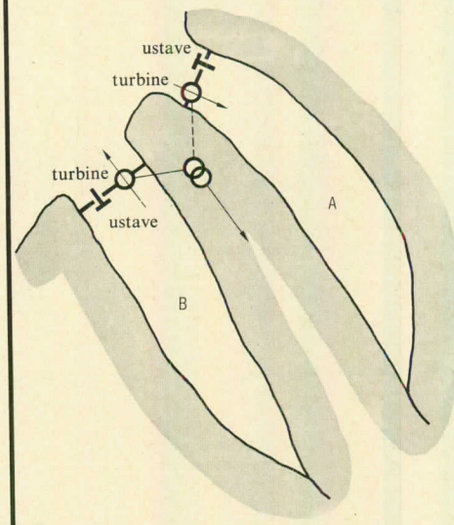
PUMPANJE. Prenosi ovih ciklusa mogu se poboljšati pumpanjem vode u trenutku gornje i donje mrtve tačke, kako bi se povećala kako zapremina vode koja se koristi, tako i visina pada. Da se to postigne, koriste se turbine kao pumpe. Neto dobit, pošto se obračunaju kilovat časovi koje je utrošila pumpa, je znatna, bilo zato što se voda koja se pumpa na male visine propušta kroz turbine sa velikom visinom pada, ili zato što se pumpanjem uzimaju iz mreže kilovat-časovi koji su suvišni u časovima male potrošnje.

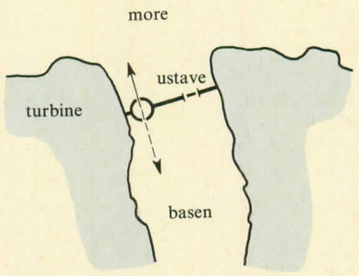
Sl. 5. Ciklus sa prostim dejstvom pri pražnjenju. U prikazanom slučaju turbine rade samo kada se basen prazni.

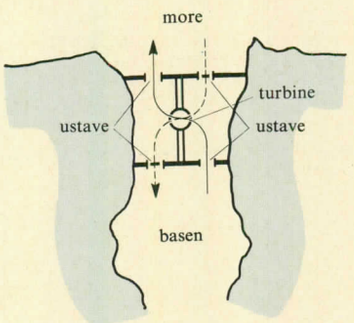




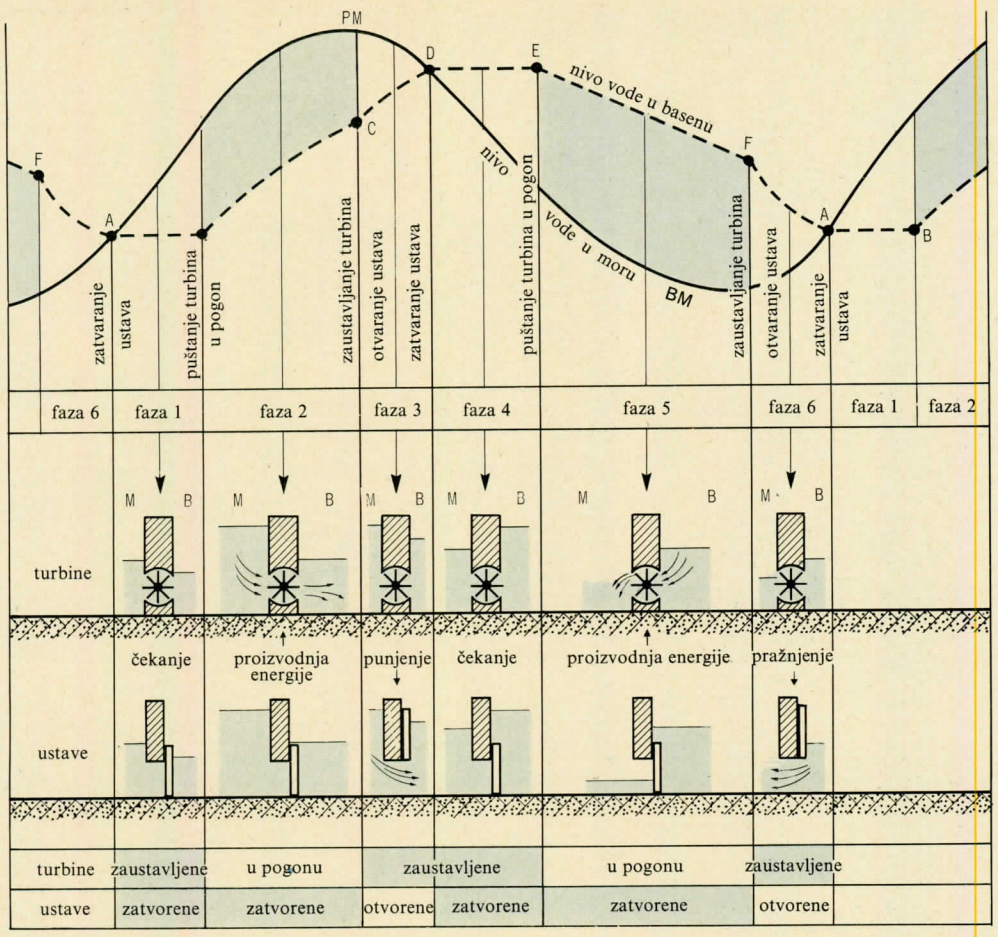
Sl. 7. Princip rada dvaju združenih basena. Jedan basen radi pri punjenju, drugi pri pražnjenju, što omogućuje uzajamnim vezivanjem, kontinualnu proizvodnju elektro-energije.

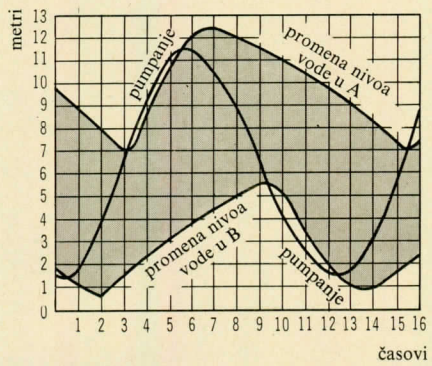


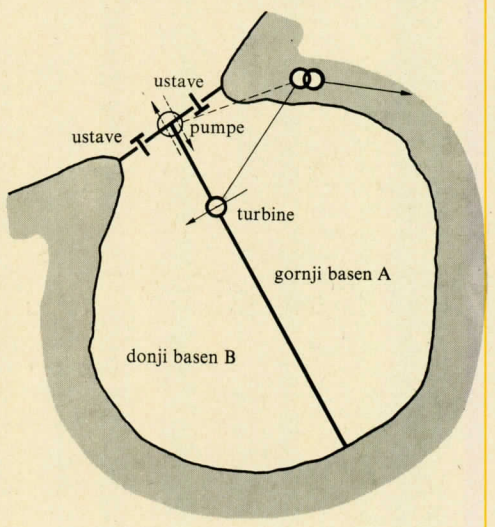




Sl. 6. Ciklus sa dvostrukim dejstvom. Turbine rade u toku punjenja i pražnjenja. Shematski je prikazan uređaj koji omogućava da se sačuva isti pravac proticanja vode kroz turbinu, bilo da ova radi za vreme punjenja ili za vreme pražnjenja.







Sl. 8. Spojeni baseni. Princip rada je isti kao i združenih basena sl. 7, mada je realizacija moguća samo kod velikih basena.

Ciklusi višeg reda

Različiti ciklusi korišćenja koji imaju period od jedne plime i oseke ne pokrivaju sve mogućnosti koje pruža korišćenje dvaju pravaca proticanja vode i pumpanja. Jedna plima i oseka sadrže četiri moguća *kretanja vode*: jedno propuštanje kroz turbinu i jedno pumpanje u toku plime; jedno propuštanje kroz turbinu i jedno pumpanje u toku oseke. Ova *četiri* kretanja *a priori* pružaju *šesnaest* mogućih kombinacija, od kojih svaka predstavlja različiti ciklus eksploatacije *jedne* plime i oseke. U stvari, samo u jednoj fazi propuštanja kroz turbinu moguće su četiri varijante:

— voda se propušta kroz turbine;
— voda se propušta u toku punjenja basena;
— voda se propušta u toku pražnjenja basena;
— voda se propušta kroz turbinu u oba smera.

Svaka od ovih varijanti može biti kombinovana sa četiri vrste pumpanja:

— nema pumpanja;
— pumpanje u pravcu more — basen;
— pumpanje u pravcu basen — more;
— pumpanje u oba smera.

Svi ciklusi nisu interesantni. Tako je kombinacija »nema propuštanja kroz turbinu + nema pumpanja« navedena radi celovitosti.

Prost slučaj samo jedne plime i oseke dosta dobro je primenjen pri proučavanju proizvodnje energije konstantne vrednosti, kada cena kilovat-časa ne zavisi od časa i dana. Slučaj dveju plima i oseka koje traju nešto više od dvadeset četiri časa već je komplikovaniji, ali omogućuje pristup i razumevanje važnog slučaja kada se cena energije menja u pojedinim časovima (normalni časovi, časovi u viškovima potrošnje i časovi male potrošnje). Ovaj slučaj su zanemarivali prvi istraživači, od kojih je izgleda većina sebi stavila za cilj konstantnu proizvodnju.

Slučaj dvadeset i sedam plima i oseka (četrnaest dana) jedini najbolje odgovara stvarnom problemu, jer dozvoljava da se uvedu časovi male potrošnje subotom i nedeljom kada je cena energije normalno veoma niska. Međutim, svaka plima i oseka omogućuje četiri *kretanja vode*. Za jednu plimu i oseku broj mogućih ciklusa ravan je broju uzajamnih kombinacija ova četiri kretanja $2^4 = 16$. Za dve plime i oseke broj ciklusa je $16^2 = 256$, što već zahteva izvestan napor da se oni pogodno klasiraju. Za dvadeset sedam plima i oseka postojaće $16^{27} = 2^{406}$ raznih ciklusa ili oko $3 \cdot 10^{32}$. Znači da nema nikakve nade da se svi pobroje. Međutim, kompletne studije slučaja, sa jednom i dve plime i oseke, i skica slučaja sa tri plime i oseke daju većinu osnovnih podataka potrebnih za eksploataciju. Oni svedoče o izuzetno velikim mogućnostima raznih rešenja i ističu pravu prirodu i izuzetne prilagodljivosti elektrane na pogon plimom i osekom.

U slučaju elektrane Rans, korišćenje različitih ciklusa tokom cele godine dozvoljava da se nađe najbolje rešenje za uslove datog trenutka. Time ona daje proizvodnju koja se može okvalifikovati »po meri«, nasuprot drugim načinima proizvodnje električne energije; u termoelektranama, akumulacionim i protočnim hidroelektranama.

Projekti elektrana na plimu i oseku

OPŠTE NAPOMENE

Mnogobrojni su različiti predlozi i studije rađeni kako u Francuskoj tako i u inostranstvu. Najveći broj je urađen između 1919. i 1932. godine.

PROJEKTI U FRANCUSKOJ. Od svih starih projekata elektrana na plimu i oseku u Francuskoj najpoznatiji je *Aber-Vrak* (Aber-Vrac'h). Odobrile su ga nadležne ustanove 1924, pa su radovi otpočeli 1928. Zatim su radovi bili prekinuti i konačno, u avgustu 1930, usled nedostatka finansijskih sredstava, potpuno obustavljeni. Zaliv *Mon-Sen-Mišel* često je privlačio pažnju, kako zbog veoma visoke plime tako i zbog relativno povoljne konfiguracije morskog dna na velikom prostranstvu. Prema poslednjem predlogu iz 1921, zaliv bi se zatvorio branom između tačaka Gruen (Grouin), blizu Kankala (Cancale) i Granvila (Granville). Godišnja proizvodnja je procenjena na 12,5 TWh, a koristio bi se Belidorov ciklus.

Poluostrvo Kotanten poslužilo je kao osnova projekta, u kome bi se koristila razlika u nivou mora koja prirodno postoji između plime na zapadnoj i istočnoj obali Kotantena. Na jednoj i drugoj strani poluostrva razlika u amplitudi srednje plime i oseke je oko 5 metara, a plime i oseke na istočnoj strani nastaju sa zakašnjenjem od tri časa. Dve obale bi trebalo povezati kanalom od oko tridesetak kilometara, na kome bi bila instalirana elektrana. Međutim, velike dimenzije koje je trebalo dati kanalima kako gubitak pritiska duž dovodnog i odvodnog kanala ne bi onemogućio rad, učinili su da projekat ne bude dovoljno rentabilan.

PROJEKTI U INOSTRANSTVU. Studije su vršene i u inostranstvu. Uvala Severn je bila predmet prvog projekta (1918) koji je predviđao stvaranje jednog basena sa prostim efektom pražnjenja uz regulaciju pumpanjem. Brana bi se koristila kao most sa putem i vijaduktom za železnicu. U 1943. to pitanje je ponovo uzeto u razmatranje. Nova komisija 1944. opredelila se za korišćenje jednog basena sa prostim dejstvom pražnjenja (32 generatorske grupe po 25 000 KW). Prolazima za put i železnicu trebalo je pričiti nezavisno od elektrane posebnim radovima, a ideja o regulaciji proizvodnje pumpanjem napuštena je kao nerentabilna. Elektrana je trebalo da ima snagu od 800 MW i da proizvodi godišnje 2,29 TWh.

• *Zaliv Fandi* (Novi Brunsvik), koji sačinjavaju ušće Ptikodiaka (Petitcodiac) i Memramkuka (Memramcook), bio je 1945. predmet jedne studije koja je predviđala elektranu sa dva basena. Turbine bi bile smeštene u brani koja bi ih delila. Kanadska vlada je 1966. ponovo uzela u razmatranje ovaj projekat, i realizacija bi se mogla očekivati u bliskoj budućnosti.

• *Zaliv Pasamakodi* je kanadski zaliv i nalazi se na granici Kanade i Sjedinjenih Država, a izlazi na zaliv Fandi na nekih 200 km jugozapadno od ušća Ptikodijaka i Memramkuka. Prvi američki projekat (1935) koji nosi ovo ime ne odnosi se na ovaj zaliv, pošto koristi energiju susednog zaliva Kabskuka koji se nalazi u Sjedinjenim Državama. Ovde su plime i oseke relativno slabe: amplituda prosečne visoke plime za ravnodnevnice je samo 7,5 m. Studije koje su trajale do 1959. bile su usmerene ka rešenju sa dva basena. Međutim, izveštaj međunarodne komisije od 4. aprila 1961. ocenjuje da ovaj projekat ne bi omogućio proizvodnju energije po ceni koja bi bila konkurentna energiji iz drugih izvora. Krajem 1961. jedan nov odbor odlučio se za jednu veliku elektranu od 1000 MW. Studije koje su odmah otpočele predviđaju dva basena sa dve elektrane od po 500 MW, koje bi radile kao vršne elektrane.

PRIHVAĆENI PROJEKTI. Posle razmatranja svih pretprojekata, kako francuskih tako i stranih, koji su bili poznati do toga vremena, jedan međuministarstveni tehnički komitet odabrao je 1946. dva:

— elektranu srednje jačine, smeštene na Ransi,

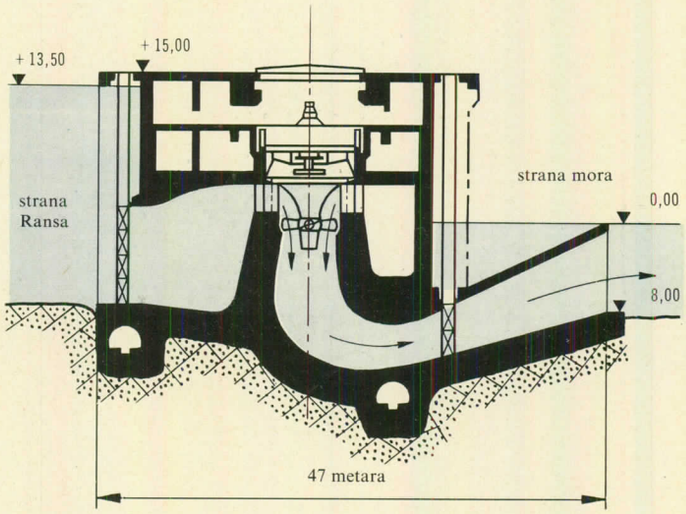
— elektranu veoma velike proizvodnje energije smeštenu u zalivu Mon-Sen-Mišel.

Sa izuzetkom jednog kanjona potpuno otvorenog prema moru, najpovoljnije lokacije nalaze se u oblasti gde je amplituda plime i oseke najveća, tj. u blizini Sen-Maloa.

Sa druge strane, ukoliko je sve ostalo isto, cena koštanja se smanjuje kada dimenzije basena rastu, jer se udvostručavanjem dužine brane, površina basena povećava četiri puta, a time i raspoloživa energija. Konačno, raspoloživa energija zavisi i od toga da li se i na koji način otkriva dno pri oseci.

RASPORED MAŠINA. Bilo je potrebno uložiti znatne napore da se pronađe raspored mašina koji bi stvarno odgovarao elektrani na plimu i oseku. Kod klasične turbine sa vertikalnom osovinom alternator se normalno nalazi na vrhu (*sl.* 9), s gornje strane turbinskog kola prema shemi koja je danas klasična (Donzer — Mondragon, Kembs itd.).

Sa kolom na horizontalnoj osi, sa kojom se a priori može postići bolji prinos zahvaljujući radu u oba pravca, alternator koji se nalazi na osovini na kojoj



Sl. 9. Klasična turbina sa vertikalnom osovinom. Alternator je vezan na vrhu osovine, i nalazi se iznad turbinskog kola sa lopatama.

i kolo potpuno je ispod površine vode. Stoga je potrebno izolovati ga od morske vode. Za taj problem predložena su tri rešenja.

• **Prvi tip (Harza)**. Zamislio ga je 1919. Amerikanac F. Harza. Sistem sadrži turbinu, kod koje se na krajevima lopatica turbinskog kola nalazi jedan pojas, na čijoj je spoljnoj strani namotan rotor alternatora. Realizacija spojeva je izvanredno osetljiva. Pored toga, usled napona koji krajevi lopatica treba da prenesu na krunu, izgleda teško premašiti snagu od 2000 ks po jedinici.

• **Drugi tip (bunar)**. Alternator na vrhu osovine smešten je u vertikalnom bunaru i tok vode ga zaobilazi.

• **Treći tip (kruška)**. Alternator je smešten u krušci, a cela konstrukcija sa turbinom i alternatorom potpuno je uronjena. Električna energija odvodi se kablovima koji su smešteni u gredama koje podupiru trem ili u pristupnom prolazu ka krušci.

Za elektranu na plimu i oseku oprema tipa »uzvodna kruška« izgleda znatno povoljnija nego oprema tipa »bunar«. S jedne strane, ima bolji protok vode, a sa druge pruža znatne pogodnosti za rešavanje problema održavanja. U opštem smislu u ovoj konstrukciji zadržava se struktura elektrane. Isti zaključci važe i za elektranu na rečnom toku, čak i sa malim brojem generatorskih grupa.

ELEKTRANA RANS

Ova elektrana, puštena u pogon 27. decembra 1966, koristi generatorsku grupu »krušaka« snabdevenih Kaplanovim turbinama sa pokretljivim lopatama, i po jednim alternatorom smeštenim u unutrašnjosti svake kruške.

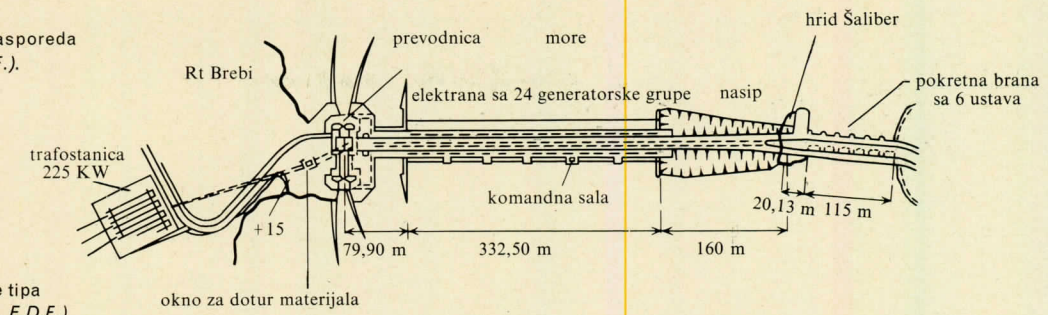
Ovaj projekat pruža mogućnosti za obavljanje sledećih šest osnovnih radnji:

— propuštanje vode kroz turbinu u pravcu more → zaliv
— propuštanje vode kroz turbinu u pravcu zaliv → more
— pumpanje vode u pravcu more → zaliv
— pumpanje vode u pravcu zaliv → more
— propuštanje vode kroz turbine bilo u pravcu more → zaliv ili zaliv → more.

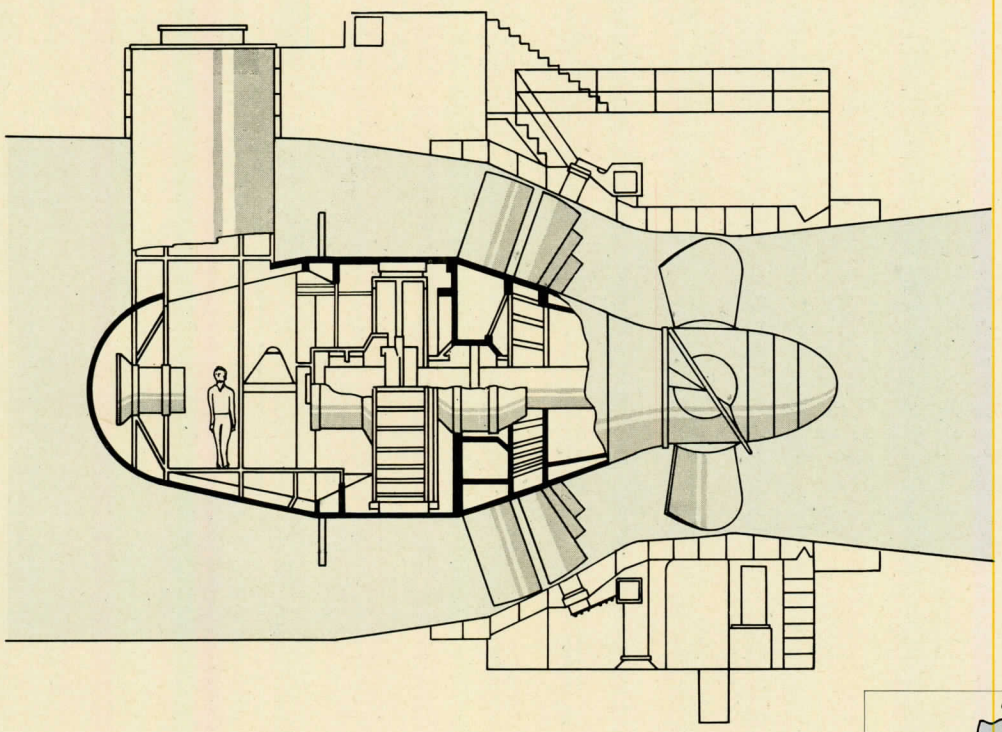
Eksploatacija se vrši po različitim ciklusima, vodeći računa o času plime, amplitudi plime i oseke i raznim vrednostima energije u toku dana. Između mnogobrojnih mogućih ciklusa, dispečer bira onaj koji najviše odgovara za dati dan. Takođe, sledeći potrebe potrošnje, elektrana na plimu i oseku usmerava proizvodnju na časove pune potrošnje ili vršnu potrošnju, a rad se podešava i u tom smislu da se maksimalno štedi potrošnja goriva u termičkim elektranama. Osim toga, na osnovu proste narudžbine jedan dan ranije, elektrana može da radi kao protočna elektrana, koja je u stanju znatnim delom da koncentriše svoju proizvodnju na časove normalne potrošnje, ili kao akumulaciona elektrana koja je u stanju da proizvodnju koncentriše na vršne časove. Njeno uvođenje u opšti sistem proizvodnje ne predstavlja unapred određeni način proizvodnje, pa se eksploatacija podešava da najbolje odgovori potrebama.

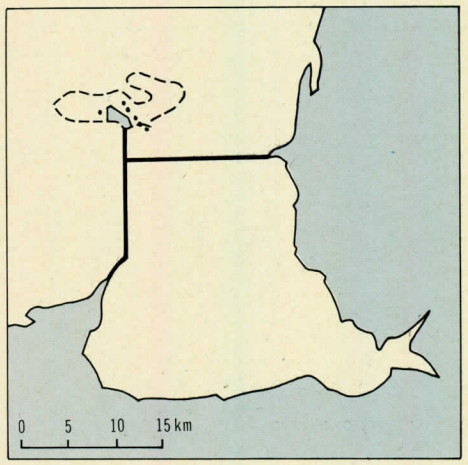
Između rta Brebi na levoj i rta Briante na desnoj obali, Rans je zatvorena sa dve osnovne odvojene brane (*sl.* 10) koje deli stenovito ostrvce Šaliber.

Sl. 10. Elektrana Rans. Plan rasporeda postrojenja *(Doc. E.D.F.).*

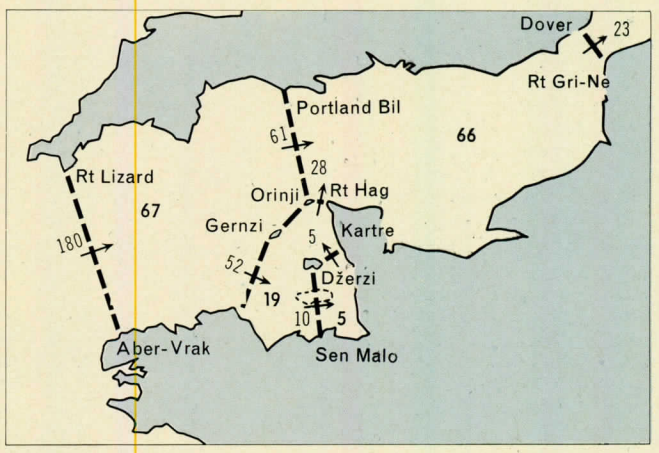


Sl. 11. Generatorske grupe tipa kruške u elektrani Rans. *(Doc. E.D.F.)*





Sl. 12. Projekat elektrane na plimu i oseku kod ostrva Šozej.



Sl. 13. Prosečna snaga koja se raspe u visokim plimama izražena u gigavatima.

1. Između leve obale i Šalibera nalazi se elektrana opremljena sa dvadeset i četiri generatorske grupe tipa »kruške« od po 10 MW, od kojih svaka ima 5,35 m u prečniku, zatim sa tri visokonaponska transformatora i celokunim uređajima za upravljanje, kontrolu i rad pomoćnih službi.

2. Između Šalibera i desne obale nalazi se pokretna brana, konstruisana od šest segmenata ustava, čije pokretanje omogućuje punjenje i pražnjenje basena.

Energija se odvodi preko leve obale. Jedna prevodnica smeštena na samom rtu Brebi obezbeđuje održavanje plovidbe na Ransi. Instalisana snaga elektrane je 240 MW. Godišnja proizvodnja 544 GWh.

Značaj uzvodno postavljenih »krušaka« sa horizontalnom osovinom (*sl.* 11) primenjenih u elektrani Rans, nezavisno od toga što se iskorišćenje neznatno povećava pri direktnom propuštanju vode kroz turbinu (pražnjenju), sastoji se u tome što:

1. mogu da funkcionišu, bez značajnih dadatnih troškova, sa povoljnim iskorišćenjem pri svim mogućim hipotezama (punjenje ili pražnjenje, propuštanje vode kroz turbinu ili pumpanje);

2. omogućuju da se uz dovoljnu rentabilnost celom širinom Ranse instališe snaga znatno veća nego u slučaju klasičnih generatorskih grupa;

3. omogućuju da se u unutrašnjosti brane smeste: radionice, transformatori, visokonaponske stanice itd.;

4. daju veliki protok pri propuštanju vode kroz ustave (186 m^3/s pri padu od 1 m za jednu generatorsku grupu).

PROJEKTI ŠOZEJ I MENKIJE

Francuski projekti predviđaju da se u zalivu Mon-Sen-Mišel između Granvila, ostrva Šozej i rta Gruen, blizu Kankala (*sl.* 12) instališe 10 do 15 miliona kilovata sa proizvodnjom od 30—50 milijardi KWh. Slična snaga može se očekivati i od projekta Menkije. Ukupna potrošnja u Francuskoj 1966. dostigla je (uključujući gubitke) nešto više od 100 milijardi KWh. Ovakve projekte može opravdati samo brzi i stalni porast potražnje kako u trenutnoj snazi tako i u godišnjoj potrošnji energije (udvostručavanje svakih deset godina).

Proizvodnja ovako značajnih količina energije pomoću plime i oseke stvara potrebu detaljne analize odgovarajućeg fizičkog procesa. Mora se uzeti u obzir da će elektrana izmeniti režim plime i oseke, koji karakterišu promene nivoa vode kao i promene struje, a posebno da će stvoriti vremensko pomeranje u krivama odgovarajućih promena. Osim toga stoji prirodna granica količine energije koja se može zahvatiti, a koju ne određuju samo zapremina basena i amplituda plime i oseke. Kod pada rečne vode, energija koju proizvodi elektrana predstavlja onu energiju koja se pre stvaranja brane prirodno rasipa, u bujici, talasima, vrtlozima i raznim trenjima. Maksimalna količina energije koja se može transformisati ravna je svim ovim gubicima. Po analogiji, kao tražena granica mogla bi se smatrati i energija koja se pri plimi i osci rasipa na isti način. Energija koja prolazi na mestu brane na Ransi, a koja je ravna razlici energije koja ulazi pri plimi i energiji koja izlazi pri oseci, rasturi se trenjem u zalivu. Ovo je moguće i računati. Na slici 13 sabrani su rezultati za Lamanš.

Isprekidane linije obeležavaju profil za koji je proračun vršen. Brojke predstavljaju gigavate (milione KW) snage, koje tokom jedne prosečno visoke plime i oseke prolaze kroz odgovarajuće profile. Ako se prate strelice, ukupna izlazna snaga struje za određenu zonu manja je nego snage ulazne struje. Razlike (uokvirene brojke) nisu ništa drugo nego snaga koja se rasturi u odgovarajućoj zoni. Brojke koje odgovaraju godišnjem proseku skoro su jednake polovini označenih brojki i predstavljaju prosečnu snagu jedne visoke plime i oseke.

Ma koliko izgledale velike na prvi pogled, snage koje se rasturaju su začuđujuće male kada se uzme u obzir ukupna površina mora. Snaga koja se godišnje rasipa u sektoru Sen-Malo – Žersej – Kartre – na površini od 3.200 km^2, reda su 2 GW, što bi dalo oko 350 MW za zaliv Mon-Sen-Mišel. Uzimajući za Ransu najviše brojke, kako bi se uračunala trenja koja su svakako viša, dobija se najviše 60 MW koji se rasture prirodnim putem u zalivu Ranse. Međutim, francuski projekti elektrane u zalivu Mon-Sen-Mišel predviđaju instalisanje 10—15 GW. Energija sa čijim se korišćenjem računa znatno je veća nego energija koja se prirodno rastura. Analogija sa vodenim padom, gde se koristi samo prirodna energija, pogrešna je. Kako ne postoji nada da će se izgraditi snažne elektrane na plimu i oseku a da se pri tom ne promeni režim plima i oseka, treba dakle *privući energiju* koja se sada rasipa na drugim mestima.

Ukupna snaga koja se rasipa u Lamanšu, računata pri istim uslovima, maksimalno iznosi 80 GM (vrednost skoro ravna električnoj snazi koja se koristi u Sjedinjenim Državama).

ZAKLJUČAK

Duboki okeani, Antlantik, Pacifik, Indijski okean, Antarktički okean itd. rasipaju samo mali deo snage plime i oseke, najviše jedan milion kilovata, ili 3 vata po kvadratnom kilometru. U svetskom bilansu rasute energije glavni doprinos daju plitka mora i tesnaci, kao Lamanš, Irsko more, Severno more, Beringov moreuz, moreuz Malaka (Malacca), itd. Ukupna snaga koja se rasipa plimama i osekama na celoj Zemljinoj kugli reda je milijarde kilovata. To predstavlja isti red veličina kao srednja energija koju u svim oblicima (voda, ugalj, nafta, prirodni gas itd.) čovečanstvo potroši u toku jednog časa. Plima i oseka, to ogromno pulsiranje, koje je prestrašilo ratnike Aleksandra Makedonskog u ušću Inda, ne predstavlja mnogo, a njihova snaga nije veća od snage koju je čovek već stavio u pogon u mašinama koje je izmislio.

Preveo **Nened Raišić** **Robert GIBRAT**

NUKLEARNA ENERGIJA

Nuklearna energija, jedno od najvećih otkrića XX veka, javila se avgusta 1945. eksplozijama u Hirošimi i Nagasakiju. Naučni napredak ostvaren u ovoj oblasti do toga trenutka brižno je skrivan u laboratorijama, pa je čovečanstvo tek tada postalo svesno moći koju ova nova energija poseduje. Ova pojava stvorila je jednu posebnu atmosferu a svet je bio zahvaćen specifičnom psihološkom klimom i strahom. Međutim, uporedo sa ubitačnim vidom kojim je nuklearna energija zaodenuta u vidu svoje vojne primene, postoji i korisni vid koji se ogleda u njenoj civilnoj ili, kako se obično naziva, mirnodopskoj primeni.

Principi funkcionisanja nuklearnog reaktora

Drugog decembra 1942. godine Enriku Fermiju (Fermi) i njegovoj ekipi pošlo je za rukom da prvi put puste u pogon »atomsku peć«, ili, kako se danas češće naziva, nuklearni reaktor snage 2 wata. Slažući šipke prirodnog urana i grafit, Fermi je ostvario »stagfildsku lančanu reakciju (Stagg Field)«, nazvanu tako po fudbalskom igralištu u Čikagu ispod koga je ostvaren ovaj eksperimenat.

Nuklearni reaktori su uređaji koji pretvaraju masu u energiju, u skladu sa Ajnštajnovom relacijom o ekvivalentnosti mase i energije. Cilj im je dvostruk: proizvodnja energije sa jedne i neutrona sa druge strane. Princip rada je zasnovan na reakciji fisije izvesnih teških atomskih jezgara. Neutroni oslobođeni u ovim reakcijama koriste se za podsticanje i održavanje lančane reakcije. Ovo je mogućno postići ukoliko faktor multiplikacije nije manji od jedinice.

Sudbina neutrona emitovanih u fisiji

Ukoliko se pod određenim uslovima razbije jezgro atoma urana 235, između ostalog dolazi do emitovanja neutrona. U stvari, postoje samo tri teška elementa koje je moguće razbiti. To su uran 235, uran 233 i plutonijum 239. Od njih je načinjeno jezgro reaktora.

Fisija jednog jezgra jednog od ovih elemenata daje 2,46, 2,54 i 2,91 neutrona. Njihova sudbina može biti različita.

1. *Neutroni mogu izazvati nove fisije.* Ova hipoteza je najpovoljnija, i za nju se traže najpovoljniji uslovi. Da bi se lančana reakcija održala potrebno je da efektivni presek za fisiju urana 235, koga u prirodnom uranu ima u malim količinama, bude veći. Utvrđeno je — a to je veoma važna činjenica — da se efektivni presek urana 235 povećava veoma brzo kada se smanjuje energija neutrona. Ako se neutroni uspore, njihov efektivni presek za apsorpciju u uranu 238 se ne povećava, dok se presek za fisiju urana 235 uvećava za faktor 600. Katkad se ovaj podatak izražava da se efektivni preseci pokoravaju zakonu $\frac{1}{v}$. Ukoliko je neutron sporiji, utoliko postoje veći izgledi da će biti apsorbovan jezgrom metom.

Ovaj fenomen je, međutim, komplikovaniji, pošto za svako jezgro postoje tačno određene energije upadnog neutrona, nazvane energijama rezonancije, za koje efektivni presek može da poprimi izvanredno visoke vrednosti. Ove rezonancije se objašnjavaju savršeno dobro kada se uzme u obzir talasna priroda čestice. Na primer, za kadmijum, za termalne neutrone energije 1/40 eV, efektivni presek za zahvat neutrona je 4000 barna (ili oko 4000 puta veći od geometrijskog poprečnog preseka jezgra). Ovaj presek opadne na svega nekoliko barna za neutrone od 3 eV. Zbog toga se kadmijum, kao uostalom i bor (efektivni presek 1000 barna) i gadolinijum (efektivni presek 22.000 barna) koriste u nuklearnim reaktorima kao apsorberi termalnih neutrona. Dakle, pošto je neutron u momentu emitovanja brz, treba ga usporiti. Da se ovo postigne koristi se *moderator* ili usporivač, sastavni element reaktora, čija je uloga da brze neutrone transformiše u termalne (energija 1/40 eV). Moderator može biti obična teška voda ili grafit.

2. *Neutroni mogu pobeći iz jezgra reaktora.* Ovo je najnepovoljniji slučaj do koga dolazi kada na svome putu neutron ne sretne nijedno jezgro. Da se izbegne taj slučaj, jezgro reaktora se okružuje reflektorom, čija je namena da neutrone koji beže vrati u jezgro. Izbor materijala za reflektor je podložan istim kriterijumima kao i izbor materijala za moderator, a to su velika moć usporavanja i mala apsorpcija neutrona. Katkad se moderator i reflektor sastoje od istog elementa, na primer grafita.

3. *Neutroni se mogu sudariti sa okolnim jezgrima.* Na taj način se usporavaju i skreću sa svoga pravca kretanja; to su elastični sudari.

4. *Neutroni mogu biti zahvaćeni nefisibilnim jezgrima* (npr. jezgrima urana 238). Pri tim uslovima, neutron će prodreti u jezgro i stvoriti novi izotop odgovarajućeg jezgra. Ako je stvoreni izotop stabilan, došlo je do zahvata »bez posledica«. Kaže se takođe da se dogodio *radijativni zahvat*. Ako je stvoreni izotop radioaktivan, doći će do emisije zračenja i transmutacije početnog jezgra. Može doći i do emisije jednog neutrona, nakon čega se jezgro vraća u početno stanje. To je elastični sudar. Dok su u elastičnim sudarima kinetička energija i količina kretanja (impuls) očuvani, pri neelastičnim nema očuvanja kinetičke energije: deo kinetičke energije neutrona služi za povećanje unutrašnje energije nukleona ili se javlja u obliku gama zraka. Iako su poznati uslovi za odigravanje ove pojave, nemoguće je za dati neutron predvideti konačni ishod, jer isti uzroci nemaju uvek iste posledice. Sa druge strane, kada se posmatra veliki broj neutrona — kaže se *populacija neutrona* — može se tvrditi da će određeni procenat imati ovu ili onu sudbinu, i u tom slučaju govoriće se o verovatnoći.

Lančana reakcija i koeficijenat multiplikacije

Neutroni rođeni u istom trenutku u jezgru nekog reaktora sa prirodnim uranom mogu proizvesti fisiju, pobeći ili biti zahvaćeni bilo uranom 238, bilo uranom 235, a da ne proizvedu fisiju. Cilj koji se želi postići očigledno je da oni nastave proces fisije.

NEUTRONSKI BILANS. Načinimo verovatni bilans sudbine generacije od 100 neutrona koji su svi u početku brzi neutroni. U toku usporavanja pet pobegne a deset ih apsorbuje uran 238. Od 85 koji ostanu i koji stignu u termičko stanje, pet pobegnu kao termalni neutroni, a ostalih osamdeset bivaju apsorbovani. Ako polovina — 40 neutrona — nakon zahvata izazove pojavu fisije, ciklus lančane reakcije fisije će se u reaktoru ponoviti i generacije neutrona će se redati jedna za drugom, pošto u proseku jedna fisija jezgra daje 2,5 neutrona. Sa 40 fisija ponovo će se dobiti početnih 100 brzih neutrona.

KOEFICIJENAT MULTIPLIKACIJE. Da bi se lančana reakcija održala, svaka fisija koju je izazvao jedan neutron treba od stvorenih 2,5 da da bar jedan neutron koji neće biti ni zahvaćen ni izgubljen, to jest jedan neutron koji će sa svoje strane moći da izazove fisiju nekog drugog jezgra. Taj uslov se izražava na prost način pomoću efektivnog koeficijenta multiplikacije, koji se simbolički predstavlja katkad kao Keff ili prostije kao K.

• Taj koeficijenat se definiše kao odnos srednjeg broja svih brzih neutrona oslobođenih u jednoj generaciji i odgovarajućeg broja brzih neutrona stvorenih u prethodnoj generaciji. Oznaka »srednji« koja se koristi u ovoj definiciji neophodna je, pošto koeficijent K zadržava u svim okolnostima isto značenje. U stvari, fisije u datom trenutku ne oslobađaju uvek jednak broj neutrona. Sa druge strane, zahvat karakteriše verovatnoća reakcije, a ne izvesnost. Konačno, sve fisije koje definišu rađanje jedne generacije nisu strogo simultane. Ako posmatramo mali broj neutrona, videćemo da vrednost koeficijenta K može mnogo da varira od jedne do druge generacije i od trenutka do trenutka. Dakle, može se pisati

$$K = \frac{\text{srednji ukupan broj brzih neutrona oslobođenih u } (n+1)\text{-voj generaciji}}{\text{srednji ukupan broj brzih neutrona oslobođenih u } n\text{-toj generaciji}}$$

ili prostije

$$K = \frac{\text{neutroni oslobođeni u } (n+1)\text{-voj generaciji}}{\text{neutroni oslobođeni u n-toj generaciji}}$$

odnosno

$$K = \frac{\text{neutroni oslobođeni u } (n+1)\text{-voj generaciji}}{\text{(neutroni zahvaćeni + neutroni pobegli) u } n\text{-toj generaciji}}$$

• Pretpostavimo da je n neutrona prisutno u reaktoru u početku i da ih mi dogovorno nazivamo »prvom generacijom«. U početku druge biće prisutno nK; u početku treće nK^2 itd., tako da će ukupan broj neutrona koji predstavljaju potomke prvih n biti, računajući i njih, $n + nK + nK^2 + nK^3 + \ldots$ Ako je $K < 1$, zbir ovoga reda je konačan i ravan $\frac{n}{1-K}$ i red konvergira. Po jezičnoj analogiji kaže se da je lančana reakcija *konvergentna*. U tom stanju reaktor se naziva *potkritičnim*. Ako je $K \geq 1$, zbir ovoga reda je beskonačan i red divergentan; kaže se da je lančana reakcija *divergentna*, a reaktor da je *natkritičan*.

Konačno ako je $K = 1$, lančana reakcija je u ravnoteži, ona se sama održava, a reaktor se tada naziva *kritičnim*.

Dakle, lančana reakcija ne može da se održava ukoliko nije $K \geq 1$. Za sve tipove reaktora postoji neka beskonačna zapremina fisibilnog materijala kojom se ostvaruje maksimalno mogući K_∞, pošto u tome slučaju nema bežanja neutrona. Vrednost K_∞ naziva se *koeficijentom multiplikacije za beskonačnu sredinu*. On predstavlja vrednost koju bi imao K ukoliko bi reaktor bio beskonačnih dimenzija. Može se dakle pisati:

$$K_\infty = \frac{\text{neutroni oslobođeni u } (n+1)\text{-voj generaciji}}{\text{neutroni zahvaćeni u } n\text{-toj generaciji}}$$

Prema izrazima za K i K_∞ ima se

$$\frac{K}{K_\infty} = \frac{\text{zahvaćeni neutroni}}{\text{(zahvaćeni neutroni + pobegli neutroni) podrazumevajući da se radi o } n\text{-toj generaciji}}$$

Katkad se stavlja odnos $\frac{K}{K_\infty} = P$, odnosno $K = K_\infty \cdot P$, što pokazuje da se K može posmatrati kao proizvod dvaju faktora, od kojih je jedan, K_∞, funkcija sastava i rasporeda materijala u reaktoru, a drugi, P, funkcija oblika i dimenzija celoga reaktora. Taj drugi faktor P određuje verovatnoću da neutroni neće pobeći iz stvarnog reaktora konačnih dimenzija i da će prema tome u njemu ostati. On definiše *verovatnoću nebežanja*. Faktor P je ravan 1 ako reaktor ima beskonačne dimenzije, uopšte uzevši, on je manji od 1, što će reći da je $K < K_\infty$.

Kritične dimenzije reaktora

ODREĐIVANJE KRITIČNOG RADIJUSA JEZGRA REAKTORA OBLIKA LOPTE. Ako je za određeni sastav i raspored materijala koeficijenat multiplikacije za beskonačnu sredinu K_∞ veći od jedinice, može se zaključiti da postoje određene dimenzije reaktora za koje je faktor P da je proizvod $K_\infty \cdot P$, odnosno K tačno ravan jedinici. Drugim rečima, postoje određene dimenzije reaktora za koje je proizvodnja neutrona u ravnoteži sa onima koji iščezavaju bežanjem ili zahvatom. Ta posebna veličina naziva se *kritičnom veličinom*. Ona dozvoljava da se definiše kritična zapremina i kritična masa za izvesne određene geometrijske oblike.

Pogledajmo loptu od fisibilnog materijala poluprečnika R. Broj fisija je proporcionalan zapremini, tj. $4/3\,\pi R^3$; bežanje neutrona je proporcionalno površini sfere, to će reći $4\Pi R^2$, a odnos zapremine i površine je proporcionalan sa R. Što je R veći biće manji procenat pobeglih neutrona, a verovatnoća P bliža jedinici. Ako je $K_\infty > 1$, postoji neka vrednost R_c, nazvana *kritičnim radijusom* za koju je verovatnoća P, koja je manja od jedinice, takva da daje $K_\infty \cdot P$, tj. K ravno 1. Ako je $R < R_c$, onda je $K < 1$, i lančana reakcija se ne može održati. Ako je $R > R_c$, onda je $K > 1$, i reakcija teži da se razvija, kaže se da ona divergira.

Za čist uran 235, R_c će biti blizu 3,5 cm.

Uopšte uzevši, jedna od veličina koja određuje kritične dimenzije je vrednost K_∞. Ako je taj koeficijenat dovoljno veći od 1, verovatnoća P može biti relativno mala, pa se kritični sistem (gde je $K_\infty \cdot P = 1$) može realizovati uz razumne dimenzije. Ukoliko je K_∞ veće, kritične dimenzije su manje. Ako je K_∞ samo neznatno veće od jedinice, što se dešava kada kao gorivo koristimo prirodni uran, reaktor može biti kritičan samo ako ima veoma velike dimenzije, tako da je faktor P neznatno manji od jedinice. Kada je koeficijenat multiplikacije za beskonačnu sredinu manji od jedinice, ne mogu se postići kritične dimenzije pa se ne može konstruisati reaktor u kome bi se održavala lančana reakcija.

Nezavisno od vrednosti K_∞, koja je osnovna, izvesni faktori određuju vrednost P, a preko njega i kritičnu veličinu. Jedan od ovih je *oblik* reaktora. Kako je sfera geometrijski oblik koji ima najmanju spoljnu površinu za datu zapreminu, verovatnoća da neutroni neće pobeći je maksimalna kada je reaktor sfernog oblika (za određeni sastav materijala), a kritična zapremina odnosno masa je minimalna. U praksi, sferni oblik je nepogodan kako za konstruisanje, tako i eksploataciju, tako da većina reaktora nije sfernog, već cilindričnog oblika. To ide na račun povećanja mase materijala koji se stavlja u jezgro. Masa je veća za cilindrični nego za sferni reaktor istog sastava. Ako se tome ne protive neki praktični razlozi, kao što je na primer slučaj kod reaktora male zapremine koji sadrži tečne materije, primenjuje se sferni oblik.

REAKTIVNOST. *Reaktivnošću* ρ nekoga reaktora naziva se izraz $\rho = \frac{K-1}{K}$, gde $K - 1$ predstavlja višak multiplikacije. Kako je u većini slučajeva K veoma blisko 1, može se pisati u prvoj aproksimaciji $\rho = K - 1$. Reaktivnost je prema tome pozitivna u natkritičnom režimu, ravna nuli u kritičnom, a negativna u potkritičnom režimu. Reaktivnost, koja je obično mala, meri se u jedinicama p. c. m. (francuski pour cent mille = na sto hiljada). Na primer, ako je $K = 1{,}004$ kažemo da je $\rho = 40$ pcm. Može se reći da svi faktori koji umanjuju K odgovaraju negativnoj reaktivnosti ili *antireaktivnosti*. Takav će biti među ostalima efekat otrova kakvi su ksenon ili samarijum, koji se stvaraju kao produkti fisije. Ove antireaktivnosti se menjaju sa vremenom, pošto je ksenon radioaktivan, a samarijum uništavaju neutroni koje on apsorbuje. One mogu varirati od nekoliko stotina do nekoliko hiljada pcm.

Upravljanje reaktorom

• **Puštanje u pogon**. Da bi reaktor radio na konstantnoj snazi, potrebno je i dovoljno da efektivni koeficijenat multiplikacije bude ravan 1. Istovremeno, reaktor ne može dostići određenu snagu ukoliko ne postoji mogućnost da se u periodu puštanja u pogon postigne $K > 1$. Brzina reakcije je proporcionalna gustini neutrona, to će reći broju neutrona prisutnih u jedinici zapremine u datom trenutku. Jedini praktični način da se ova gustina poveća do odgovarajuće vrednosti, tj. do odgovarajuće snage reaktora, je korišćenje divergentne lančane reakcije fisije, za koju je $K > 1$. Pri konstruisanju reaktor se do izvesne mere predimenzioniše, tj. daju mu se veće dimenzije od onih koje zahteva kritična veličina, kako bi se omogućilo da K bude veće od jedinice.

• **Sigurnost pri stajanju**. Sve dok uređaj nije spreman da se pusti u pogon, treba održavati $K < 1$. Da bi se praktično postigao ovaj rezultat, koriste se sredstva koja se razlikuju po principu dejstva, a u zavisnosti od energije neutrona, i mogu se u detaljima menjati od jednog do drugog reaktora. Ukoliko se radi o reaktoru sa termalnim neutronima, klasični metod se sastoji u tome da se u jezgro reaktora ugradi neki od materiala kao što su kadmijum, bor, natrijum i izvesni izotopi retkih zemalja, koji lako apsorbuju termalne neutrone. Veoma često ovi materijali su obrađeni u obliku šipki, ili su ubačeni u metalne cevi, koje se nazivaju *kontrolnim šipkama*. Kad je reaktor zaustavljen »šipke« su uvučene u jezgro reaktora do maksimuma njegovog hoda, gde zahvataju veliki procenat neutrona. Radi toga efektivni koeficijenat multiplikacije reaktora postaje mnogo manji od jedinice. U reaktoru ipak postoji određena gustina neutrona, kao posledica spontanih fisija, fisija kosmičkog porekla ili iz drugih izvora. Ova gustina je veoma mala i sve dok je reaktor potkritičan — tj. dok su kontrolne šipke uronjene — ona je konstantna.

• **Pokretanje šipki**. Postepenim izvlačenjem kontrolnih šipki iz jezgra reaktora smanjuje se zahvat neutrona i dostiže položaj kada K postaje veće od jedinice. Taj položaj uvek postoji, pošto je stvarna veličina reaktora veća od kritične veličine. Lančana reakcija postaje tada divergentna, neutronska populacija se povećava i jednog trenutka postiže željenu vrednost. Kao posledica toga željenu vrednost dostiže i snaga reaktora. Tada se kontrolne šipke ponovo delimično uvlače u reaktor kako bi K bilo tačno jednako jedinici. U tim uslovima, lančana reakcija je stacionarna, a oslobođena snaga ostaje konstantna, bar ukoliko se zanemare kasnije pojave efekata zatrovanja i temperature, koji u stvari obavezuju da se položaj šipki još malo izmeni. Shodno tome, snaga se može menjati podešavanjem K, tako da za izvesno vreme bude manje ili veće od jedinice. Koeficijenat multiplikacije K je veći od jedinice ukoliko su šipke izvučene izvan reaktora i snaga uređaja se povećava. Ovaj koeficijenat je manji od jedinice ako su šipke uronjene, a snaga reaktora se smanjuje. Da bi se reaktor brzo zaustavio, dovoljno je duboko uroniti kontrolne šipke, kako bi koeficijenat multiplikacije postao znatno manji od jedinice. Reakcija tada brzo konvergira, a gustina neutrona, kao i snaga brzo se smanjuju. Broj šipki može biti različit za razne reaktore. Moguće ih je klasifikovati u tri kategorije, prema ulozi koju treba da odigraju.

1. *Sigurnosne šipke* su osetljive, kako bi se mogle veoma brzo pokretati. Podešene su da znatno smanje faktor K kada se ubace u reaktor i time zaustave reaktor u najkraćem roku.

2. *Kompenzacione šipke*, kojima se s vremena na vreme menja položaj kako bi se vodilo računa o sporim promenama koeficijenta K, koje se javljaju kao posledica trošenja fisionog materijala ili nagomilavanja produkata fisije.

3. *Regulacione šipke*, koje služe za održavanje snage reaktora na određenoj vrednosti.

Razni tipovi reaktora

Klasifikacija reaktora

Postoji veliki broj tipova reaktora, ali svi oni imaju četiri osnovna dela: gorivo, moderator, sistem za odvođenje toplote ili sistem za hlađenje i zaštita. Moguće ih je klasifikovati na osnovu:

1. — *prirode neutrona koji obezbeđuju fisiju.* Tako postoje:
   — termalni reaktori (spori neutroni);
   — brzi reaktori (brzi neutroni);

2. — *prirode nuklearnog goriva.* Može se koristiti:
   — prirodni uran (ili oksid urana);
   — obogaćeni uran (malo obogaćeni: 5% urana 235, ili jako obogaćen: više od 40% urana 235);
   — plutonijum;

3. *prirode moderatora.* Moderator može biti:
   — grafit;
   — teška voda;
   — obična voda (ili laka voda);
   — berilijum;
   — organske materije;

4. *rasporeda nuklearnog goriva i moderatora.* U reaktorima nazvanim *heterogenima*, gorivo i moderator su odvojeni. U tom slučaju gorivo se javlja u obliku šipki koje okružuju moderator. U reaktorima nazvanim *homogenima*, gorivo i usporivač su izmešani (u zrnima čije su dimenzije manje od milimetra) ili je gorivo rastvoreno u moderatoru;

5. *prirodna sredstva za hlađenje.* Ovo može biti:
   — gas pod pritiskom (vazduh, azot, ugljendioksid, helijum);
   — tečnost (teška ili laka voda);
   — tečni metal (natrijum);

6. *namene uređaja.* Reaktor može da služi raznim namenama:
   — istraživanju (laboratorijski reaktor);
   — proizvodnji plutonijuma (proizvodni reaktor);
   — proizvodnji elektroenergije (energetski reaktor).

Ako se kombinuju razne mogućnosti, dolazi se do znatnog broja raznih tipova. Potrebno je još dodati da reflektori neutrona, uređaji za upravljanje i sistemi za zaštitu mogu biti veoma različiti kod raznih modela.

INTERES ZA PRIRODNI URAN. *Teorijski*, 1 kg urana 235 koji je pretrpeo fisiju proizvodi količinu toplote ekvivalentnu sagorevanju 2600 t uglja. Na osnovu toga 1 t prirodnog urana koja sadrži 7 kg urana 235 teorijski odgovara po energetskom ekvivalentu količini od 18.200 t uglja. Pri sadašnjem stanju tehnike ovaj ekvivalenat praktično iznosi samo 6000 t, što će reći da 1 kg urana 235 proizvodi količinu toplote ekvivalentnu sagorevanju 850 t uglja.

SADAŠNJE TENDENCIJE. Moderator koji se koristi u slučaju urana 235 treba da bude slab apsorber neutrona. Ekonomski i tehnološki razlozi praktično ograničavaju izbor na grafit i tešku vodu. Sa grafitom faktor multiplikacije je jedva nešto veći od 1, i reaktivnost je mala. Da bi se do maksimuma smanjilo bežanje neutrona, bilo je neophodno povećati dimenzije jezgra, koje može dostići zapreminu od 1000 m^3, što odgovara količini od 200 do 300 t metalnog urana. Sa teškom vodom bilans neutrona je povoljniji, pa je kritična veličina reaktora po zapremini 10 puta manja nego kad je moderator od grafita. Ovo omogućuje izgradnju nuklearnih elektrana srednje snage. No kako je teška voda skuplja od grafita, prišlo se korišćenju urana u obliku oksida, koji dozvoljava više temperature nego uran metal koji se isključivo koristi sa grafitom.

• *Toplotni medijum* treba da slabo apsorbuje neutrone i ima povoljne osobine za prenošenje toplote. To će biti ugljendioksid ili helijum.

• *Materijali za oblaganje goriva* podležu istim kriterijumima. Radi toga se koriste berilijum, magnezijum, cirkonijum ili aluminijum koji su slabi apsorberi neutrona. Koristi se takođe i nerđajući čelik.

Primedbe

• Kod reaktora tipa prirodni uran — grafit vredno je istaći značaj zapremine instalacije i težine upotrebljenog urana. Da bi se smanjila cena postrojenja obično se uzima ugljendioksid kao rashladni medijum, a magnezijum za oblogu goriva. Cilj kome se teži je da se odvede maksimum toplote. Sa jedne strane želi se postići što viša temperatura, a sa druge povećati protok rashladnog medijuma izražen u težini. Za prvi cilj postoji ograničenje radi ponašanja magnezijumske obloge, pošto ovaj metal ima relativno nisku tačku topljenja (650°C). Za drugi cilj postoji ograničenje u odnosu na pritisak ugljendioksida. Praktično, ne prelazi se nikad 20—25 kg/cm^2. Međutim, kada bi se realizovao sud *pod pritiskom* od prednapregnutog betona, a ne od čeličnog lima (ovaj mora biti debeo 10 cm da izdrži navedene pritiske), mogao bi se dostići i prevazići pritisak od 40 kg/cm^2. U budućnosti ovaj tip reaktora dozvolio bi realizovanje postrojenja visoke snage, koja bi lako prelazila i 1000 MW.

• Kod reaktora tipa prirodni uran — teška voda, postoji tendencija da se kao materijal za oblogu goriva koristi cirkonijum ili berilijum. Međutim, oni su skuplji od magnezijuma, i njihova primena još nije potpuno usavršena. S obzirom da rashladni medijum treba da bude i što slabiji apsorber, može se birati između ugljendioksida CO_2, i teške vode D_2O.

KORIŠĆENJE REAKTORA SA PRIRODNIM URANOM. Reaktori sa prirodnim uranom služe raznim namenama. Prva je studija neutrona, njihove difuzije i nuklearnih reakcija, upoznavanje otpornosti materijala prema raznim zračenjima i konačno istraživanja problema hlađenja, kako bi se konstruisali još snažniji reaktori. Druga je proizvodnja radioaktivnih izotopa. Kanadski reaktori, koji su među prvima imali veoma visok fluks neutrona, mogli su se specijalizovati u proizvodnji izvora radioaktivnog kobalta velikog intenziteta. Isti je slučaj sa američkim reaktorom u Brukhevenu i engleskim reaktorima u Harvelu. Francuski reaktori proizvode sada veštačke radioizotope u značajnim količinama. Treća namena je proizvodnja plutonijuma.

U Francuskoj, prvi istraživački reaktori bili su sa teškom vodom. EL 1 ili ZOE postavljen je u tvrđavi Šatijon u Fontenej-o-Rozu. Bio je reaktor male snage, hlađen vazdušnom strujom i toplotnim zračenjem. Uran je korišćen u obliku presovanih pastila uran-oksida, složenih u šipke koje su vertikalno uronjene u tešku vodu. Horizontalni kanali prolaze kroz reaktorski sud i služe za ozračivanje uzoraka. Sud sa teškom vodom (6 tona) okružen je grafitnim reflektorom i betonom. U početku ovaj reaktor je radio na konstantnoj snazi od oko 5 KW. U Sakleu se nalazi teškovodni reaktor EL-3. Tri reaktora za proizvodnju plutonijuma u Markulu su tipa uran — grafit — CO_2, isto kao i velike elektrane E.D.F.-a koje proizvode elektroenergiju.

Reaktori sa obogaćenim uranom

Ako se želi smanjiti količina moderatora, potrebno je povećati količinu fisionog goriva, jer ukoliko su neutroni manje usporeni, utoliko je potrebno raspolagati sa više fisibilnih atoma. Umesto 0,7% urana 235 na 99,38% urana 238 povećava se količina izotopa U235. Ovakvi reaktori imaju manje zapremine, pošto sadrže manje moderatora, a više urana se koristi u reakciji.

PREDNOSTI OBOGAĆENOG URANA. Prednosti su veoma značajne.

• Praktično uzevši, 1 kg urana 235 ekvivalentan je sa energetske tačke gledišta jednoj hiljadi tona uglja. Da bi se odvojio 1 kg urana 235 tehnikom gasne difuzije potrebno je utrošiti količinu energije reda 1000 MWh. Međutim, ovaj kilogram omogućava da se dobije, preko fenomena fisije, određena količina energije. U 1 kg urana 235 ima

$$\frac{6{,}10^{23}}{235} \times 1000 \# 25.10^{23} \text{ jezgara.}$$

Razbijanjem jednog jezgra oslobađa se energija od 200 MeV. Dakle, 25.10^{23} jezgara oslobodiće $25.10^{23} \cdot 200 = 50.10^{23}$ MeV-a energije, što iznosi između 22 i 23.10^3 MWh. Međutim to je teorijska vrednost. Praktično, bez obnavljanja obogaćenog goriva, reaktor u proseku oslobađa trećinu ove energije, dakle 7.000—8.000 MWh. Bilans operacije je dobitak od 6.000 MWh. Pošto jedan kg uglja daje oko 7 do 8 KWh, to znači da bi se proizvelo 6.000 MWh, tj. 6.10^6 KWh, bilo bi potrebno upotrebiti nekih 850 tona uglja ili u globalu hiljadu tona uglja.

• Uran lako obezbeđuje lančanu reakciju. Pošto nema gubitaka neutrona u uranu 238, nije šteta ako se ovi gube u strukturnim materijalima u reaktoru (obloge goriva, cevovodi) i u usporivaču neutrona. U tom slučaju može se koristiti obična ili laka voda, a ista služi sistemu za hlađenje.

SADAŠNJE TENDENCIJE. Dva osnovna tipa reaktora koriste ovaj sistem: reaktori sa vodom pod pritiskom (Pressurized Water Reactor, ili PWR) i reaktori sa vodom koja ključa (Boiling Water Reactor, ili BWR).

U PWR tipu reaktor se hladi zatvorenom cirkulacijom vode koja se održava pod pritiskom u tečnom stanju. Pri izlasku iz reaktora, voda prolazi kroz razmenjivač toplote, predaje toplotu, a zatim je prihvata pumpa, koja je vraća u reaktor. Voda iz sekundarnog ciklusa normalnim procesom isparava i pokreće turbinu. Kod ovog tipa reaktora razmena toplote je dobra, ali se javljaju dve teškoće: korozija i pritisak. Koristi se demineralizovana voda (da bi se izbegle pojave disocijacije vode na vodonik i kiseonik), a ova je korodivna, tako da za cevovode treba koristiti nerđajući čelik. Pored toga, potrebno je raditi na povišenom pritisku. Za 230° C potreban je pritisak od 85 kg/cm², za 270°C treba dostići 140 kg/cm².

Konačno, korišćenje obogaćenog urana kao fisibilnog goriva dozvoljava upotrebu obične vode kao moderatora, dok prirodni uran zahteva upotrebu teške vode ili grafita. Ovu prednost umanjuje, s jedne strane, neophodnost postrojenja za odvajanje izotopa, a sa druge, organizacija specifične industrije koju zahteva ova proizvodnja.

KORIŠĆENJE REAKTORA SA OBOGAĆENIM URANOM. Reaktori sa prirodnim uranom imaju znatne dimenzije. Postoje slučajevi kada treba smanjiti do maksimuma zapreminu pa prema tome i težinu uređaja, naročito kod problema propulzije. Kod reaktora basenskog tipa, koji se koriste kao poslednji model istraživačkih reaktora i reaktora za obuku, uran je obogaćen do 20% ; gorivni elementi su uronjeni u rezervoar ili basen sa vodom, koja služi istovremeno kao moderator, rashladno sredstvo i elemenat zaštite.

Oplodni reaktori ili brideri

Princip. Posle izvesnog vremena produkti fisije u reaktoru sa prirodnim uranom počinju da ga zatrovavaju. Istovremeno, jezgra urana 238, kojih ima u velikom broju, zahvatila su neutrone i transformisala se u plutonijum. Dok su produkti fisije u datom trenutku smetnja, plutonijum je dragocen. Ako bi se ostavio u reaktoru, moguće je naći uslove u kojima, svaki put kada nestane jezgro urana 235, jedan neutron deluje na jezgro urana 238 i proizvodi plutonijum. S jedne strane, troši se jedno gorivo (U 235), ali se dobija drugo, plutonijum.

Konverzioni odnos i konverzioni prinos. Razbijanje jednog jezgra urana 235 jednim upadnim neutronom proizvede se n novih neutrona. Jedan broj među njima, L, izgubljen je iz raznih razloga (bežanje, zahvat itd.). Broj preostalih neutrona je dakle n-L. Da bi se održala lančana reakcija, treba unapred rezervisati jedan od raspoloživih neutrona. Konačno ih ostaje $n - L - 1$ po jednom polaznom neutronu. Ako se ti neutroni iskoriste za bombardovanje urana 238, proizvede se $n - L - 1$ jezgara fisibilnog plutonijuma 239. **Konverzionim odnosom** C naziva se veličina

$$C = n - L - 1 = \frac{\text{proizvedena fisibilna jezgra}}{\text{utrošena fisibilna jezgra}}$$

Konverzionim prinosom G naziva se povećanje broja fisibilnih jezgara u odnosu na jedno utrošeno fisibilno jezgro. Broj proizvedenih fisibilnih jezgara na jedno utrošeno fisibilno jezgro je C. Povećanje broja fisibilnih jezgara G je dakle $C - 1$, tj. $G = C - 1 = n - 2 - L$. Za jedan reaktor kaže se da je oplodni (ili brider) kada mu je koeficijenat G veći od jedan; to jest kada je $n > 2 + L$. Za to je potrebno da fisija proizvede broj neutrona veći od 2. To je slučaj sa uranom 233 (U 233), uranom 235 (U 235) i plutonijumom 239 (Pu 239) za termalne i brze neutrone. Međutim, to nije slučaj sa uranom 235 i plutonijumom 239 za intermedijarne neutrone, pa je za slučaj plutonijuma preporučljiva upotreba brzih neutrona.

PERSPEKTIVE ZA BUDUĆNOST. Sigurno je da će reaktori tipa bridera biti veoma interesantni za buduće korišćenje atomske energije, pošto oni dozvoljavaju uz proizvodnju energije i regeneraciju goriva. Umesto da se kao gorivo za proizvodnju energije koristi samo 0,7% urana 235, preko plutonijuma će postati dostupan celokupan prirodni uran. Sa druge strane, postoji jedan elemenat o kome se do sada malo govorilo i koji će dobiti veliki značaj. To je torijum, koji je bar toliko raširen na Zemlji kao i uran. U stvari, ako se u brider stavi torijum, zahvatom neutrona proizvešće se uran 233.

Proizvedeni uran 233 je po vrednosti jednak plutonijumu stvorenom preko urana 238. Tako bi se stvorio novi izvor energije, pošto bi se mogli graditi reaktori i sa torijumom obogaćenim uranom 233.

Nuklearno gorivo i elementi za usporavanje

UVOD. Sadašnja nuklearna goriva jesu:

— uran koji se može koristiti u obliku prirodnog urana (uran 235 je fisibilni materijal koji reaguje sa termalnim neutronima; nalazi se u prirodnom uranu u odnosu 1/140; da bi se povećao taj odnos, prirodni uran se može obogatiti uranom 235);

— plutonijum 239;

— uran 233 koji se može dobiti polazeći od torijuma 232. Uran 238 i torijum 232 nekad se nazivaju *fertilnim materijama* pošto omogućuju da se proizvedu *fisione* materije: uran 233 i plutonijum 239. Reaktor koji transformiše feritne materije u fisione je *konvertor*, a kada je proizvedena fisiona materija plutonijum, imamo *reaktor proizvođač plutonijuma*.

Uran

Uran je poslednji prirodni elemenat Mendeljejevog sistema (br. 92); otkrio ga je 1789. Nemac Klaprot (Klaproth), a izolovao 1843. Francuz Peligo (Peligot).

OSOBINE I UPOTREBA METALNOG URANA

FIZIČKE OSOBINE. Uran je beo metal, veoma rastegljiv, po izgledu podseća na srebro; brzo tamni na vazduhu usled oksidacije. Stoga se mora hladiti u inertnoj atmosferi. U obliku svežeg praha može se spontano zapaliti. Topi se na oko 1.650°C i kristališe u kubnom sistemu. Specifična težina mu je 18,9, valenca 6. Postoji u tri alotropske vrste. To je radioaktivna materija koja sukcesivnim raspadanjem stvara čitav niz drugih elemenata, takođe radioaktivnih, od kojih je najvažniji radijum. U mineralima, uran i radijum uvek se nalaze združeni u srazmeri od 3 miliona delova urana prema jednom delu radijuma. *Prirodni* uran sadrži tri izotopa.

IZOTOPI PRIRODNOG URANA

Izotop	Procenat	Perioda
238	99,276	$4{,}5 \cdot 10^9$ god.
235	0,718	$710 \cdot 10^6$ god.
234	0,006	$250 \cdot 10^3$ god.

Poznati su takođe i drugi veštački izotopi urana. Njihov maseni broj (A) nalazi se između 227 i 240.

HEMIJSKE OSOBINE. Sa kiseonikom uran stvara četiri oksida: mrki UO_2, narandžasti UO_3, bledožuti UO_4 i zeleni U_3O_8. Kiseline napadaju uran. Sa hlorovodoničnom kiselinom dobijaju se tri hlorida (UCL_3, UCL_4, UCL_5), a sa sumporom dva sulfata istog hemijskog sastava ali raznog stepena hidratizacije (4 i 8 H_2O). Sa azotnom kiselinom, koja je oksidaciono sredstvo, stvara se so uranila $UO_2(NO_3)_2$. $6H_2O$.

UPOTREBA. Pre prvog svetskog rata minerali urana koristili su se da se iz njih ekstrahuje radijum, koji se primenjivao u medicini za lečenje raka. Posle drugog svetskog rata situacija se izmenila, pa je uran postao osnovni elemenat. Uran metal nije ranije imao nikakvu industrijsku primenu. Nasuprot tome, neki njegovi oksidi i soli koristili su se u industriji keramike i stakla za bojenje stakla i emajla, naročito žuto-narandžasti natrijum uranat $Na_2U_2O_7$, zatim u fotografiji kao pojačivač, u metalurgiji čelika u obliku fero-urana i pokatkad u analitičkoj hemiji u obliku hitrata.

PROIZVODNJA URANA METALA

LEŽIŠTA URANA. Ova su ležišta široko rasprostranjena u svetu. Međutim, sadržaj urana u rudi veoma je različit, počev od najbogatijih koje sadrže nekoliko desetina procenata do najsiromašnijih sa nekoliko promila. Ležišta urana se javljaju u dva dosta različita oblika. S jedne strane to su ležišta u obliku žice, koja daju rudu sa visokim procentom urana, sa druge sedimentna ležišta, sa niskim procentom, ali znatna po količinama. U prvim ležištima, najvažnije su oksidne žice uranila, od kojih je najpoznatija pehblenda. U drugim ležištima uran se nalazi u obliku jedinjenja sa velikim brojem elemenata, koja se javljaju u veoma različitim mineraloškim oblicima (karbonati, sulfati, fosfati, silikati). Na primer, autunit je fosfat urana i kalcijuma. Danas je poznato stotinak raznih minerala urana koji se ne mogu svi eksploatisati. Pre drugog svetskog rata eksploatacija je bila ograničena (Češka, Kolorado, Katanga, Kanada). Danas, najvažnije rezerve nalaze se u Kanadi i SAD. Prvog januara 1964. rezerve urana koje se mogu eksploatisati postojećim postrojenjima i po prihvatljivim cenama procenjene su na oko 600.000 tona. Međutim, količine urana koji se nalazi u morima i okeanima ceni se na 4 milijarde tona.

Već više godina Francuska vrši prospekciju i istraživanje u prvom redu pehblende i autunita. Ležišta koja se eksploatišu su podeljena u tri oblasti: Vandeja (Vandee), Limuzen (Limousin) i Forez (Forez). Značajna ležišta su otkrivena i u Erolu (Herault). Francuska proizvodnja dostiže oko 1.500 tona nuklearno čistog uran-metala godišnje. Poznate francuske rezerve u mineralima dozvoljavaju da se količina metala koji se može izvući procene na 50.000 tona.

PROIZVODNJA METALNOG URANA. Ova proizvodnja, duga i složena, sadrži dve osnovne faze:

1. **Ekstrakcije i obogaćenje minerala**. Uranove rude mogu biti veoma različite po sastavu. Radi toga se one obično obogaćuju na licu mesta i prevode u koncentrat. Postupci koncentracije su različiti u zavisnosti od bogatstva i sastava rude. Oni se opšte uzevši sastoje u upotrebi jevtinih reaktiva, kao što su natrijum karbonat ili sumporna kiselina. Ekonomski uslovi koncentracije poboljšani su u toku poslednjih godina zahvaljujući mehanizaciji operacija i korišćenju određenih modernih postupaka kao što su izmenjivači jona i ekstrakcija pomoću rastvarača. Danas se izvlači uran iz ležišta koja ga sadrže svega 0,1%. Koncentrati koji sadrže do 90% oksida urana proizvode se iz minerala koji sadrže manje od 1 kg urana po toni.

2. **Hemijska obrada**. Obogaćeni minerali, pošto su prerađeni u koncentrat koji sadrži oko 30% uranovog oksida UO_2, šalju se [ili u Buše (Bouchet) pored Pariza ili u Malvezi (Malvezy) pored Narbona (Narbonne)] na obradu. Tu se [u ove dve fabrike] koncentrat podvrgava dejstvu azotne kiseline da bi se dobio uranil-nitrat:

$$UO_2 + 4HNO_3 = UO_2(NO_3)_2 + 2H_2O + 2NO_2.$$

Na 80°C nitrat se meša sa natrijum karbonatom da bi se heksavalentni uran preveo u dupli karbonat natrijuma i uranila, koji je rastvorljiv u alkalnim sredinama. Time se eliminiše veliki deo metalnih nečistoća, koje se talože u obliku nerastvorljivih soli. Posle filtriranja na toplo, karbonat se tretira sumpornom kiselinom.

$$2Na_4(CO_3)_3UO_2 + 6H_2SO_4 = 2UO_2SO_4 + 6CO_2 + \\ + Na_2SO_4 + 6H_2O.$$

Uranil sulfat u kontaktu sa kaustičnom sodom taloži se u obliku natrijum uranata koji se ne rastvara u vodi.

$$2UO_2SO_4 + 6NaOH = 2Na_2SO_4 + Na_2U_2O_7 + \\ + 3H_2O.$$

Ceo sadržaj se filtrira da bi se odvojio uranat. Ovaj se ponovo rastvara u azotnoj kiselini kako bi se dobio uranil nitrat $UO_2(NO_3)_2$, koji je rastvorljiv u tributil-fosfatu. Ovo rastvaranje u organskom rastvaraču je selektivno i omogućuje da se dobije izvanredno čista so. Zatim se uranil nitrat podvrgava dejstvu amonijaka i vodonik-peroksida, kojima se taloži uran-oksid u obliku bledožutog peroksida UO_4, koji se ne rastvara u kiselinama i sadrži samo nekoliko p.p.m. (delova na milion) nečistoća

$$UO_2(NO_3)_2 + H_2O_2 + 3HN_4OH = UO_4 + \\ + 2NH_4NO_3 + 2H_2O$$

Zagrevanjem na 350°C peroksid se pretvara u anhidrid urana UO_3 narandžaste boje. On se redukuje vodonikom da se dobije mrki UO_2. Ovaj poslednji se rastvara u fluorovodoničnoj kiselini da se dobije tetrafluorid urana, koji se posle filtriranja suši.

$$UO_2 + 4HF = UF_4 + 2H_2O.$$

Da bi se dobio metal, fluorid se redukuje metalnim kalcijumom u pećima sa inertnom atmosferom

$$UF_4 + 2Ca = 2CaF_2 + U.$$

Posle kalcitermije metal se hladi tri dana u atmosferi argona. Dobijeni ingoti teže oko 90 kg i sadrže 98% urana.

Metalni uran koji se koristi kao nuklearno gorivo primenjuje se u obliku šipki i poluga prečnika nekoliko centimetara i raznih dužina. Pre upotrebe prevlači se metalnom košuljicom. Stavljanje košuljice ima dvostruku prednost, jer sprečava koroziju goriva i rasipanje produkata fisije. Dobra košuljica za reaktor na spore neutrone mora imati mali efektivni presek za neutrone, dobru termičku provodljivost kako bi se dozvolilo pogodno hlađenje i, konačno, koeficijenat širenja u saglasnosti sa uranom. Za male reaktore koji rade na niskoj temperaturi široko se koristi aluminijum. Za reaktore koji rade na višim temperaturama koristi se nerđajući čelik, magnezijum, berilijum i cirkonijum.

Kao gorivo koristi se i uran oksid UO_2, koji je otporniji na koroziju od urana.

URAN 235

IZDVAJANJE URANA 235 IZ PRIRODNOG URANA. Uran 235 se nalazi u prirodnom uranu u srazmeri od 0,7%, što će reći da on predstavlja samo jedan deo na 140. Da bi se izdvojio nije moguće koristiti razlike u hemijskim osobinama (pošto izotopi istoga elementa imaju iste hemijske osobine), već razlike u fizičkim osobinama. Treba voditi računa da izotop 235 ima u jezgru 3 neutrona manje nego izotop 238, pa je »nešto lakši«. Moguće je primeniti sledeće postupke.

1. **Elektromagnetska separacija**. Ova metoda, koja se poziva na masenu spektrografiju, zasnovana je na sledećem principu: čestice naboja e i mase m, kada se ubrzaju u električnom polju elektrostatičkog napona V, imaju trajektoriju koja je u magnetnom polju H krug čiji je poluprečnik određen relacijom

$$r = \frac{1}{H}\sqrt{2\frac{mV}{e}}$$

Ako čestice imaju isti naboj ali različite mase, uz jednake ostale uslove, dobiće se razne vrednosti za r. Drugim rečima, poluprečnik i krivine trajektorije biće različiti, pa je moguće jone različitih masa sakupljati na odvojenim mestima. Tako se mogu izotopi 235 i 238 razdvojiti u jednoj operaciji. Međutim, prinos je nizak. U postrojenjima velikog kapaciteta potrebno je više uzastopnih stepena separacije da bi se dobio čist uran 235.

2. **Termodifuzija**. Ako se u gasnoj sredini sastavljenoj od dve različite vrste molekula ili dva izotopa stvori temperaturna razlika, konstatuje se da se teški molekuli skupljaju u hladnim oblastima, dok se laki molekuli nagomilavaju u toplim. Postupak se u opštem slučaju izvodi u dugoj vertikalnoj cevi čiji se unutrašnji zid hladi, a kroz čiju je sredinu aksijalno provučena žica koja se zagreva na 500—600°C. Pri ovim uslovima laki izotop difunduje od zida prema žici. Konvekciona strujanja uslovljavaju da se gas bogat lakim izotopom diže u blizini vruće žice. Jedna kolona može da ima veoma veliki broj stepeni obogaćenja. U slučaju urana postupak se izvodi heksafluoridom urana UF_6. Postrojenje ovoga tipa bilo je svojevremeno montirano u Ouk Ridžu u SAD.

3. **Gasna difuzija**. Brzina difuzije V nekoga gasa, ili protok ovog gasa, kroz poroznu membranu obrnuto je proporcionalna kvadratnom korenu njegove molekularne mase $V = \sqrt{A\frac{T}{M}}$.

A je određena kanstanta, T temperatura a M molekularna težina.

Ako gas sadrži 2 izotopa mase M_1 i M_2, laki izotop prolazi brže pa će gas koji difunduje kroz membranu biti bogatiji lakim izotopom. Separacioni faktor dat odnosom koncentracija dvaju izotopa posle i pre prolaza biće:

$$\alpha = \frac{V_1}{V_2} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}}.$$

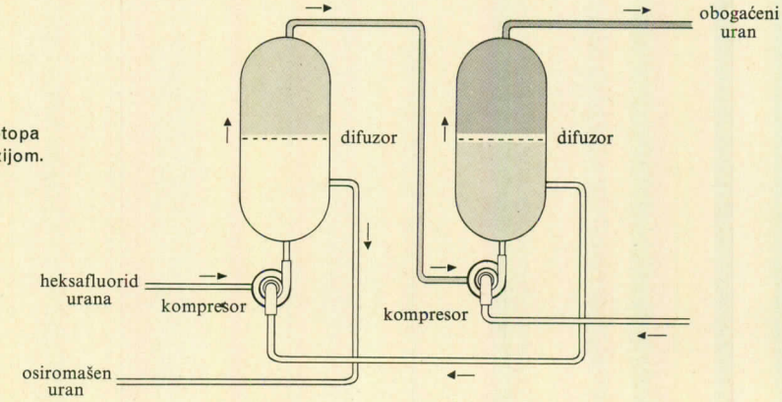
Kao posrednik koristi se heksafluorid urana UF_6. Ovaj u stvari sadrži dva heksafluorida: $U_{235}F_6$ i $U_{238}F_6$ čije su molekularne mase $M_1 = 349$ i $M_2 = 352$, pošto je atomska masa fluora 19. Za α dobija se vrednost $\alpha = \frac{352}{349} = 1{,}0043$. *Faktorom obogaćenja* naziva se veličina $\varepsilon = \alpha - 1$. Dakle, za jedan prolaz kroz membranu faktor obogaćenja ε je:

$$\varepsilon = \alpha - 1 = 0{,}004\,3, \quad \text{ili } 4/1\,000$$

To je teorijska vrednost. Praktično treba voditi računa o tehnološkim mogućnostima koje faktor obogaćenja svode na polovinu. Tako u praksi, posle prolaska kroz poroznu barijeru obogaćenje uranom 235 ne prelazi 2/1 000. Da bi se dobilo traženo obogaćenje, treba umnožiti broj stepena obogaćenja. Ako se želi konačno obogaćenje 90%, potrebno je 3 000 stepeni. Svaki stepen sadrži difuzor koji predstavlja porozne separacione barijere, kompresor koji dovodi gas u difuzor i izmenjivač toplote koji hladi gas pre njegovog ulaska u difuzor. Gasna struja koja ulazi u difuzor razdvaja se na dva dela. Prva, koja je prošla kroz barijeru, obogaćena je uranom 235. Nju prihvata kompresor gornjeg stepena. Druga struja, osiromašena uranom 235, vraća se u kompresor koji napaja prethodni stepen.

TEŠKOĆE U REALIZACIJI. Realizacija jednog postrojenja za izotopsku separaciju rađa određeni broj teškoća.

• *Heksafluorid urana* UF_6 je posrednik kome se mora pribeći, pošto je to jedino jedinjenje urana koje postoji u gasnom stanju na prihvatljivoj temperaturi. Međutim, on je veoma težak za rad. Pošto očvršćava na 57°C, treba raditi na oko 65°C pa se zato sve operacije obavljaju u termostatskoj instalaciji. Heksafluorid UF_6 se pretvara u tetrafluorid koji je čvrst i koji može začepiti otvore pora poroznih barijera. Ova transformacija se izbegava time što se pri fabrikaciji postrojenja koriste laki metali. Druga teškoća, najvažnija, dolazi otuda što se mora apsolutno izbeći vlažnost



Principi odvajanja izotopa urana gasnom difuzijom.

u svim oblicima, pošto heksafluorid UF_6 sa vodom daje čvrsti oksifluorid i fluorovodoničnu kiselinu. Neophodno je radi toga da se radi u veoma izraženom vakuumu i da se obezbedi potpunije zaptivanje instalacija.

• *Problemi zaptivanja* su najveći problemi u tehnologiji zasnovanoj na principu gasne difuzije. Ovi zahtevi nemaju analogije u drugim sektorima industrije. Posebno su važni problemi spojeva koji treba da obezbede vakuum i da budu otporni na koroziju heksafluorida UF_6. Oni su rešeni eksperimentalno, pa je razvijeno više modela spojeva od tankog metala, teflona ili specijalnog kaučuka.

• *Porozne membrane* ili *barijere* moraju biti otporne na koroziju heksafluorida UF_6, koja bi imala za posledice razaranje barijera ili, opštije, progresivno zatvaranje njihovih brojnih pora. Dimenzije prečnika tih pora su reda veličina stotog dela mikrona, tj. 0,00001 mm; ima ih više milijardi po kvadratnom centimetru. Kako heksafluorid UF_6 prolazi više hiljada puta kroz barijera prirodno je da jedno veliko postrojenje sadrži više hektara poroznih barijera. Sa druge strane, da bi se dobio dobar prinos, barijere treba da budu veoma tanke, reda veličine desetog dela milimetra. Njihova mehanička otpornost treba da bude dobra kako ih razlika pritiska od jedne atmosfere ne bi oštetila.

• *Kompresori* moraju biti savršeno zaptiveni, pošto heksafluorid UF_6 napada ulja i masti koje se obično koriste u industriji. Konačno, u postrojenju za separaciju izotopa, najveći deo električne energije troši se na rad kompresora. Iskorišćenje tih uređaja treba stoga posebno pažljivo analizirati.

URAN 233

Uran 233 ne postoji u prirodi. To je jedan od veštačkih izotopa urana, koji se ne nalazi u prirodnom uranu, već se dobija ozračivanjem torijuma 232 u nuklearnim reaktorima. Ozračene šipke torijuma oslobađaju se magnezijumske košuljice njenim rastvaranjem u razblaženoj azotnoj kiselini. Posle toga torijum se podvrgava dejstvu ključajuće azotne kiseline, koja stvara torijum nitrat. Grejanjem uklanja se višak azotne kiseline. Dobivena so se rastvara u vodi. Rastvor, čija se koncentracija podesi po potrebi, podvrgava se dejstvu tributil fosfata i aluminijum nitrata u bateriji mešača-odvajača, čime se odvaja uran od torijuma. U drugoj bateriji, novo rastvaranje u azotnoj kiselini omogućuje dalje odvajanje. Konačna dekontaminacija postiže se u jonoizmenjivačkim kolonama. Katjonska kolona obezbeđuje prevođenje nitratne sredine u hloridnu, a anjonska kolona završava konačno prečišćavanje urana 233.

Plutonijum

Plutonijum pripada porodici veštačkih transurana (br. 94 u periodnom sistemu). U prirodi, dakle, ne postoje plutonijumovi minerali.

ISTORIJA I PRINCIP PROIZVODNJE

Plutonijum je otkrila jedna američka ekipa 1940. u Berkeliskoj (Berkeley) laboratoriji. Tokom drugog svetskog rata Amerikanci su u Henfordu u državi Vašington izgradili jednu fabriku plutonijuma, koja im je omogućila da proizvedu prve nuklearne bombe. Plutonijum se stvara u nuklearnim reaktorima. Da bi se plutonijum odvojio od urana, šipke prirodnog urana koje su jako ozračene podvrgavaju se komplikovanim hemijskim procesima. Tehnika odvajanja je veoma delikatna i dugo vremena je bila tajna. Zasniva se na činjenici da je fluorid plutonijuma nerastvorljiv u višku fluorovodonične kiseline, dok je fluorid urana rastvorljiv. Dok se uran 235 dobija iz prirodnog urana postupcima koji se koriste razlikama u fizičkim osobinama izotopa, plutonijum se dobija od urana 238 hemijskim putem. U nuklearnim reaktorima neka jezgra plutonijuma 239 mogu se pretvoriti u plutonijum 240 pošto ih stalno bombarduju neutroni. Ovaj je stabilniji od plutonijuma 239 i ne podleže fisiji dejstvom sporih neutrona.

OSOBINE I PRIMENA PLUTONIJUMA

FIZIČKE OSOBINE. Ovaj elemenat se javlja u formi belog metala, čija je srednja specifična masa 15,6. Poseduje šest alotropskih oblika, čije su tačke topljenja između 190°C i 640°C. U svim oblicima je rastegljiv. Plutonijum se čudno ponaša. Na primer, ustanovljeno je da se ravne površine metala zaobljuju, da se cilindri zakrivljuju a kocka pretvara u kuglu. Ovi fenomeni se dešavaju bez vidljivog spoljnjeg uzroka. Plutonijum se brzo oksidiše na vazduhu. Ima veliku toksičnost. U vazduhu se ne sme dozvoliti koncentracija veća od 2.10^{-12} gr/m³.

HEMIJSKE OSOBINE. Plutonijum oksidiše na vlažnom vazduhu dajući okside PuO i PuO_2. Napadaju ga sumporna i hlorovodonična kiselina, a azotna kiselina na njega ne deluje. Najpoznatije soli trovalentnog plutonijuma zelene su boje: hlorid $PuCl_3$, bromid, jodid, fluorid i oksalat. Četvorovalentne soli su žute boje i odgovaraju oksidu PuO_2. Nitrat $Pu(NO_3)_4$, hlorid $PuCl_4$ i oksalat $Pu(C_2O_4)_2$, $6H_2O$ su žutozeleni, a sulfat $Pu(SO_4)_2$ je ružičast.

Upotreba. Plutonijum služi za proizvodnju nuklearnog oružja, ali se može koristiti i u određenim reaktorima. Izvanredno je nuklearno gorivo. Reaktor koji radi na plutonijum uz prisustvo prirodnog urana rađa dovoljno neutrona ne samo za produženje lančane reakcije već i za ponovno stvaranje plutonijuma dejstvom na uran 238. Teorijski, gorivo se na taj način regeneriše. To je princip na kome rade brideri.

Torijum

Torijum je prirodni elemenat (redni broj 90 Mendeljejeve skale). Otkrio ga je 1828. Šveđanin Jakob Berzelijus.

FIZIČKE OSOBINE. Torijum je siv metal, gustina mu je 12,16, topi se na oko 1 800° C, četvorovalentan je. Spada u radioaktivne materije. Poznato je 8 prirodnih izotopa čiji se maseni brojevi nalaze između 229 i 236 ($229 < A < 236$) i 6 radioaktivnih izotopa, čiji se maseni brojevi nalaze između 227 i 237 ($227 < A < 237$).

HEMIJSKE OSOBINE. U praškastom obliku torijum je veoma opasan i brzo se pali u prisustvu kiseonika. U obliku šipki postaje pasivan i može se obrađivati klasičnim mašinama. Rastvara se u hlorovodoničnoj kiselini, sumpornoj kiselini i carskoj vodi. Nasuprot tome, malo se rastvara u azotnoj kiselini. Soli torijuma su bele ili bezbojne. Hloridi, bromidi i nitrati rastvaraju se u vodi. Ostale soli su nerastvorljive.

UPOTREBA. Torijum tek počinje da se primenjuje u proizvodnji nuklearne energije. U toku su obimni radovi da se realizuje njegova upotreba u ovoj oblasti. Jedna od osnovnih klasičnih primena torijuma je fabrikacija čarapica za gasno osvetljenje, tipa Auerove čarapice. Tkanina se impregnira rastvorom torijum i cer nitrata. Kada čarapica sagori, nitrati se razlože u okside koji intenzivno svetle kada se sagorevanjem gasa zagreju na visoku temperaturu. Značajan razvoj metalurgije praha stvara mogućnosti novih primena ovoga metala. Fabrikacija legura velike tvrdoće iz dana u dan postaje sve aktuelnija. Lake legure magnezijuma i torijuma primenjuju se u konstrukciji izvesnih nadzvučnih aviona, kao i pri fabrikaciji sastavnih delova raketa i veštačkih satelita.

LEŽIŠTA TORIJUMA. Minerali torijuma veoma su rašireni u prirodi, približno u istoj količini kao i minerali olova. Torijum se sreće u obliku oksida ili silikata, najčešće pomešanih sa drugim retkim metalima. Svi ti minerali ne eksploatišu se industrijski. Dva glavna minerala su *torijanit*, oksid urana i torijuma (Kanada, Madagaskar), i *monacit*, fosfat retkih zemalja (Brazil, Indija).

Moderatori

U procesu fisije emitovani neutroni su brzi. Da bi mogli održati lančanu reakciju treba da se uspore. U nuklearnim reaktorima tu ulogu vrši moderator. To može biti laka voda, teška voda, grafit ili berilijum.

TEŠKA VODA

DEFINICIJA. Ako se u formuli obične vode H_2O, običan vodonik $H(^1H)$ zameni deuterijumom $D(^2H)$, dobija se teška voda D_2O. Teška voda se sadrži u običnoj vodi u srazmeri 1/6 000. Frakcionom destilacijom obične vode ne može se izolovati teška voda, osim ako se vodi doda kaustična soda ili sumporna kiselina. Američki hemičari su otkrili tešku vodu utvrdivši da voda dobijena iz alkalne lužine, izvađene iz starih elektrolitičkih ćelija, ima gustinu koja je neznatno viša od jedinice.

OSOBINE. Teška voda je tečnost bez boje i mirisa.

Upoređenje osnovnih fizičkih konstanti teške i obične vode.

Temperatura u stepenima Celzijusa	D_2O	H_2O
Temperatura smrzavanja . . .	3,8	0
Temperatura ključanja . . .	101,4	100
Temperatura koja odgovara maksimalnoj gustini . . .	11,06	4

Druge konstante, viskozitet, indeks refrakcije, termička provodljivost, takođe se neznatno razlikuju od obične vode. Rastvorljivost soli je manja u teškoj nego u običnoj vodi, a elektrolitička provodljivost dobijenih rastvora je nešto slabija. Teška voda je toksična. Punoglavci, planeri (crvi koji se nalaze u slatkim vodama), paramecijum (vrsta protozoa koji najradije žive u slatkim vodama bogatim biljnim i životinjskim ostacima) kada se stave u tešku vodu uginu posle određenog vremena koje se kreće od jednog sata do dva dana.

PROIZVODNJA. U početku tešku vodu je proizvodila samo jedna fabrika u Norveškoj. U Francuskoj izgrađena je jedna fabrika u Mazingarbu (Mazingarbe) u okrugu Pa-de-Kalea. Princip primenjenog procesa sastoji se u izmeni izotopa vodonika među amonijakom i molekularnim vodonikom. Gas iz koksnih peći se rashladi na $-50°C$, čime se odvoji vodonik. Ovaj se stavlja u dodir sa amonijakom, i nakon dugotrajnog procesa konačno se dobije teška voda.

VOJNA PRIMENA. Iz teške vode dobija se deuterijum razlaganjem na gvožđu dovedenom do crvenog usijanja, tj. na isti način kako se iz obične vode pri istim uslovima dobija obični vodonik. Deuterijum se primenjuje pri proizvodnji fuzionog oružja.

GRAFIT

OPŠTI PODACI. Grafit je kristaliziran ugljenik. To je lak prirodni elemenat (br. 6 Mendeljejeve tablice elemenata) koji se nalazi u prirodi.

OSOBINE. To je čvrsta materija, crna, sa metalnim sjajem, dobar provodnik toplote i elektriciteta. Specifična težina mu je oko 1,8. Od izotopa ugljenika poznat je ugljenik 14. On je β-emiter dugog perioda raspada (5 700 godina) koji se primenjuje u biologiji kao traser i arheologiji za određivanje starosti predmeta.

OSOBINE NUKLEARNOG GRAFITA. Da bi mogao služiti kao moderator, grafit treba detaljno prečistiti, pošto prisustvo nekih nečistoća povećava apsorpciju neutrona. Kvalitet nazvan »nuklearni« dobija se mešenjem petrolkoksa sa katranom iz uglja. Posle formiranja blokovi se peku u električnoj peći, gde se na 3 000° postiže grafitizacija. Grafit se isporučuje u obliku blokova ili šipki.

BERILIJUM

OPŠTI PODACI. Berilijum (elemenat br. 4 u klasifikacionoj tablici) otkrio je 1790. Francuz Voklen (Vauquelin), koji ga je nazvao glucinijum radi slatkog ukusa njegovih soli. Osnovni mineral berilijuma je dupli silikat berilijuma i aluminijuma: beril.

OSOBINE. To je lak metal sive boje koji se topi na oko 1 300°C. Specifična težina mu je 1,8. Prašina berilijuma je veoma otrovna. Berilioza je profesionalna bolest koja ima karakter plućnog i kanceroznog oboljenja. Maksimalno dozvoljena koncentracija glucina (oksida berilijuma) je 2.10^{-5} gr/m³.

PROIZVODNJA. Beril se drobi, zatim pretvara u hidratizirani oksid, koji se redukuje ugljem na 850°C. Porozni metal koji se dobije rastvori se u hlorovodoničnoj kiselini da bi se dobio berilijum hlorid $BeCl_2$. Ovaj se rastvara u odnosu 15 na 100 u topljenoj smeši kalijum i natrijum hlorida. Na oko 780°C i pri naponu od 8 volti, berilijum se deponuje na katodu u obliku zrnaca. Nuklearni berilijum mora sadržati više od 99,7% metala, a nečistoće, magnezijum, aluminijum, sicilijum itd., ne smeju preći 0,1—0,2%.

KORIŠĆENJE NUKLEARNE ENERGIJE

Proizvodnja elektroenergije

Perspektive energetike u svetu

OPŠTI PODACI. U prošlosti, potrebe za energijom u raznim oblicima, odnosno primarnom energijom bile su ograničene. Od pojave velike industrije sredinom XIX v., a imajući u vidu i demografski rast, svedoci smo njene sve veće potražnje. Ukupni energetski bilans jedne zemlje dobija se zbrajanjem potrošnje raznih oblika energije: uglja, nafte, prirodnog gasa, elektroenergije, koja se svede na jedan zajednički toplotni ekvivalenat. Pošto ugalj podmiruje najmanje polovinu potrošnje energije u svetu, usvojena je kao jedinica *tona ekvivalentnog uglja, TEU*, ili *milion tona ekvivalentnog uglja mega-TEU* (oznaka MTEU), ili 10^6 TEU. Postoji ekvivalentnost:

1 TEU = 7 000 Kcal = 27 800 BTU

(1 BTU, ili *British Thermal Unit*, ekvivalentna je 1 055,06 džula).

PONUDA I POTRAŽNJA PRIMARNE ENERGIJE. Potražnja primarne energije udvostručuje se svakih 30—35 godina. Pri ovim procenama treba voditi računa i o demografskom porastu, pošto se ceni da bi se za nešto manje od pola veka stanovništvo Zemljine kugle moglo udvostručiti. Ako se usvoji srednji godišnji porast od 5% izlazi da će 2 000. godine ukupna potrošnja iznositi oko $30\,000 \cdot 10^6$ TEU. Godišnja potrošnja u Evropi po glavi stanovnika je danas oko 3 tone. Ovu količinu trošiće 2 000. godine, kako se smatra, »nerazvijene zemlje« (Latinska Amerika, Azija i Afrika). U tom periodu godišnja potrošnja po stanovniku Severne Amerike dostići će verovatno 12 tona, a po stanovniku Evrope 6 tona.

Mogućnosti klasične energetike. U odnosu na zahteve za energijom postavlja se problem ponude.

Fosilno gorivo. Ceni se da su ukupne svetske rezerve fosilnog goriva ravne $3,5 \cdot 10^{12}$ tona uglja. Ako se potrošnja u svetu bude i dalje povećavala i posle 2 000. godine po stopi od 5% godišnje, sve te rezerve biće iscrpene za tri četvrti veka. Ako tome još dodamo da se sve ove rezerve ne mogu ekonomično da eksploatišu, »ekonomski iskoristive rezerve fosilnog goriva« zadovoljiće potrebe za samo trideset godina.

Hidroelektrična energija. Kada bi se uredile sve lokacije na svetu, mogle bi proizvesti svake godine $5 \cdot 10^{12}$ KWh elektroenergije, što je ekvivalentno $700 \cdot 10^6$ tona uglja. Ta brojka je beznačajna u odnosu na visinu potrošnje.

Prva ostvarenja u proizvodnji energije nuklearnog porekla

Za deset godina, od 1956. do 1966, proizvodnja elektroenergije nuklearnog porekla iznosila je 100 TWh, raspoređenih na sledeći način:

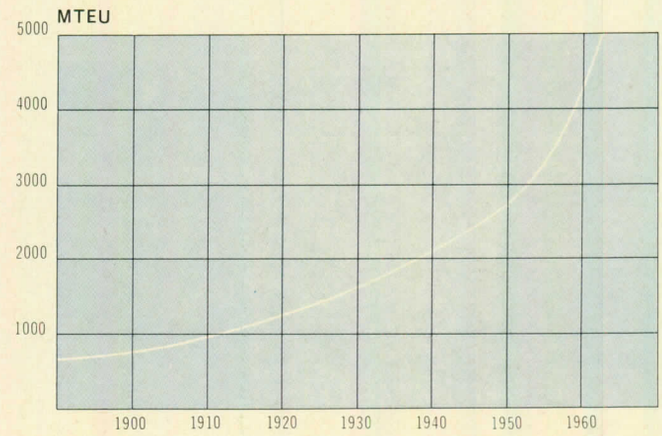
Velika Britanija .	62
SAD	18
Italija	7
Francuska	4,5
Ostale zemlje . . .	8,5
Ukupno	100,0 TWh

VELIKA BRITANIJA

Prva nuklearna elektrana Kolder Hol izgrađena je u Velikoj Britaniji i puštena u pogon oktobra 1956. Velika Britanija je relativno siromašna energetskim izvorima, zbog čega su Englezi prvi počeli da koriste nuklearnu energiju za energetske potrebe. Za deset godina proizvodnja elektroenergije nuklearnog porekla u Velikoj Britaniji iznosi 62 TWh, što je dve trećine svetske poizvodnje. U početku, Englezi su usvojili postrojenja sa prirodnim uranom, grafitom i ugljendioksidom, čiji je predstavnik elektrana Kolder Hol. Krajem 1966. u Velikoj Britaniji moglo se nabrojati desetak ovakvih elektrana u pogonu, čija ukupna snaga od oko 3 50 MWe zadovoljava 10% potrošnje elektroenergije. One predstavljaju *prvu generaciju* elektrana. Za elektrane *druge generacije* Englezi su odlučili da usvoje postrojenja sa lako obogaćenim uranom, grafitom i ugljendioksidom. Prva ove vrste bila je elektrana Dandženes, snage 532 MWe. Smeštena na obali u Kentu, preko puta Bulonja, ova nuklearna elektrana je interesantna i za područje severne Francuske. U stvari, kada dostigne punu snagu, deo

ENERGETSKI EKVIVALENTI U TONI EKVIVALENTNOG UGLJA (TEU)

Jedinice	Tone uglja
1 t koksa	0,9
1 t lignita	0,3 — 0,6
1 t benzina	1,5
1.000 m³ prirodnog gasa	1,35
1.000 m³ gradskog gasa	0,6
1 m³ kompaktnog drveta	0,25



Porast potrošnje primarne energije na svetskom planu izražen u MTEU.

PROCENA POTROŠNJE PRIMARNE ENERGIJE U 2000. GODINI

	Potrošnja energije po glavi stanovnika (u tonama uglja)	Procena broja stanovnika (u milionima)	Ukupna potrošnja energije (u megatonama uglja)
Severna Amerika	12	410	4920
Zapadna i Istočna Evropa	6	610	3660
SSSR	14	340	4760
Latinska Amerika	3	540	1620
Afrika	3	530	1590
Južna Azija i Daleki istok	3	2140	6420
Bliski istok	3	310	930
Kina	3	1700	5100
Ceo svet	4,4	6580	29000

energije moći će da se izveze u Francusku. U tome cilju jedan električni podvodni kabel postavljen je između Lida i La Portela, kojim se dve zemlje uzajamno ispomažu u časovima vršne potrošnje. Takva evolucija tipa elektrane objašnjava se i vojnim razlozima. Pošto za proizvodnju svojih nuklearnih oružja nemaju više potrebu za obogaćenim uranom, Englezi koriste svoj fisioni materijal u novim energetskim postrojenjima.

SJEDINJENE DRŽAVE

Razlozi za razvoj nuklearnog sektora u SAD razlikuju se od onih u Velikoj Britaniji. Amerikanci su veoma bogati energetskim izvorima. Njihove rezerve uglja su naročito velike. Oni stoga ni na koji način nisu bili prisiljeni na novine u ovoj oblasti. Prva velika elektrana bila je Šipingport, snage 100 MWe, puštena u pogon 1957. Krajem 1966. moglo se nabrojati u SAD petnaestak nuklearnih elektrana ukupne snage 1 100 MWe. U toku je izgradnja postrojenja čija instalisana snaga prelazi 20 000 MWe (1965).

SOVJETSKI SAVEZ

Ova zemlja je veoma bogata u energetskim izvorima. Međutim, oni su veoma neravnomerno raspodeljeni po državnoj teritoriji. Početkom 1967. ova zemlja je raspolagala snagom elektronuklearnih postrojenja od 1 000 MW. Taj broj bi se mogao udvostručiti do 1970. Za snage veće od 600 MW nuklearne elektrane postaju kompetitivne klasičnim. Za 1980. sovjetski stručnjaci predviđaju 20 000 MW nuklearnog porekla, dok bi do istog roka Evropa zajedničkog tržišta mogla imati 40 000 MW, a SAD dva puta toliko.

FRANCUSKA

Srednja godišnja potrošnja elektroenergije u Francuskoj, koja je 1925. bila 10 TWh (tj. 10^{12} Wh), 1955. 50 TWh a 1965. 100 TWh, niža je nego u mnogim drugim zemljama. Francuska troši upola manje elektroenergije nego, npr. Amerika ili Norveška. Treba očekivati da će se pravilo udvostručavanja potražnje svakih deset godina ostvariti u toku sledećih decenija. Ovo obavezuje francusku elektroprivredu (Electricité de France) da preduzme odgovarajuće mere kako bi potrošačima ponudila oko 210—230 TWh 1975, a možda 430 do 470 TWh 1985. Do 2000. godine predviđa se 1000 TWh.

Proizvodnja radio-izotopa

Prvi pokušaji

Irena i Frederik Žolio-Kiri (Joliot-Curie) otkrili su 1934. veštačku radioaktivnost i poreklo radio-elemanata odnosno radio-izotopa. Fermi je konstatovao da se fluksom neutrona svi elementi mogu načiniti radio-aktivnim.

SAD. Prvi radio-izotopi proizvedeni su u SAD u vreme drugog svetskog rata. Od 1943. bombardovanjem iz ciklotrona počinju se praviti jod 131 i fosfor 32. Sledećih godina za proizvodnju se koristi grafitni reaktor u Ouk Ridžu. U tom periodu to je bila vojna tajna i bolnice su kupovale ove proizvode po veoma visokoj ceni. Prve američke isporuke inostranstvu bile su krajem 1947.

VELIKA BRITANIJA. Od 1948. Englezi su bili u mogućnosti da u Harvelu proizvode i da izvoze radio-izotope. Oni su brzo osvojili inostrano tržište. Razlog tome su mnogobrojne poteškoće administrativne prirode kojima su u SAD bili izloženi inostrani kupci, a kojih u Velikoj Britaniji nije bilo.

KANADA. Pošto su učestvovali u ratnim naporima Anglo-Saksonaca, Kanađani su brzo bili u stanju da proizvode i izvoze radio-izotope. Zahvaljujući izgradnji jednog reaktora visokog fluksa koji su izgradili (NRX) mogli su da snabdevaju kupce radio-izotopima, naročito kobaltom visoke specifične aktivnosti.

FRANCUSKA. Prva nacionalna realizacija u nuklearnom domenu bila je konstrukcija reaktora Zoe 1948. Ovaj je omogućio proizvodnju nekoliko radio-izotopa kratkog perioda raspada koje je bilo teško transportovati. Prve isporuke francuskim korisnicima izvršene su sredinom 1949.

Tehnika proizvodnje

Radio-izotopi se mogu dobiti bombardovanjem atomskih jezgara onih elemenata koji se žele aktivirati, neutronskim fluksom u nuklearnim reaktorima, ili kao fisioni produkti.

PROIZVODNJA PREKO NEUTRONA. Najvažnije reakcije su (n, γ), (n, α) i (n, p) pri kojima se emituju γ zraci, α zraci ili jedan proton. Najčešće se koristi reakcija (n, γ). Ona je najverovatnija pošto se vrši termalnim neutronima a njih ima najviše u perifernim oblastima reaktora gde se stavljaju uzorci za ozračivanje. Tako se, na primer, proizvode kabalt 60 ili zlato 198:

$$Co^{59}(n, \gamma)\, Co^{60}$$
$$Au^{197}(n\, \gamma)\, Au^{198}$$

Reakcije (n, α) i (n, p) izazivaju neutroni visoke energije koji se nalaze samo u centru reaktora. Na primer, proizvodnja fosfora 32 od sumpora 32,

$$S^{32}(n, p)\, P^{32}$$

ostvaruje se samo neutronima čija je energija viša od 1 MeV. Istovremeno, neke reakcije ove vrste mogu se odigrati i termalnim neutronima: to je slučaj sa tricijumom i ugljenikom 14

$$Li^{6}(n, \alpha)\, H^{3}$$
$$N^{14}(n, p)\, C^{14}$$

PROIZVODNJA PREKO FISIONIH PRODUKATA. Ovde je reč o produktima fisije dugog perioda raspadanja. Oni se izdvajaju iz rastvora koji ostaju u postrojenjima za hemijsko izdvajanje plutonijuma. Tako se dobija stroncijum 90 i cezijum 137, čiji su periodi raspada 28 odnosno 30 godina. Posle jedne godine cezijum 137 predstavlja 30% ukupne gama aktivnosti svih fisionih produkata. Posle dve godine ovaj radio-izotop predstavlja praktično celokupnu aktivnost.

AKTIVNOST STVORENIH PROIZVODA. Bilo koja nuklearna reakcija da se koristi, aktivnost radio-izotopa zavisi od dva faktora:

— sa jedne strane, od formiranja radioaktivnih jezgara, koje je proporcionalno broju prisutnih jezgara, efektivnom preseku σ i fluksu neutrona

$$\frac{dN}{dt} = N_0 \sigma \phi ,$$

— sa druge strane od raspada prisutnih jezgara, što je proporcionalno njegovom broju $\frac{dN}{dt} = -\lambda N$

Kombinacija ovih dvaju faktora daje jednačinu

$$\frac{dN}{dt} = N_0 \sigma \phi - \lambda N.$$

Integracijom i posle transformisanja broja atoma u milikirije dolazi se do formule:

$$A = \frac{0{,}6}{3{,}7 \cdot 10^{10}} \cdot \frac{\phi \cdot \sigma}{M} \left(1 - e^{-\lambda t}\right)$$

u kojoj je:

A = aktivnost i kirijima po gramu ozračene supstancije;
Φ = fluks neutrona po centimetru kvadratnom po sekundi;
σ = efektivni presek u barnima (1 barn = 10^{-24} cm^2);
M = atomska masa elementa mete;
t = trajanje ozračivanja;
λ = konstanta raspada ravna $\frac{0{,}693}{T}$;
T = period raspada formiranog elementa (vrednosti t i T su izražene u istim jedinicama).

Katkad se ova formula piše u prostijem obliku:

$$A = \frac{0{,}6}{3{,}7 \cdot 10^{10}} \cdot \frac{\phi \cdot \sigma}{M} \left(1 - 2^{-\frac{t}{T}}\right)$$

Aktivnost dostiže polovinu zasićenja posle ozračivanja od jednog perioda raspada radio-izotopa, 75% posle dva perioda, 99% posle šest perioda. Posle dovoljno dugog vremena, približno ravnog trajanju deset perioda stvorenog radio-izotopa, dostiže se zasićenje, što će reći da se specifična aktivnost više ne povećava. Njena vrednost je

$$A = \frac{0{,}6}{3{,}7 \cdot 10^{10}} \cdot \frac{\phi \cdot \sigma}{M}.$$

Važnost i upotreba radio-izotopa

OPŠTI PODACI. Radio-izotopi su našli svoju primenu, koja je višestruka i raznolika, u industriji i medicini, poljoprivredi, u nekim specifičnim oblastima kao što je npr. utvrđivanje starosti iskopina itd. Mogu se koristiti za geometrijska i mehanička merenja, merenje debljine, visine nivoa, merenje protoka, koncentracije, habanja itd. U drugim primenama koriste se hemijske osobine radio-izotopa. U tom slučaju radio-izotopi služe kao traseri i obeleženi elementi. Radioaktivnost omogućava da se prati evolucija određenih hemijskih ili fizičkih transformacija, pri čemu traseri omogućavaju da se otkrije mehanizam ovih transformacija, što bi na drugi način bilo veoma teško ako ne i nemoguće.

Broj korisnika se povećava iz godine u godinu i to za 10% godišnje. Međutim, radio-izotopi se najčešće koriste u industriji, a najvažnija primena je na polju medicine.

PRIMENA U INDUSTRIJI

Merenje debljine i gama radiografska kontrola obuhvataju oko 75% svih industrijskih primena.

MERENJE DEBLJINE. Koriste se dve metode.

• Pri direktnoj metodi izvor S emituje određeno zračenje. Ako se ispred ovog izvora stavi detektor D, on će registrovati neku mernu veličinu M. Ako se između izvora i detektora postavi neki ekran određene debljine, on će apsorbovati deo zračenja, pa će detektor registrovati veličinu M' manju od M. Razlika M − M' omogućuje merenje debljine ekrana, pošto se apsorpcija odigrava prema dobro poznatom zakonu.

• Po metodi retrodifuzije, izvori i detektor se nalaze sa iste strane ekrana, a detektor meri reflektovano zračenje. U zavisnosti od prirode i debljine materijala koji se meri, koristi se odgovarajući radio-izotop. On je smešten u aparatu koji se naziva merač.

Najprodornije je γ zračenje. Koristi se za merenje većih debljina. Oblast korišćenja prelazi 1 kg/m². Uobičajeno je da se debljina izražava merom dužine. U nuklearnoj fizici izražava se, međutim, najčešće kao težina po jedinici površine. Za dati materijal to je po definiciji

$$\text{debljina} \times \text{gustina}.$$

Ako se debljina izražava centimetrima a gustina gramima po kubnom centimetru, tj. gr/cm³, težina po jedinici površine izražava se kao cm · gr/cm³ tj. g/cm². Pomoću kobalta 60, cezijuma 137 i talijuma 170, mogu se dosta tačno meriti debljine čelika do 5 i 6 cm. Detektor zračenja je scintilacioni brojač sa fotomultiplikatorom. Kod limova od 1 cm greška merenja ne prelazi 5%. Retrodifuzija γ-zračenja koristi se za merenje debljine čeličnih cevi, debljine sloja cinka nanesenog galvanskim putem na čelik, za određivanje debljine zida rezervoara ili zida broda, tj. svuda gde su površine dostupne samo sa jedne strane. Isto tako, mogućno je posebnom vrstom retrodifuzionih uređaja odrediti stepen korozije na unutrašnjem zidu cevovoda, čak ako je ovaj i u upotrebi i kroz njega protiče bilo koja tečnost.

Merači koji koriste beta emitere brojniji su od merača sa gama-zračenjem. Radije se uzimaju radio-izotopi sa dovoljno dugim periodom raspada, kako fenomen raspada ne bi uneo greške. Najčešće se dobija tačnost od 1%. Mnogobrojne su primene ovih merača pri kontinualnoj kontroli. Koriste se pri proizvodnji hartije, plastičnih materija, metalnih folija itd. Pri tome se primenjuju ne samo da mere debljinu, već i da automatski upravljaju uređajima za korekciju. Uređaj pored izvora sadrži i jonizacionu komoru, za kojom sledi elektrometarska cev, direktno vezan pojačavač i mikroampermetar koji predstavlja indikator debljine. Retrodifuzija β-zračenja omogućuje merenje debljine deponovanog metala, boje, laka itd.

α-zračenje ima malu prirodnu moć i služi za merenje debljina manjih od 5 mg/cm² (veoma tanka hartija, industrija plastike). Izvor je obično radijum, a oblast korišćenja u rasponu 1—60 g/m². Koriste se Gajger-Milerovi ili scintilacioni brojači.

Poređenje sistema x i γ-radiografije. Dosta se često postavlja pitanje koji sistem ima veće prednosti. Da li uređaj sa x zracima ili izvor gama zračenja. Za valjano poređenje mora se uzeti u obzir veliki broj faktora, pa je i definitivan izbor specifičan za svaki pojedinačni slučaj. Ipak, x-zraci izgledaju pogodniji kada se kontrola mora izvršiti brzo, jer je kod γ radiografije vreme ekspozicije mnogo duže, i lako može da traje i više časova. S druge strane, uređaji sa izvorima koji se koriste u gama radiografiji su manje kabasti i pokretniji od uređaja za x-zrake. Stoga će se u većini slučajeva dati prednost ispitivanju γ-radiografijom nego x-zracima.

KORIŠĆENJE RADIO-IZOTOPA KAO OBELEŽIVAČA. U metalurgiji se kao obeleživači koriste: ugljenik C^{14}, sumpor S^{35}, hlor Cl^{36} i gvožđe Fe^{55} ili Fe^{59}. Pomoću Co^{60} određuje se habanje klipova, guma i unutrašnjih obloga visokih peći. Detekcija curenja podzemnih kanalizacija, kao i mesta začepljenja vrše se pomoću natrijuma Na^{24}, broma Br^{82} i joda I^{131}. U industriji nafte ti isti radio-izotopi omogućavaju da se obeleži priroda i kvalitet raznih produkata koji se transportuju cevovodima. Za obeležavanje položaja klipa u cevovodima koriste se izvori od 1—2 Kirija kobalta Co^{60}. Za ispitivanje ventilacije primenjuju se radioaktivni gasovi: argon A^{141} i ksenon Xe^{135}. Za ispitivanje kretanja podzemnih voda i pronalaženje izvora koriste se tricijum H^3, hrom Cr^{51}, brom Br^{82} i jod I^{131}. Pomeranje peska u pojedinim lukama može se obeležiti pomoću hroma Cr^{51}, cinka Zn^{65} i skandijuma Sc^{46}.

UTVRĐIVANJE STAROSTI. Odmah po otkriću radioaktivnosti fizičari su koristili ove nove pojave da utvrde starost stena. Ipak, istraživanja onoga što danas nazivamo »utvrđivanje starosti« dobila su zamah tek nakon radova Libija (Libby), koji je počeo da primenjuje ugljenik C^{14}. Do 1950, primenjivani postupci dozvoljavali su utvrđivanje starosti arheoloških nalaza. Od tada, metoda ugljenika C^{14} koristi se za određivanje mnogo većih starosti, a ulažu se napori da se primeni i na probleme fizike Zemljine lopte, ispitivanje kretanja vazdušnih i vodenih masa, kao i za upoznavanje porekla i prirode zemaljskih stena i meteorita. U gornjim slojevima atmosfere (16 000 m) neutroni kosmičkih zraka pretvaraju azot 14 u ugljenik 14

$$N_7^{14} + n_0^1 = H_1^1 + C_6^{14}$$

Na osnovu činjenice da su tokom hiljada godina vetrovi razvejavali radiougljenik, a okeani obezbedili savršeno mešanje vode, koncentracija ugljenika je uniformna, a sadržaj radiougljenika u ugljeniku živih bića jednak je za sve vrste na svetu. Određivanje starosti na osnovu ugljenika 14 zasniva se na sledećem osnovnom principu: čim neko biće umre, prestaje da se hrani, pa time prestaje da apsorbuje radiougljenik. Sve radioaktivne materije imaju zajedničku karakteristiku da se raspadaju, nestaju i transformišu. U slučaju radiougljenika ta transformacija se vrši u ritmu 50% za svakih 5 700 godina, uz stvaranje onog istog azota od koga je ovaj ugljenik i nastao. Tokom ove transformacije atom radiougljenika emituje jedan β zrak, koji omogućuje da se utvrdi njegovo nestajanje. Uz pretpostavku konstantnog intenziteta kosmičkog zračenja, odnos ugljenika 14 prema ugljeniku 12 u atmosferskom ugljen dioksidu ostaje uvek isti. Posle smrti proces asimilacije prestaje, a ugljenik 14 se i dalje raspada a da ga ne zamenjuje novi iz atmosfere. Koncentracija ugljenika 14 se smanjuje, a sa njom i odnos koncentracija C^{14}/C^{12}. Koncentracija ugljenika 12 se utvrđuje hemijskom analizom, a ugljenika 14 brojačima zračenja.

RAZNE UPOTREBE. U tekstilnoj industriji, da se eliminiše elektrostatički naboj stvoren trljanjem, koristi se stroncijum Sr^{90}, talijum Ta^{204} i polinijum Po^{210}. Najzad, radio-izotopi mogu da se koriste na osnovu osobina da stvaraju pojavu fluorescencije. Određene boje tako postaju svetleće kada im se doda so radijuma, tricijum, ugljenik 14, kripton 85, stroncijum, prometijum ili talijum.

PRIMENA U MEDICINI

Radio-izotopi su od velikog značaja za medicinu, pošto omogućuju:

— lečenje ili u najmanju ruku usporavanje razvoja bolesti;

— preciznost dijagnoze;

— naročito bolje poznavanje fizioloških fenomena.

Lečenje raka poboljšano je zahvaljući upotrebi »markiranih atoma«. Idealno lečenje bi se postiglo ako bi se obezbedilo unutrašnje i selektivno ozračivanje. Direktnim ozračivanjem postoji opasnost da žive ćelije budu oslabljene pa čak i uništene. Tehnika radio-izotopa omogućila je da radioaktivni izvor postavi u samu unutrašnjost bolesnog organa. Jedna od najznačajnijih primena je korišćenje »kobaltne bombe«. Kobalt se može koristiti u formi igle slično radijumu, kao sredstvo za lokalna ozračivanja (rak grlića materice) ili kao bomba za opšte ozračivanje. U slučaju nekih žlezda upotrebljava se radioaktivna supstancija koja se fiksira u njoj. Tako, kod raka tiroidne žlezde koristi se radioaktivni jod. Na isti način tretiraju se određeni tumori injekcijama radioaktivne supstance. Kod moždanih tumora u obolelu oblast unose se kuglice zlata ili fosfora. Emitovani zraci unište veoma male zapremine tkiva do koga dopru, a ne deluju na okolne oblasti. Može se meriti brzina proticanja krvi kroz organizam ako se ovoj dodaju crvena krvna zrnca obeležena fosforom 32. Isti taj fosfor 32 omogućuje otkrivanje leukemije. Zdrava osoba eliminiše polovinu fosfora iz organizma preko mokraće četiri do pet dana po uzimanju, dok bolesna eliminiše samo 10%.

Konačno, zahvaljujući radio-izotopima, moglo se utvrditi da su klasične predstave o metabolizmu — to jest o procesima transformacije kojima podležu živi organi prolaskom hranljivih materija — bile pogrešne. Zapaženo je da telo ne eliminiše odmah hranljive supstancije koje nije iskoristilo. Nove ćelije se uključuju u organizam a anemične odbacuju, čime se vrši stalna zamena. Upotrebom radioaktivnog kalcijuma utvrđeno je da se kosti u ljudskom organizmu stalno obnavljaju.

Tehnika koja se sastoji u tome da se radioaktivna supstancija unese u biljku i prati njen put omogućila je veliki napredak nauke. Ona je omogućila naročito da se dobiju veći prinosi u proizvodnji i na osnovu toga poveća količina proizvoda za ishranu koji stoje ljudima na raspolaganju. Tako se saznalo da je dovoljno razasuti fosfat na lišće biljke pa da ga ova asimiliše u količini 95%, dok zakopavanje u zemlju ne obezbeđuje veći prinos od 10%. Dobijeni su novi varijeteti biljaka koji su od starih otporniji na određene bolesti. Isto tako proizvedene su nove veoma interesantne hibridne vrste.

Metodom »obeleženih atoma« otkriven je veliki broj interesantnih pojedinosti. Sada se zna da se proteini u jajetu ne stvaraju neposredno od onoga što su kokoške jele, već od hrane koju su pojele mesec dana ranije; da se gljive na hrastu razmnožavaju sa drveta na drvo preko korenja. Otkriveno je koliko žive komarci i kakve su im mogućnosti leta. Upotrebom zračenja omogućeno je potpuno uništavanje larvi, insekata i žižaka u silosu za žito, ne mešajući buduću hranu sa hemikalijama koje su manje ili više štetne za organizam.

Najzad, radio-izotopi mogu omogućiti rešavanje problema fotosinteze, tj. načina kako biljke koriste svetlosnu energiju. Proučavanje rasta živih organizama daje nadu da će prirodni procesi ovoga fenomena biti otkriveni u kratkom roku. Stvaranje materije fotosintezom predstavlja najvažniju hemijsku reakciju u prirodi. Hektar kukuruza sabere 1,5—2 tone ugljenika godišnje. Ukupna masa ugljenika koju sakupe sve biljke na Zemljinoj kugli u toku godine ovim procesom iznosi 35 milijardi tona, a energija vezana fotosintezom iznosi oko 10^{18} kalorija.

Nuklearni pogon

U ovoj oblasti koristi se samo energija koja se pojavljuje u procesu fisije, pri čemu nuklearni reaktor zamenjuje parni kotao ili klasični gasogenerator. Prva ostvarenja bila su namenjena vojnim ciljevima, a zahvaljujući prednostima koje je pokazao, ovaj vid pogona primenjen je kasnije i na brodovima.

PREDNOSTI NUKLEARNOG POGONA. Korišćenje fisionog goriva dozvoljava znatno smanjivanje tereta koji predstavlja gorivo na brodu, a time se produžava trajanje krstarenja. To je osnovna prednost nuklearnog pogona. Američki razarač *Bejnbridž* (Bainbridge) od 8 400 tona, koji raspolaže sa dva sistema reaktor-turbina, potroši oko 100 gr obogaćenog urana da bi prešao 1 000 morskih milja brzinom od 25 čvorova, dok *Kolbert*, slične tonaže, pri istim uslovima sagori 600 tona mazuta. Da bi prevalio put od Avra do Njujorka i nazad, parobrod *Frans* (50 000 tona, 30 čvorova) sagori 6 000 t mazuta, dok nosač aviona *Enterprajz* sa 86 000 tona potroši manje od 3 kg obogaćenog urana da bi prešao isti put istom brzinom. Na vojnom planu nuklearni pogon predstavlja najveću prednost. Za podmornice nuklearni pogon otklanja ograničenja u pogledu trajanja ronjenja koja stvara snabdevanje gorivom. Nuklearni reaktori mogu da rade više godina sa istim punjenjem.

POSEBNE KARAKTERISTIKE BRODSKIH REAKTORA. Ovi reaktori imaju snagu od nekoliko desetina megavata. Potrebno je 30—35 MW da se dobije 10000 KS na osovini elise. Ako se pretpostavi termičko iskorišćenje oko 20%, fisija 1 kg fisionog materijala na čas dozvoljava da se na osovini elise razvije mehanička snaga od 6 250 KS. Kao gorivo koristi se obogaćeni uran kako bi se smanjile dimenzije reaktora. Radi obezbeđenja pogodne kontrole, reaktori koriste vodu pod pritiskom, mada su i drugi sistemi pogodni. Primenjuje se i hlađenje tečnim metalima ili gasom.

EKONOMIČNOST BRODOVA NA NUKLEARNI POGON. Ovo pitanje može se postaviti samo za trgovačke brodove. Kada je 1959. porinut američki teretni brod *Savana*, njegova izgradnja je koštala znatno više nego izgradnja jednog klasičnog broda istih karakteristika. Danas, cena koštanja jednog takvog broda ne bi smela biti veća od 20%, a ta razlika bi se mogla kompenzovati manjim troškovima eksploatacije, kao i smanjenjem prostora koji je na klasičnim brodovima zauzimalo gorivo. U stvari, klasični brod od 15 000 t, brzine 30 čvorova, mora imati motor od 80 000 KS. Takav motor za jedan dan pogona troši 450 t goriva. Za krstarenje od 10 dana potrebno je dakle 4 500 t goriva, tj. trećina tonaže koju brod može da ponese. Upravo tu tonažu brod na nuklearni pogon svakim putovanjem zaradi više od klasičnog broda. Izvesni stručnjaci misle da bi to trebalo da obezbedi ekonomičnost trgovačkih brodova na nuklearni pogon.

SIGURNOST I ZAŠTITA. Pitanja sigurnosti su veoma važna, jer je potrebno razmotriti sigurnost pogona, slučaj havarija, sigurnost osoblja i zamenu goriva na brodu i u luci. Da se na podmornici izbegne rizik kontaminacije prilikom ronjenja, obogaćeni uran mora biti postavljen u matricu nekog neutralnog metala, koja je u stanju da zadrži produkte fisije. Posebno, reaktori moraju biti veoma otporni na udar. To postavlja posebne probleme pri ojačavanju konstrukcije i izboru materijala. Kako faktor težine igra presudnu ulogu, to se za zaštitu mora pribegavati komplikovanim i skupim rešenjima.

Problemi koji naročito interesuju civilnu zaštitu su zagađenja morske vode. Ako se reaktor uništi, u ratnim dejstvima ili brodolomu, radioaktivnost koja bi se pri tom pojavila ne bi se mogla smanjiti. Jedino bi se moglo računati na faktore difuzije i disperzije. U većini slučajeva moralo bi se čekati na prirodno smanjivanje radioaktivnosti. Ako reaktor u akcidentu nije uništen, potrebno je brzo zatvoriti ventile na pojedinim odeljcima primarnog kola hladnjaka kako bi se sprečilo curenje radioaktivnih tečnosti.

Radioaktivni otpaci

DEFINICIJA. Radioaktivni otpaci javljaju se u raznim vidovima. U čvrstom stanju su stvarni *radioaktivni otpaci*. Ako su u gasovitom ili tečnom stanju dobijaju ime *radioaktivni efluenti*. Da bi se ocenila opasnost koju predstavljaju, uzimaju se u obzir različiti faktori (priroda, period, aktivnost, količina). Dele se dosta proizvoljno na otpatke ili efluente slabo radioaktivne (reda milikirija), srednje (reda kirija) i jako radioaktivne (iznad kirija). Gasoviti efluenti se uglavnom evakuišu u atmosferu. Tečni efluenti se ispuštaju u reke, ali ova operacija zahteva strogu kontrolu.

RADIO-ELEMENTI PRIMENJENI U MEDICINI

Radio-izotop	Period	Tip zračenja	Upotreba
I 131	8 dana	β,γ	Funkcije tiroide i jetre
I 132	2,4 časova	β,γ	Funkcije tiroide
Fe 50	45 dana	β,γ	Metabolizam gvožđa i hemoglobina Dijagnostika anemije.
CO 60	5,3 godina	β,γ	Radioterapija
Ca 45	5 meseci	β	Metabolizam kosti
Ca 47	4,6 dana	β,γ	Metabolizam kosti
P 32	14,3 dana	β	Radioterapija, metabolizam fosfora
Au 198	2,7 dana	β,γ	Radioterapija
Na 24	15 časova	β,γ	Protok krvi
Cr 51	26 dana	γ	Preživljavanje eritrocita. Volumen krvi

POREKLO I PRIRODA RADIOAKTIVNIH EFLUENATA I OTPADAKA

NORMALNA PROIZVODNJA. Sa njom se srećemo tokom rada nuklearnih reaktora.

Prvi stadijum se nalazi »pre reaktora« u centrima gde se izdvaja uran. U rudnicima urana nalaze se džepovi radona koji može da se oslobodi u trenutku vađenja rude. Rudari, znači, moraju da se zaštite, da rade u sredini sa potpritiskom i da nose zaštitne maske. Pri preradi nekih ruda može doći do nagomilavanja radioaktivnih materija. One se izdvajaju u obliku taloga. Najzad, pri proizvodnji gorivnih elemenata na bazi urana, ovaj se lije u ingote u grafitnim posudama koje postaju radioaktivne i time stvaraju čvrste radioaktivne otpatke.

Drugi stadijum proizvodnje nalazi se u »reaktoru«. Pod dejstvom neutrona razni delovi reaktora mogu stvoriti radioaktivne materije, čiji je period raspada relativno kratak. U slučaju prskanja košuljice gorivog elementa, fisioni produkti se rasturaju u obliku veoma radioaktivnog oblaka. U tom slučaju treba odmah preduzeti mere koje se predviđaju za zaštitu okoline.

Poslednji stadijum se nalazi »iza reaktora«. U postupcima prerade ozračenog goriva javlja se određeni broj fisionih produkata koji predstavljaju veoma radioaktivne tečne efluente. Može se nabrojati tridesetak različitih hemijskih formi, među kojima se nalaze kao najopasniji stroncijum 90 i cezijum 137, koji imaju relativno duge periode, naime 28 i 30 godina, zatim desetak čiji je period između 1 meseca i 1 godine, kao što su cink 95 i rutenijum 106. Ostali imaju period raspada od 1 sekunde do nekoliko dana.

POVREMENA PROIZVODNJA. Radioaktivni otpaci i efluenti sreću se uvek kada se radioaktivne materije koriste u proizvodnji i istraživanju: reaktori u radu, proizvodnja i korišćenje radioaktivnih izotopa itd. Kao kontaminirane čvrste materije sreću se naročito građevinski materijal ili šut, zaštitna odeća, laboratorijska oprema i predmeti. Neki od tih predmeta mogu se dekontaminirati i posle stroge kontrole opet koristiti. Tečne materije potiču iz perionica koje zovu »aktivnim«, iz radionica za dekontaminaciju sanitarnih uređaja i laboratorija. Tim tečnim efluentima u formi vodenih rastvora treba dodati organske tečnosti, u prvom redu maziva i kontaminirane rastvarače. Najzad, i neki gasoviti efluenti mogu se proizvesti u laboratorijama.

Evakuacija i tretiranje radioaktivnih otpadaka i efluenata

PREDVIĐANJA. Količine efluenata i radioaktivnih otpadaka, koje su do sada bile neznatne, rašće uporedo sa planovima za podizanje nuklearnih elektrana. Za nuklearne kapacitete električne snage od 850, 3 000 i 10 000 MW ukupna aktivnost radioaktivnih otpadaka u svim oblicima iznosiće godišnje 2 000, 10 000 i 30 000 MCi. U SAD za instalisanu snagu od 30 000 MWt u 1970. godini procenjena je godišnja proizvodnja efluenata i radioaktivnih otpadaka na 3 milijarde kirija, sadržanih u 27 miliona litara rastvora. U 2 000. godini na instalisanu snagu od 700000 MWt ova godišnja

proizvodnja iznosiće 60 milijardi kirija u 1,1 milijardi litara rastvora.

TRETIRANJE EFLUENATA I RADIOAKTIVNIH OTPADAKA. Kada se radi o gasovitim i tečnim efluentima slabe aktivnosti, primenjuje se princip disperzije. Ako se ovaj proces ne može primeniti, radioaktivnost se na neki način blokira time što se zatvara u rezervoare. Za jako radioaktivne tečne efluente i čvrste otpatke, nasuprot tome, traži se način da se radioaktivnost svede na malu zapreminu postupcima koncentracije.

Disperzija. Ovaj postupak se može primeniti samo na gasovite efluente, primenom visokih dimnjaka sa forsiranom promajom, ili na tečne efluente slabe aktivnosti, ali se ne može primeniti na jako radioaktivne gasove i tečnosti, a još manje za čvrste materije. Rasturanje tečnih otpadaka je osetljiva operacija. U rekama se može postići dobro razblaženje zahvaljući rečnoj struji, dok se u moru efluenti brzo razblaže, ali se zatim formirani »oblak« veoma sporo rastura.

ZATVARANJE U REZERVOARE. Ukoliko ih nije mogućno rasturiti ne ostaje drugo rešenje nego zatvoriti radioaktivne materije u takve objekte koji bi onemogućili svaku disperziju. Računajući na dugi vremenski rok, trebalo bi obezbediti potpuno siguran postupak spremanja, pošto se ne zna kako će se ponašati materijal pod uticajem korozije po isteku nekoliko desetina godina. Otpaci treba da se ostave u takvoj formi da mogu odoleti hemijskim i mehaničkim uticajima. Takođe ih treba obložiti zaštitnim sudom. Ipak izgleda da ovo rešenje nije uvek zadovoljavajuće. Ako obloga iščezne, na primer pod dejstvom korozije, celokupna količina radioaktivnih produkata će se rasuti.

Drugo rešenje se sastoji u tome da se otpaci dovedu u takve oblike u kojima će imati najveću moguću otpornost i nerastvorljivost. Ti postupci se zovu inkorporacija ili oblaganje. U prvom postupku radioaktivni otpaci se mešaju sa cementom, šljunkom i vodom kako bi se dobio beton. Ovaj postupak daje dobre rezultate, osobito sa tečnim otpacima, i ne staje mnogo. Nasuprot tome, vezivanje u betonu povećava njihovu zapreminu, a naročito težinu, u znatnim proporcijama. Kada se kao sredstvo za oblaganje vlažnih produkata koristi bitumen, voda se ne vezuje kao u slučaju betona, već ostaje izdvojena. Time se postiže važna prednost u odnosu na težinu. Pored toga, bitumen se mnogo manje rastvara od betona. U istom cilju, kao sredstvo za oblaganje predloženi su sumpor, gips i staklo, koje se pokazalo kao veoma pogodno za ovu namenu, pošto se ne menja, nije rastvorno i mehanički je otporno. Primenjuju se i prirodni silikati i liskun.

KONCENTRACIJA. Ovaj postupak se primenjuje u prvom redu na jako radiokativne tečne efluente, kao i na čvrste materije.

Tečni efluenti. Koncentracija se postiže uparavanjem, hemijskim taloženjem i izmenom jona.

• *Uparavanje* je od svih postupaka koncentracije tečnosti najprostije i najefikasnije. Prisustvo organskih produkata u efluentima može biti opasno i povoljnije je izdvojiti ih pre uparavanja.

• *Hemijsko taloženje* omogućava koncentrisanje radioaktivnosti stvaranjem čvrste mase koja se odvaja filtriranjem. Isto tako efluenti se tretiraju reagensima koji se normalno koriste za prečišćavanje vode, čime se prouzrokuje stvaranje taloga koji povlači i radio-izotope. Reagensi koji se koriste (aluminijum sulfat, natrijum karbonat ili fosfat) nisu skupi, ali nisu naročito efikasni. Koriste se i specijalni reagensi (nikl sulfat, ferocijanid bakra) kojim se direktno talože radio-izotopi.

• *Izmena jona* uz pomoć mineralnih ili organskih materija je skupo rešenje, a primena teška. Zasniva se na izmeni slobodnih jona koji su u rastvoru sa jonima labavo vezanim za pomenute materije sa kojima su došli u kontakt. Primenjuje se za prečišćavanje vode za hlađenje reaktora. I zemlja poseduje sposobnosti izmene, ali u veoma maloj meri. Ipak, u odnosu na velike zapremine sve više se koristi za filtriranje radioaktivnih efluenata.

Čvrsti otpaci. Primenjuju se dva postupka.

• *Komprimovanjem* izvesnih čvrstih materija, naročito onih koje potiču iz laboratorija, njihova zapremina se smanjuje u odnosu 5 : 1. To se postiže u metalnim kalupima, koji su zaštićeni u toku rada betonskim oblogom, primenom hidrauličnih presa.

• *Spaljivanjem* otpadaka iz laboratorija, koji su većim delom sagorljivi, znatno se smanjuje zapremina. Iako je princip na izgled prost i privlačan, operacija je tehnološki teška.

DEFINITIVNO ODLAGANJE RADIOAKTIVNIH OTPADAKA

Stvarni problem radioaktivnih otpadaka se svodi na njihovo odlaganje ili *uskladištenje*. Odlaganje daleko od centara proizvodnje zbog udaljenosti stvara prvo teškoće ekonomske (ovo rešenje postavlja problem transporta i komplikacije oko održavanja), a zatim i psihološke prirode što sa sobom povlači donošenje određenih propisa.

ZAKOPAVANJE. Osim zakopavanja u samoj blizini mesta proizvodnje, razmatra se korišćenje tunela van upotrebe, starih rudnika i kamenoloma, posebno rudnika soli, pa čak i starih naftnih bušotina.

Železnički tuneli van upotrebe moraju ispuniti određene uslove. Moraju imati zidove u dobrom stanju i biti lako pristupačni. Svod treba da bude nepropustan, a zidovi obloženi. Posebno treba nadzirati ulaz u tunel u odnosu na skupljanje vode. Konačno, u toku punjenja osoblje mora biti zaštićeno uzastopno postavljenim pregradama.

Za odlaganje otpadaka *stari rudnici soli* pružaju mnoge prednosti s obzirom na njihovu prirodu: nepropusnost zemljišta za doticanje vode, velike količine soli iz raznih geoloških formacija koje postoje u zemlji, mogućno kasnije vađenje, pripremni radovi za iskopavanje laki, slaba seizmičnost u zonama glavnih ležišta.

URONJAVANJE. Treba razlikovati slučaj tečnih efluenata i čvrstih otpadaka.

Tečni efluenti. Pošto je more normalno radioaktivno, bez veće opasnosti mogu se u njega sipati tečni efluenti slabe ili srednje aktivnosti. Razblaženje i rasturanje su faktori za dovoljnu sigurnost s obzirom na znatna vodena prostranstva koja su obuhvaćena. Već desetinu godina francuski nuklearni centri prosipaju u Lamanš i u Mediteran količine radioaktivnosti koje su manje od onih koje se normalno nalaze u nekoliko kubnih kilometara.

Čvrsti otpaci. Rešenje se sastoji u tome da se radioaktivni otpaci pošto su zatvoreni u betonski ili metalni sud spuste na morsko dno velike dubine. Mase kontinenata su okružene podnožjem koje postepeno silazi do dubine od 200 m, odatle se nagib povećava da bi brzo stigao do 4.000 m. Međutim, pored tih opštih aspekata postoje ponori koji dosežu i do 10.000 m. Ovi ponori su poznati, i može se pretpostaviti da predstavljaju idealna mesta za smeštaj, pod uslovom da vodena stihija neće uništiti nade koje se polažu u čvrstoću uronjenog bloka. Međutim, more je sredina koja je stalno u pokretu i o njoj se malo zna. Stoga treba biti na oprezu.

Preveo **Nenad Raišić** **Philippe REINE**

INDEKS

GEOGRAFIJA

A

Aberdin, 97
Abisinci, 192
ablacija, 31
abrazione, terase, 36
Abruci, 114
Abu Zabi, 171
Abvil, 69
ada,
  v. rečno ostrvo
Adis Abeba, 201
Afar i Isa, 201
Afrika, 29, 30, 37, 42, 188:
  — istočna, 201
  — južna, 32, 38, 47, 201
  — severna, 38, 41, 45, 195
  — severoistočna, 197
  — zapadna, 198
agrarna reforma, 97, 111, 114, 154, 174, 181, 184, 216
agropedologija, 57
agrumi, 80, 168
Ahen, 103
Ahmadabad, 176
Akonkagva, 212
akumulacija, 16, 18, 20
akumulaciona ravan, 20
Akvitanija, 65
Albanija, 42, 151, 157
Albanci, 118
Alenti, 159
»alm«, 108
Alma-Ata, 166
Alpi, 23, 55, 106, 108:
  — Dolomitski, 113
  — Japanski, 171
  — Julijski, 148, 154
  — Lombardijski, 113
  — Pijemontski, 51, 113
  — Savinjski, 148
  — Sečuanski, 183
  — Transilvanski, 153
  — Venecijanski, 113
alpska oblast, 23
Altaj, 54, 55, 161, 167
aluvijalne ravnice, 113, 146, 154, 173, 177
aluvijum, 16, 18, 22, 34, 36
Alzas, 64, 83, 84, 85
Alžir, 42, 44, 195, 197
Alžirci, 64, 84
Aljaska, 203
Amazon, 212
Amerika
  — Južna (Latinska) 32, 38, 42, 212
  — Severna, 36, 38, 40, 203
Amijen, 69, 91
Amur, 161
Anadolija, 168
anastomoze, 18
Andaluzija, 110
andezit, 132
Andi, 23, 212
Andra Pradeš, 172, 173
Aneto, 110
Angola, 201
Angulem, 76, 91
Antarktik, 24, 222
antecedencija, 23
anticikloni, 26, 29, 30, 55:
  — termički, 26, 32
  — dinamički, 26
anticiklonske oblasti, 26
Antili, 29, 213
antipasati, 26
antropogeografija, 14, 15, 37
Anvers (Antverpen), 95
Anže, 74, 91
Apalači, 203, 212
Apenini, 112
  — Centralni, 113
  — Južni, 113
  — Kalabrijski, 113
  — Ligurijski, 51, 113
  — Toskanski, 113
Apeninsko poluostrvo, 57
Ar, 108
Arabijsko poluostrvo, 167, 168
Arad, 156
Aralsko jezero, 159, 166
Arapi, 57, 159
Ardeni, 23, 54
areizam, 190
Arekipa, 219
Argentina, 47, 218
arhipelag, 96, 99
aridne oblasti, 31
Arkanzes, 47
Arktički okean, 32, 54, 222
Arktik, 24, 36, 222
Armanjak, 75
Armorički masiv, 71
arteski bunari, 144, 191, 192
Asab, 201
Astrahan, 165
Asturija, 111
Asuan, 191
Atina, 116
atmosfera, 24
Atlantski okean, 54, 188
Atlas, 188
atol, 36
atomska energija,
  v. nuklearna energija
Australija, 32, 38, 39, 41, 219
  — južna, 32
Austrija, 45, 106, 107, 108
Avala, 121
Aveiro, 112
Avinjon, 67
Avr, 63, 70, 89
Azerbejdžan, 165, 166
Azija, 26, 38, 42, 47, 167
  — jugoistočna, 177
  — južna, 38
  — monsunska, 171
  — zapadna, 167, 168, 171
Azorska ostrva, 55
Azovsko more, 159
Azurna obala, 78
Ažaksio (Ajačio), 81

B

Bačka, 14
Bajina Bašta, 147
Bajkalsko jezero, 45, 161
Bajon, 90
Bakongo, 192
Baku, 46
Balaton, 156
Balkan (planina), 54, 153, 154
Balkansko poluostrvo, 54, 154
Baltičko more, 50, 152
Baluba, 192
Balučistan, 176
Bamako, 199
Banat, 144
Bangkok, 178
Bangladeš, 42, 176
bankiza, 222
Banovići, 131, 147
Banja Luka, 148
banje, 124, 125, 142, 146, 147, 150
Bar, 151
Baranja, 145
Bareiro, 112
Bari, 115
Barselona, 112
baseni, 15, 114, 153, 154, 158, 159:
  — fluvijalni, 114
  — rečni, 15
  — sabirni, 15
  — sedimentni, 54, 55
  — tektonski, 152
  — terminalni, 121
Bastija, 81
batolit, 22
Bavarska visoravan, 54, 102
bazalt, 15, 22, 23, 153, 168, 173, 212
Bazel, 45, 89, 108
Beč, 107, 108
Belfast, 99
Belfor, 85
Belgija, 40, 44, 93, 95
Belgijanci, 88
Bengal, 167, 173
Bengalski zaliv, 173, 188
Beneluks, 93
Beograd, 143
Berlin
  — Istočni, 159
  — Zapadni, 106
Bermingem, 43, 51, 97
Bern, 108
Berska močvara, 79, 80
Betijski kordiljeri, 110
Bezanson, 85, 91
Bezije, 80
beždvodne oblasti,
  v. aridne oblasti
biciklična evolucija, 22
bifurkacija, 144
Bihać, 148
Bihor, 152
biljni pokrivač, 27, 30, 94, 114, 188
Biokovo, 120
biotit, 22
Biro, P., 14
Bitolj, 150
Bjelašnica, 122
Blaš, Vidal de la, 14
Blašov zakon, 22
Blatno jezero,
  v. Balaton
Bledsko jezero, 124
Bliski istok, 37, 54
Bohinjsko jezero, 124
bokaži, 58
Bolivija, 41, 218
Bolt, H., 14
Bombaj, 173
Bor, 133, 143
Bordo, 63, 76, 77, 90
Borneo, 180
Bos, 64
Bosfor, 54, 167
Bosna (reka), 146
Bosna i Hercegovina, 118, 146
Boston, 45, 208
Botnijski zaliv, 100
Brabant, 43
Bradford, 41, 51
Bramaputra, 173
Brač, 121
brane, 172, 176, 197
Bratislava, 155
Bratsk, 165
Brazil, 38, 218
Brčko, 148
Bremen, 43, 106
Brest, 62, 90

C

Celje, 149
cement, 41, 43, 132, 133, 161
Centralni masiv, 23, 51, 83
Centralnoafrička Republika, 201
Cer, 121
cerealije, 66, 80, 108, 111, 115, 116, 125, 138, 144, 152, 155, 156, 157, 174, 184, 192, 193
Cetinje, 151
cikloni, 26, 29, 31, 32, 55, 176, 203
  — »norveški«, 26, 31, 32
ciklonske oblasti, 26
Cinling, 183
Cirih, 45, 108
Cres, 118, 121
Crna Gora, 150, 151
crna metalurgija, 40, 45, 47, 62, 83, 84, 87, 88, 95, 97, 99, 100, 103, 112, 115, 116, 134, 161
crnica, 125, 144
Crnogorci, 118
Crni Drim, 123
Crnoljeva, 144
Crno more, 57
crvenica, 57, 125
Crveno more, 168
Cvikanu, 159

Č

Čačak, 143
Čad, 191
Čakor, 129
časovničarstvo, 108
Čateške Toplice, 125, 142
Čehoslovačka, 42, 45, 151, 155, 156
čelik, 41, 45, 101, 103, 115, 133, 155, 156, 157, 174
Čeljabinsk, 165
černozem, 29, 34, 57
Česi, 155, 156, 159
Češke Budejovice, 155
Češke planine, 54, 152
Češki kvadrilateral (četvorougao), 54, 152
Češki masiv, 106
četinari,
  v. šume zimzelene
Čevljanovići, 133
Čikago, 45, 208
Čile, 41, 218
Čini, 177

D

Dablin, 99
dacit, 132
Dahomej, 198, 199
dajkovi, 23
Daleki istok, 32, 47, 183
Dalmacija, 145
Danakili, 201
Danska, 44, 48, 99, 100
Darbi, 15
Dardaneli, 54
Davos, 109
Debar, 137
Debarska kotlina, 137
Debrecin, 156
Defonten, P., 37
Dekan, 23, 167, 173
dekolonizacija, 42
dekompozicija, 16
delta, 18, 20, 113, 152, 173
Demanžon, A., 14, 37, 41
demografija, 37, 38, 64, 79, 84, 85, 94, 174, 185, 214
Demokratska Republika Vijetnam, 181
Denkerk, 47
Denver, 208
depopulacija, 65, 75, 127
depresije, 15, 18, 35, 54, 82, 86, 102, 108, 167, 203
  — antiklinalne, 20
  — sinklinalne, 20

— subsekventne, 20
— zatvorene, 35
Detroit, 211
Devis, B. M., 14
dezagregacija, 16, 18, 30, 34
dijaklaze, 22, 31
Dijep, 70
diluvijum, 35, 99
Dinaridi, 115, 118, 146
Dinarske planine, 55, 118
Dion, P., 15
Dirans, 64
Diseldorf, 51, 106
diskordancija, 20
Dižon, 62, 81
Dnjepar, 54, 159
Dnjestar, 159
Dobrudža, 153
Dojransko jezero, 124
doleriti, 22
doline, 20, 86
dolomit 146, 148
dolovi, 20, 22
Don, 45, 50, 159
Donbas, 164
Donja Dofineja, 82
Donjecki basen, 45
Dordonja, 62
dorsal, 36, 99
Dortmund, 51, 106
Doverski moreuz, 86
Drač, 157
Drava, 123
drenaža, 29
drenažni slivni sistem, 15
Drezden, 159
Drina, 123
Drvar, 147
drvo, 100, 132
dry zone, 177
Dubrovnik, 146
»Duge bele planine«, 185
Duizburg, 106
Dunav, 57, 102, 118
dune, 31, 36, 102, 153, 156, 203
Durmitor, 120, 151
Duro, 110
Duvanjsko polje, 120

DŽ

Džakarta, 180
Džibuti, 201
Džonson, D. V., 14
Džordžija, 47

Đ

Đakovica, 145
Đamana, 201
Đenova, 44, 115
Đer, 156
Đerdap, 118, 120, 153
Đerdapsko jezero, 143

E

Edinburg, 97
EFTA, 47, 99, 100, 108, 109, 117
Egejska Makedonija, 115, 116
Egejski basen, 14
Egejsko more, 115
Egipat,
v. UAR
Egual, 78
Eks-an-Provans, 79
ekvator, 26
ekvatorijalna:
— zona, 24, 26
— kalme, 26, 29
— pojas, 27
Ekvatorska Gvineja, 201
Eland, 99
Elbasan, 157
emigracija, 86, 97, 114, 115, 116
endoreizam, 190
energetika, 131, 132
Engleska, 97
Englezi, 97
»environmentalizam«, 14
eocen, 120, 152, 173
epigenija, 23
Epir, 115
epirogeni pokreti, 119
Erastoten, 14
ergovi, 31
erozija, 14, 15, 18, 24, 31, 34, 63, 86, 93, 99, 188, 208:
— bočna, 18
— diferencijalna, 22, 23
— eolska, 15
— fluvijalna bočna, 20
— karsna, 15
— kraška, 15
— lednička, 15, 35
— linearna, 16, 18, 20, 30, 35
— regresivna, 18
erozioni ciklus, 14, 16, 35
— stadijum:
— prve mladosti, 16, 18, 22
— druge mladosti, 18, 20
Esen, 51, 106
eskarpmani, 15, 20, 22, 23:
— kompozitni, 23
— plazevi s vencem, 20
— rasedni, 20, 22, 23
Eskimi, 39, 159
Estonci, 159
Estonija, 162
estuari, 51, 55, 63, 76, 97, 152
Eš-Alzet, 95
Etiopija, 201
Etna, 23, 113
Eufrat, 168
Evropa, 35, 36, 37, 38, 41, 42, 54:
— istočna, 61
— jugoistočna, 151
— mediteranska, 61, 110
— severozapadna, 61, 93
— srednja, 102, 151
— zapadna, 61, 106
evstatički pokreti, 20

F

Fatničko polje, 124
fauna, 125, 130, 150
feldspati, 22
fen, 27
Ferara, 114
fertilitet, 64
Filadelfija, 208
Filipini, 37, 181, 219
Finci, 159
Finska, 99, 100
fitoplankton, 36
fjelovi, 99
fjordovi, 35, 55, 99
Flandrija, 57, 95
fleksura, 23
fleksurno savijanje slojeva, 20
fliš, 55
Flitvud, 97
flora, 125, 130, 150
fonoliti, 23
Fontenblo, 69
Fossa Magna, 186
Francuska, 39, 40, 42, 44, 61, 62
Francuzi, 64
Frankfurt na Majni, 45, 106
Frankfurt na Odri, 158
Franš-Konte, 83
Frežis, 79
Fudžijama, 186

G

gabar, 132
Gabon, 201
Gagauzi, 159
gajnjača, 125
Galapagos, 219
Galičica, 149
Gambija, 198
Gang, 173
Gargano, 113
garig, 34, 57, 78, 80
Garona, 62
Gaskonjski zaliv, 75
Gatačko polje, 124
Gati
— Istočni, 173
— Zapadni, 171, 173
Gdanjsk, 155
geografija,
— agrarna, 15
— društvena, 15
— ekonomska (privredna), 15, 37, 38
— fizička, 15, 16
— istorijska, 15
— politička, 15
— retrospektivna, 15
— saobraćajna, 15
— urbanistička, 15
— zonalnih aspekata, 14
geografska:
— dužina, 24, 54, 172 203
— širina, 24, 26, 31, 32, 54, 171, 203
geomorfologija, 14
— dinamička, 14
— klimatska, 14
geosinklinala, 22, 23, 54, 152
geotektonski pokreti, 20
Germani, 58
»gest«, 102, 103
Getski basen, 153, 154
Gezira, 201
Gibraltar, 110
Gibraltarski moreuz, 188
Gijana, 38
Gilbert, K. G., 14
glacijacija, 20, 35, 54, 99, 102
— kvartarna, 54, 55
glacijalni kat, 31
Glasinačko polje, 146
Glazgov, 43, 51
glečeri, 32, 35, 55, 99, 102, 108, 120, 148, 203
glina, 16, 20, 29, 30, 31, 32, 35, 54, 55, 86, 108, 152, 203
gnajs, 22, 30, 106, 153, 173, 191
godišnja doba, 24, 26, 29
goleti, 23
Gornja Volta, 198
Gornje jezero, 45
Gorski kotar, 145
Gotland, 99
Gotman, Ž., 15
Gradišče, 107, 118
gradovi, 50, 51, 52, 53, 60, 74, 78, 85, 87, 96, 127, 146, 150, 151, 152, 211
Granada, 111
Grand-Šartrez, 20, 22, 23
granit, 16, 22, 23, 31, 36, 99, 106, 132, 191
granitizacija, 23
Grci, 159
Grčka, 38, 115, 116
grebeni, 20, 22, 35, 36
— koralski, 36
— resasti, 36
Grenland, 32, 99, 222
Grenobl, 82
Grijer, 108
Grimzbi, 97
grotlo,
v. krateri
Gruzija, 166
Gstad, 109
Guru R., 14
gustina naseljenosti, 37, 47, 102, 103, 126, 155, 191, 207, 214
Gvadalkivir, 110
Gvineja, 47, 199
Gvinejski zaliv, 188
Gvozno, 146

H

Hadsonov zaliv, 203
Hajfong, 181
Hal, 97
halig, 102
Hamburg, 43, 51, 106
Hanoj, 181
Hanover, 43, 102
Hantington, 37
Harc, 102
Haris, Č., 15
Harkov, 164
Hartke, V., 15
Hartšorn, R., 14
Hausa, 192
Havaji, 219
Helsinki, 100
hemisfera:
— južna, 24, 26, 29, 31, 37
— severna, 24, 26, 29, 30, 31 32, 37o
Herceg-Novi, 151
hercinski masivi, 54, 62, 80, 152, 153, 158, 161
Herodot, 14
Hetner, A., 14
hevea, 177
hidroelektrane, 45, 66, 83, 85, 99, 100, 108, 116, 132, 147, 148, 150, 151, 155, 157, 161, 194, 208, 210
hidroelektrična energija, 43, 45, 77, 78, 132
hidrografija, 15, 32, 122, 161
hidrologija, 24
hidrosfera, 15
Himalaji, 23, 167, 173
hladni pojas, 31, 32
Hoangho, 183
Hogar, 23, 31, 188
Hokaido, 186
Holandija, 40, 42, 43, 44, 93, 95
Holanđani, 38, 88
holokarst, 14
Hongkong, 37, 185
Honolulu, 219
Honšu, 45, 186
horst, 22, 23, 54, 118, 153
Hotentoti, 192
Hrvati, 118
Hrvatska, 118, 145
Hrvatsko Zagorje, 145
Humbolt, A. fon, 14
humus, 16, 18, 29, 32
Huni, 58

I

Ibersko poluostrvo
v. Pirinejsko poluostrvo
Ibu Batuta, 14
Idrija, 148
Igman, 123, 147
Ilidža, 125, 142, 148
ilit, 29
imigracija, 64, 85, 86, 97, 108, 114
In, 108
Ind, 173
Indija, 30, 37, 38, 41, 173
Indijski:
— okean, 30, 47, 173
— potkontinent, 173
Indokina, 29, 30
Indonezija, 29, 30, 37, 179, 180
industrija, 38, 39, 68, 74, 82, 84, 86, 87, 88, 95, 97, 100, 111, 112, 115, 116, 133, 146, 147, 148, 150, 155, 156, 157, 158, 159, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 176, 184, 185, 195, 208, 209, 210, 211, 218, 220:
— automobilska, 88, 115, 134, 143, 147, 148, 155, 176
— drvna, 85, 107, 135, 147, 155, 162
— duvanska, 136, 150
— građevinska, 67, 135
— ekstraktivna, 67, 111
— elektronska, 43, 76, 92, 103, 107, 134, 143, 148, 150, 155
— hemijska, 44, 67, 83, 88, 92, 97, 103, 107, 108, 111, 115, 134, 143, 147, 148, 155, 157, 161, 176
— laka, 73, 161
— kožarska, 76, 98, 135, 155
— mašinska, 43, 67, 87, 92, 103, 107, 108, 115, 134, 155, 157, 176
— metalna, 76, 78, 92, 108, 115, 134, 209
— prehrambena, 76, 86, 87, 103, 108, 136, 143, 150, 155, 156, 157, 209
— prerađivačka, 99
— tekstilna, 40, 43, 44, 67, 76, 84, 85, 86, 87, 98, 99, 107, 108, 112, 115, 135, 148, 150, 155, 156, 157, 208
— teška, 40, 45, 107, 111, 157
industrijalizacija, 66
industrijske biljke, 138, 148, 155, 156, 162
industrijski regioni (rejoni), 42:
— zagrebačko-ljubljanski, 136
— vojvođansko-slavonsko-beogradski, 136
— jadranski, 137
— kragujevačko-niški, 136
— skopsko-kosovski, 137
— srednjobosanski, 136
inlandajs, 35, 36
inselbergovi, 173, 177
insolacija, 24
interglacijalne epohe, 20
intruzije, 22
inundaciona ravan, 18
Irak, 168, 171
Iran, 50, 168, 171
Iranci, 159
Iravadi, 177, 178
Irci, 97
Iri, 50, 210
Irska, 44, 97, 99
Irsko more, 55
Islambad, 176
Island, 99
Istočna Nemačka
v. Nemačka Demokratska Republika
Istra (poluostrvo), 121
Italija, 40, 44, 112
Italijani, 64, 88, 118
Ivangrad, 150
izdani, 15, 16, 173
— površinski, 15
izobare, 26

J

Jablaničko jezero, 147
Jablonec, 155

Jablonojske planine, 55, 161, 167
Jadranski:
— basen, 120
— more, 54, 55, 122, 154
Jaila, 55
Jajce, 147
Jakuti, 39
Jamajka, 38, 47
Jangcekjang, 50, 183
Japan, 38, 39, 40, 45, 186
Japanski arhipelag, 32
Jarmaut, 97
Jastrebac, 143
Jaši, 156
Jenisej, 45, 50
Java, 180
Jermeni, 64
Jesenice, 118
jet—stream,
v. mlazna struja
Jevreji, 64
jezera, 15, 29, 50, 99, 124, 130, 144, 146, 147, 150, 161, 188, 191:
— eolska, 144
— glacijalna, 161
— kraška, 124
— rečna, 124
— tektonska, 124, 161
— veštačka, 124, 143, 147, 156
Jiland, 99
Jonsko more, 115
Jordan, 168, 171
Jorkšir, 97
Joruba, 192
Jugoslavija, 42, 45, 47, 48, 107, 118
Jugosloveni, 64
Jukatan, 213
Jungfrau, 108
Jura, 55, 81, 84, 108, 188, 203
Južnoafrička Republika, 202

K

Kačini, 177
kafa, 47
Kairo, 198
Kakanj, 131, 147
Kalabrija, 114
Kalkuta, 173
Kamarg, 78
Kambodža (Kmer), 37, 178
Kambrezi, 64
Kamčatka, 55, 165, 167
kamenolomi, 76
Kamerun, 201
Kampala, 201
Kampina, 95
kanali, 47, 50, 66, 85, 89, 137, 144, 162, 172, 176
Kan, 69
Kanada, 29, 32, 35, 37, 38, 39, 41, 210, 211
Kambera, 220
Kantal, 23
kantoni, 108
kaolin, 16, 29, 75, 78
Karači, 173, 176
Karaganda, 45, 166
Karakorum, 173
Karavanke, 148
karbohemija, 84
Kareni, 177
Karl-Marks-Štat, 159
Karlovac, 146
Karlove Vari, 155
Karlsrue, 85
Karpati, 54, 118, 119, 152, 153
karsna polja,
v. kraška polja
Kartum, 201
kaste, 174
Kastilja (Kastilija), 110
Kašmir, 173
Katovice, 45, 155
kaučuk, 47
Kavkaz, 54, 167
Kazahi, 159
Kazahstan, 45, 165, 166
Kazanj, 164
Kečkemet, 156
Keln, 103
Kenija, 201
kenozoik, 62, 118
Kereš, 156
Kijev, 161
Kikinda, 144
Kikladska ostrva, 115
Kilimandžaro, 188
Kina, 37, 38, 41, 42, 183
Kinezi, 159
Kipar, 115
Kirgizi, 159
Kiš Alfeld, 156
kišnica, 133
kišni režim:
— ekvatorijalni, 31
— tropski, 31
Kjoto, 186
Kju-šu, 45, 186
Klermon-Feran, 78
klifovi, 36, 55, 121
klima, 14, 24, 63, 78, 81, 84, 86, 94, 97, 112, 114, 115, 121, 129, 144, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 158, 161, 167, 171, 172, 183, 188, 190, 203, 207, 213, 214, 220:
— ekvatorijalna, 36, 188
— kontinentalna, 84, 110
— planinska 55, 122
— pustinjska, 31, 190
— sredozemna, 110, 122, 190
— tropska, 188
— umerenokontinentalna, 121
— župna, 122
klimati, 24, 29, 31, 32
klimatologija, 14
klisura, 22, 120, 148
klongi, 172
kluze, 108
Kluž, 156
Kmeri, 178
kolhozi, 41
Kolmar, 85
kolonija, 40
Kolorado, 203
Komentri, 78
Komonvelt, 42, 97, 99, 210
Kongo-Brazavil, 201
Konstanca, 156
kontejnerski:
— terminali, 49,
— brodovi, 49
kontinenti, 24, 26, 31, 32, 54
kontrapadina, 15
konurbacija, 86, 87, 99, 155
Konjuh, 147
Kopaonik, 143
Kopenhagen, 100
kopno, 24
Kordiljeri, 110
Kordun, 146
Koreja, 37, 42
— Južna, 185
— Severna, 185
Korint, 116
Koriolisov:
— zakon, 26
— sila, 36, 172
Kork, 99
Korzika, 80
Kosovo, 118, 144
Kosovska Mitrovica, 145
košava, 121
Košice, 155
kotline, 31, 148, 149, 150, 188
— hidroeolske, 31
Kozara, 147
Kragujevac, 143
Kraljevo, 143
Krakatau, 180
Krakov, 45, 155
Kranjska gora, 149
kras:
— »boginjav«, 120, 150
— »ljuti«, 120, 150
Krasnojarsk, 165
kraška polja, 18, 120, 123, 124 146, 147, 148, 150
krateri, 23
— tektonskog spuštanja, 23
— eksplozivni, 23
Kratovo, 150
krečnjak, 16, 20, 32, 54, 86, 93, 148, 212
kreda, 16, 35, 86
Kredarica, 148
Kreka, 131, 147
kretacejske padine, 86
Krim, 161
krioklastija, 16, 35
kriptodepresije, 121
Krit, 55, 115
Krivoj Rog, 164
Krk, 121
Krka, 148
Krkonoše, 153
Kruševac, 143
Kruševo, 150
kružni obalski prsten,
v. atol
Kuba, 29, 42
kuesta, 15, 20, 22, 23, 54, 110, 153
Kujbišev, 164
Kumanovo, 150
Kupreško polje, 120
Kursk, 45
Kuvajt, 171
Kuznjecki basen, 165
kvarc, 22, 177
kvarcit, 20, 23, 173
kvartar, 55, 102, 152, 177

L

Laba (Elba), 42, 102
Labas, Ž., 15
Labin, 131
Labrador, 47
Lajpcig, 159
La Manča, 111
Lamanš, 54, 86
Land, 75
Langdok, 63
Lankašir, 98,
Laos, 37, 178
La Plata, 50
Laponci, 159
laporac, 20, 22, 62, 108
La Rošel, 76
Lastovo, 118
laterit, 30
lava, 23
Ledeni okean, 50
ledeno doba, 34
lednici,
v. glečeri
ledni pokrivač,
v. inlandajs
Le Man, 70, 91
Lemansko jezero,
v. Ženevsko jezero
Lena, 54, 165
Lenjingrad, 161, 162
Leposavić, 145
les, 55, 144, 146, 152
Leskovac, 143
lesne zaravni, 120
Lesoto, 202
Letonci, 159
Letonija, 162
Liban, 171
Liberija, 48, 199
Libija, 44, 197
Libijska pustinja, 47
Ličko polje, 120
Lidz, 43, 51
Liež, 43, 95
Lika, 145
Lil, 44, 63, 90, 91
Lima, 219
Limanja, 78
limnologija, 190
Limož, 91
Limuzen, 78
Linc, 45, 107
Lineburške pustare, 100, 103
Lion, 67, 81, 83, 91
Lipik, 146
Lisabon, 112
Lisa gora, 54, 153
liskun, 22, 29, 32
litološka struktura, 20
litoralni kordon,
v. obalski venac
litosfera, 15
Litvanija, 162
Livanjsko polje, 120
Liverpul, 51, 98, 99
Livorno, 44, 115
Loara, 62
Lod, 45, 155
Lofotska ostrva, 100
Logarska dolina, 149
Lokarno, 109
Lombardijska nizija, 114
Lomonasovljev greben, 222
London, 39, 51
Loren, 43, 47, 65, 84, 85, 97
Lorensov kanal, 47
Los Anđeles, 208
Lošinj, 118
lov, 139, 192, 210
Lovćen, 120
Lozana, 109
Lublin, 155
Luksemburg, 44, 93, 94
Lurd, 47
Luzon, 181
Lvov, 164

LJ

Ljubljana, 149
Ljubljanica, 148
Ljubija, 133

M

Mačkatica, 133
Mačva, 143
Madagaskar, 188, 202
Madras, 173
Madrid, 111, 112
Mađari, 118
Mađarska, 42, 45, 151, 156
Mađore, 113
Magdeburg, 158
Magelan, 14
Magelanov moreuz, 212
Maglić, 146
Magnitogorsk, 165
Magreb, 54, 195
Majna, 50, 103
Makedonci, 118
Makedonija, 118, 149
makija, 57, 78
makroplavine, 146
Malajci, 178
Malajski svet, 179
Malavi, 191, 201
Malezija, 37, 42, 179
Malezijski svet, 177
Mali, 198
Malme, 169
Malorusi, 163
Mančester, 51, 99
Mandžurija, 46, 183, 184
Manhajm, 74
Manila, 181
maniok, 192, 193
Maramureš, 153
Maribor, 118, 149
Marica, 156
Marko Polo, 14
Maroko, 195, 197
Marsej, 44, 63, 79, 90, 91
Martinik, 38
Marton, E. de, 14
Materhorn, 108
Mauritanija, 47, 198
Mavri, 192
Mavrovsko jezero, 150
Mazgit polje, 144
meandri, 18, 154
Mec, 84
Mediteran,
v. Sredozemno more
međurečje, 15, 158, 173
Mek Kinli, 203
Meksički zaliv, 47
Meksikanci, 203
Meksiko, 213, 218
Melanezija, 221
Melbern, 220
melioracija, 137
Meoji, 178
metalurgija, 134, 143, 155, 208
Metohijska kotlina, 144
Mez, 57
mezolitik, 192
mezozoik, 23, 55, 86, 108, 149, 153
Mežice, 133, 134
Midlandz, 98
migracije, 38, 57, 84, 126
Mikronezija, 221
Milano, 45, 115
Miluz, 85
Milvoki, 45
Mindanao, 181
Minhen, 106
miocen, 153
Misisipi, 50, 203
Misuri, 203
Miškolc, 156
Miteland, 108
mlazna struja, 26
močvare, 154, 158
Moldavci, 159
Moldavska, 156
Mombasa, 201
Mon Blan, 82
Mongoli, 58
Mongolija, 42, 47
Monlison, 78
monociklična evolucija, 22
Mon Pele, 23
Monpelje, 80, 91
Mon Perdi, 110
Mon Serven,
v. Materhorn
monsuni, 26, 30, 32, 167, 171, 172, 207
montmorionit (bentonit), 16, 29
Montreal, 211
Monte Roza, 108
Mont Renir, 203
Morava, 121
Moravska, 45, 108
more, 27, 55
morene, 35, 55, 99, 102, 152

— ledničke, 35
— padinske, 35
moreuzi, 54, 55
morske struje, 26, 31, 123:
— Benguelska 36, 190
— Golfska, 36, 55, 99
— Humboltova, 36
— Kanarska, 190
— Kuro-šio, 36, 185, 186
— Labradorska, 36
— Mozambička, 190
— Oja-šio, 36, 186
morsko razvođe, 144
Mosi, 192
Moskva, 45, 161, 162, 163
Moskva (reka), 162
Mostar, 148
Mozambik, 201
Mozel, 43, 89, 103
Mozelski kanal, 89
mrka tla, 32
Mrtvo more, 168
Mulhasen, 110
mulj, 16, 18, 30, 34, 55
Mura, 148
Mušutiške šume, 144

N

nabiranje slojeva, 20
nacija, 64
nadmorska visina, 30, 106
nafta, 40, 43, 45, 46, 47, 67, 76, 103, 111, 115, 131, 147, 148, 150, 152, 154, 155, 156, 168, 194, 208
naftovodi, 47, 80, 83, 89
Nagasaki, 187
Nagoja, 186
Namibija, 202
Nansi, 43, 84, 89, 91
Nant, 63, 67, 90
Napulj, 115
NATO, 47
navlake,
v. šarijaži
navodnjavanje, 137, 176, 192
nek, 23
Nemačka Demokratska Republika, 42, 151, 158
Nemci, 38, 88
neogen, 118, 177
neolitik, 192
neomaltuzijanizam, 97
Neretva, 123
nesvrstane zemlje, 42
Nešatelsko jezero, 108
Nica, 78, 88, 90
Niger, 191, 198
Nigerija, 198
Nijagarini vodopadi, 50, 203
Nil, 188
Nilci, 192
Nikšić, 151
Nikšićko polje, 150
Nim, 80
Niš, 143
Niška Banja, 125, 142
Nordijske zemlje, 35, 99, 100, 101
Normandija, 65
Normani, 58
Nortamberland, 97
Norveška, 44, 100, 101
Nova Gvineja, 39
Nova zemlja, 55, 161
Novi Sad, 144
Novi Zeland, 32, 219, 220
Novosadska Banja, 144
Novosibirsk, 165
nuklearna energija, 47, 132

NJ

Njasa,
v. Malavi
Nju Džersi, 211
Njujork, 208

O

Oaza, 70
Ob, 159
obale, 16
— konkavne, 16, 18
— konveksne, 16
Obala Slonovače, 198
obalski venac, 36
Obilić, 131
oblaci, 24
obojeni metali, 45, 99, 133
Odense, 100
Odenvald, 102
Odra, 45, 102
odron,
v. urnis
Ognjena Zemlja, 222
Ohajo, 209
Ohrid, 150
Ohridsko jezero, 124
okeani, 36
Okeanija, 37, 39, 129
Okland, 220
Oksford, 43
Olborg, 100
oligomiocen, 54
Olomouc, 155
Omanski zaliv, 30
Onterio, 45, 50, 211
Orlean, 70
orogeneza, 23, 71, 120, 153, 188, 203
— hercinska, 71
— kaledonska, 71
Osaka, 186
oseka, 36, 55
Osijek, 146
Oslo, 101
Ostrava, 45, 155
ostrva, 31, 55, 121, 221
Oulu, 100
Ovče Polje, 149
Overnj, 62

P

Pacifik,
v. Tihi okean
padavine, 24, 26, 29, 30, 31, 55, 84, 86, 114, 144, 151, 167, 168, 171, 188, 203, 207:
— frontalne, 27
— kiše, 24, 26, 27, 29, 30
— konvergentnih vetrova, 27
— orografske, 24, 29, 30
— rosa, 26
— slana, 26
— sneg, 26
Pa de Kale, 86
padi, 172, 173
padina, 15, 16, 29, 30, 31, 35, 55, 177
Pag, 121
Pakistan, 37, 42, 176
paleolit, 57
paleozojska (primarna) era, 54, 86, 102, 118, 144
Palermo, 113
Palićko jezero, 124
Pamir, 54, 55, 159, 164
pamuk, 47
Panama, 48
Pančevo, 144
Pandžab (Pendžab), 173, 176
Panonska:
— nizija, 118
— basen, 14, 118, 120, 153
Pariski region, 44, 63, 69
Pariz, 39, 44, 51, 67, 88, 90, 95
pašnjaci, 124, 125, 148
Patras, 116
pčelarstvo, 139, 156, 157
Pčinje, 149
Peć, 145
pećine, 146
Pečuj, 156
pedimenti, 31
pediplen, 30
pedogeneza, 16
pedologija, 57
pedološki pokrivač, 125, 146, 190
pejsaž, 14, 15, 20, 54, 71, 114, 115, 156
— humanizovani, 14, 57
Peking, 183, 184
Pelagonija, 149
pelejska pojava, 23
Peli, 192
Peloponez, 115
Pelješac, 121
Pensilvanija, 209
periglacijalni kat, 31
— reljef, 35
— sistem, 35
Perigor, 75
permafrost, 32, 35, 222
Perpinjan, 76
Persijski zaliv, 168, 171
Peru, 218
Perućica, 147
pesak, 16, 18, 20, 30, 55, 86, 152
peščar, 16, 20, 22, 23, 24, 31, 54, 86, 93, 99, 153, 173, 180, 212
peščare, 120, 144, 146
petrohemija, 88, 97, 103, 112, 210
pigmeji (negrili), 39, 192
Pij de Dom, 23, 77
Pikardija, 64, 65
pineplen, 18, 30, 35, 54, 62, 99
Piran, 149
pirinač, 172, 176
pirinčana polja, 172, 173, 187
Pirineji, 23, 44, 55, 77, 110
Pirinejsko poluostrvo, 54, 110
planine, 20, 22, 149, 188:
— flišne, 120, 153
— gromadne, 120 149
— rasedne, 120
— rudne, 120
— sekundarne, 20
— venačne, 120, 149
plantaže, 40, 216, 217
plavine, 18, 20
Plavsko jezero, 124
pleistocen, 102, 118, 144, 173
Pleven, 157
plima, 36, 55, 122
pliocen, 153, 173
Pliva, 124, 147
Ploskogorje, 54
Plovdiv, 157
Plovdivska kotlina, 157
Plzenj, 155
Po, 66, 112
podzol, 29, 32, 34, 63, 125
Pohorje, 148
polarne:
— kalote, 26
— oblasti, 222
— krug, 24
polderi, 103
Polinezija, 221
Polog, 149
polovi, 24
polubezvodne oblasti,
v. semiaridne oblasti
poluostrvo, 47, 54, 55, 112, 115
polupustinja, 161
polutar, 24, 172
— toplotni, 190
Poljaci, 64
poljoprivreda, 39, 41, 66, 69, 84, 86, 87, 92, 97, 100, 103, 106, 108, 111, 114, 116, 130, 137, 138, 139, 140, 141, 144, 146, 147, 148, 150, 155, 156, 157, 158, 162, 183, 187, 208, 216, 217, 220
poljoprivredni proizvodi, 47, 84, 86, 87, 173
poljoprivredni rejoni, 140:
— jadranski, 140
— panonski, 140
— peripanonski, 140
— planinski, 140
— vardarski, 140
Poljska, 42, 45, 151, 155
Pomoravlje, 143
ponornice, 18, 123, 147, 148, 150
poplave, 176
Popokatepetl, 213
Popovo polje, 124
Porto, 112
Portorož, 149
Port Sudan, 201
Portugalci, 38, 64
Portugalija, 38, 110
postglacijalna transgresija mora, 36
Postojnska jama, 148, 149
potaša, 84
Potsdam, 158
potoline, 22, 23, 24, 36, 86, 88, 203, 222
— tektonske, 22
Povardarje, 149
Povolžje, 164
povratnici, 24, 29, 188
povrće, 66, 97, 125, 138, 150, 162
površi, 15:
— aluvijalne akumulativne, 15
— erozivne, 15, 20
— prvobitne, 20
— strukturne, 15, 20
Poznanj, 155
Prag, 45, 155
prašume, 139, 147
Prealpi, 102, 108
prečage, 22
predgorje, 20, 24
prekambrijski kristalasti štitovi, 23
Prenj, 146, 147
prerija, 34
presedline, 55
Prespansko jezero, 124
Preuralija, 164
Priboj, 143
Prilep, 150
prirodni:
— gas, 43, 44, 45, 46, 47, 66, 76, 114, 115, 131, 132, 152, 154, 156, 161, 208
— priraštaj, 38, 51, 126, 191, 210, 214
pristanište, 43, 47, 48, 49, 85, 89, 90, 99, 110, 112, 115, 155
Priština, 145
Prizren, 137, 145
Probištip, 133, 134
Prokletije, 144
Prokljansko jezero, 124
Provansa, 63
Ptuj, 149
Pula, 146
pustara, 32, 99, 156
pustinje, 31, 161, 167, 190, 203

R

Racel, Fridrih, 14
radiolariti, 22
rafinerije, 47, 67, 87, 111
Rajna, 36, 42, 103, 158
Rangun, 178
rasedi, 20, 22, 23, 24, 62, 113, 121, 153, 168, 186, 188
— inverzni, 22
— tektonski, 18
raseline,
v. rasedi
Raša, 131
ravne površine,
v. površi
ravnice, 18, 156, 188
— aluvijalne, 35
ravnodnevica, 24, 29, 55, 188
razvođe, 31
rečna akumulacija,
v. akumulacija
rečna:
— dolina, 18, 156
— korito, 16, 18, 20, 35,
— nanos, v. aluvijum
— ostrvo, 18
— plovidba, 50
— terasa, v. fluvijalna terasa
regadio, 111
regije (regioni), 15, 75, 142, 162
Reinion, 202
Rejkjavik, 101
reke, 16, 29, 30, 55, 64, 121, 129, 183
reljef, 14, 15, 20, 23, 24, 31, 36, 54, 55, 62, 93, 99, 112, 121, 143, 145, 147, 148, 149, 150, 159, 168, 171, 173, 183, 195, 203, 212, 219:
— abrazioni, 14
— fluvijalni, 14, 31
— infraglacijalni, 35
— krečnjački, 18
— na katove, 168
— reziduelni, 31
— supraglacijalni, 35
— »šahovski«, 119, 203
— tektonski, 121
Ren, 67, 75, 91
Republika Vijetnam, 181
ribolov, 55, 74, 100, 112, 116, 139, 156, 187, 193, 208, 210
Rif-Tel, 188
Riga, 162
Riter, K., 14
rijasi, 55, 121
Rijeka, 118, 146
Rio de Ženeiro, 218
rioliti, 23, 132
Rodezija, 201
Rogaška Slatina, 125, 142
Rokfor, 78
Romanija, 146
Romi, 145
Rona, 50, 80, 83, 108
Ronsko-sonski kanal, 89
Rosario, 219
Rosbijeva teorija, 26
Rostok, 158
Roterdam, 43, 47, 106
Rt dobre nade, 47, 168
Ruan, 63, 70
Ruanda, 201
rudarstvo, 41, 43, 45, 132
rude, 40, 41, 42, 43, 45, 47, 77, 79, 85, 97, 99, 103, 111, 116, 130, 132, 147, 148, 150, 152, 155, 156, 157, 161, 194, 208, 210
rudnici, 40, 132, 144, 148, 150, 194, 208, 210
Rudnik, 143
rukavac, 123
Rumuni, 118
Rumunija, 42, 45, 151, 156
Rur, 43, 47, 103
Rusi, 64
Rusija, 162
Rusijon, 80
Rusini, 163
Ruteni, 163
Ruvenzori, 188

S

SAD,
v. Sjedinjene Američke Države
Sahara, 30, 31, 167
Sahalin, 165
Sajgon, 183
salinitet, 55
saltacija, 16
Samarkand, 165
Sandžak, 118
Samojedi, 39
San Paulo, 218
Santjago, 219
saobraćaj, 48, 60, 88, 99, 109, 111, 115, 130, 140, 146, 148, 150, 155, 156, 157, 162, 184, 209, 211:
— automobilski, 49, 140, 162, 209
— drumski, 49, 50, 111, 115, 140, 141, 162
— pomorski, 48, 86, 87, 89, 99, 111, 140, 141, 162
— putnički, 48, 99, 140, 145, 162, 209
— rečni, 141, 156, 162, 209
— vazdušni, 48, 50, 89, 141, 162, 209
— železnički, 48, 49, 66, 87, 88, 89, 99, 109, 140, 162, 209
Sar, 43, 103, 106
Sarajevo, 148
Sardinija, 38, 113
Sasta, 203
Saudi Arabija, 171
Sautempton, 97
Sava, 118
savana, 30, 190
Savezna Republika Nemačka, 39, 42, 43, 44, 102, 103, 106
Savez Sovjetskih Socijalističkih Republika, 32, 37, 38, 39, 40, 42, 45, 46, 151, 159
Sečuan, 184
sedimenti, 22, 23
— detritični, 22
Segedin, 156
Segu, 199
Seižal, 112
sekano, 111
sela, 53, 65, 71, 75, 77, 127, 200
semiaridne oblasti, 31
Semberija, 146
Sempl, Elen, 14
Sena, 62
Senegal, 38, 198
Sen Gothard, 108
Sen Kanten, 86, 87
Sen Lorens, 45
Sen-Malo, 71
Sen Moric, 109
Sen Nazer, 194
Sent Eloa, 78
Sent-Etjen, 66, 83
Seul, 186
SEV, 47
Seveni, 64, 80
Severno more, 100
Sevilja, 111
Sevojno, 143
Sibir, 32, 36, 151, 165
Sicilija, 38, 44, 113
Sidni, 220
Sihanukvil, 179
Sijamci, 178
Sijera Leone, 199
Sijera Nevada, 110, 203
Singapur, 37, 179
Sinkjang, 183
Sirija, 171
Sisak, 146
Sjedinjene Američke Države, 37, 39, 40, 42, 207, 211, 212
Skadarsko jezero, 124
Skandinavci, 38
Skandinavija,
v. Nordijske zemlje
Skoplje, 149
Skopska Crna gora, 150
Slavonija, 145
Slavonski Brod, 146
slivovi, 123:
— Crnomorski, 123
— Egejski, 123
— Jadranski, 123
Slovaci, 118, 159
Slovenci, 118
Sloveni, 58
Slovenija, 118, 148
Smederevo, 143
Smederevska Palanka, 143
smonica, 125
so, 84, 132, 147
Socijalistička Federativna Republika Jugoslavija,
v. Jugoslavija
Soča, 120
solarna radijacija, 24, 29, 31
soliflukcija, 16, 18, 31, 35
Solun, 116
Somalija, 30, 201
Sombor, 144
Sona, 50
Sor, M., 37
sovhozi, 41
sovnarhozi, 42
specifična toplota:
— tla, 24
— vode, 24
Split, 146
Sporadska ostrva, 115
Srbi, 118
Srbija, 118, 142, 143, 144, 145
Srednji istok, 37, 41, 48, 54
srednji termički gradijent, 24, 26, 27
Sredozemno more, 47, 54
Srem, 144
Sremska Mitrovica, 144
Sri Lanka, 176
SSSR
v. Savez Sovjetskih Socijalističkih Republika
stanovništvo, 37, 64, 65, 86, 92, 94, 95, 97, 102, 106, 108, 110, 114, 126, 127, 148, 154, 168, 191, 207, 214
Stanovojske planine, 161, 167
Stara planina, 143
Stari Vlah, 146
Stavanger, 100
stene, 15, 16, 20, 30, 31, 35:
— bazične, 22
— eruptivne, 55
— flišne, 22, 146
— kompaktne, 16
— kristalaste, 16, 20, 22, 23, 24, 54, 62, 108, 188
— magmatske, 129
— metamorfne, 54, 55
— sedimentne, 62, 188
Stenovite planine, 23, 203
stepa, 57, 144, 151, 153, 161, 190
stočarstvo, 66, 75, 78, 84, 95, 97, 99, 100, 111, 139, 148, 155, 156, 157, 184, 192, 193, 210, 216, 217, 220
Stokholm, 100
stopa:
— mortaliteta, 38, 65, 85, 100, 114, 126, 147, 148, 171, 191, 208, 210, 214
— nataliteta, 38, 65, 85, 111, 114, 126, 147, 148, 171, 191, 208, 210, 214
Strabon, 14
Stragari, 133
stratifikacija, 24
stratosfera:
— donja, 24
— gornja, 24
stratovulkani, 23
Strazbur, 44, 84
Strumica, 123, 149, 150
subhorizontalni sedimentni pokrivači, 20
Subotička peščara, 144
Suecki kanal, 47, 167, 188
»suhomeđine«, 108
Sulavesi (Celebes), 180
Sumatra, 180
suptropski toplotni pojas,
v. umereni toplotni pojas
Surinam, 47
Sutjeska, 123
Svaziland, 202
Sverdlovsk, 165
Svetozarevo, 143
svilarstvo, 139
svinjogojstvo, 66, 139

Š

Šabac, 143
Šampanja, 65
Šampanjak, 78
Šangaj, 184
Šani, 177
Šansi, 184
Šara, 120
Šarant, 75
šarijaške navlake, 20, 22, 24
šarijaži, 20, 55, 62, 108
Šćećin, 155
šećerna trska, 174
Šefild, 41, 51, 98
Šelda, 57
Šenjang, 184
Šensi, 184
Šerbur, 74, 90
šikara, 34
Šikoku, 45
Šimonoseki, 187
Škotlanđani, 97
Škotska, 43, 97
škriljci, 16, 20, 35, 120, 149, 153, 188
Šlezija (Šljonsk), 42, 153, 155
šljunak, 30, 155, 194, 210
»šotovi«, 190
Španci, 38, 64
Španija, 38, 41, 110
Štip, 150
štit, 23, 35, 54, 99, 188, 203
Šumadija, 143
šumarstvo, 139
šume, 27, 69, 78, 99, 100, 111, 114, 125, 129, 147, 148, 150, 155, 156, 190, 192, 208:
— galerijske, 144
— japanske, 34, 35
— listopadne, 30, 32, 34, 57, 125, 139, 148
— maglovite, 31
— mešovite, 139
— sredozemne, 34
— večno zelene, 30
— zimzelene (četinarske), 31, 32, 125, 139, 148
Šuplja stijena, 150
Švajcarska, 39, 40, 108, 109,
Švarcvald, 102
Švedska, 39, 40, 99, 100
Šverin, 158

T

Tahiti, 219
Taho, 110
Taisi, 178
tajfun, 29, 185
tajga, 32, 34, 35, 57, 167
Tajland (Sijam), 37, 47, 178
Tajpej, 185
Tajuan, 184
Tajvan (Formoza), 37, 185
takiri, 34
talasi, 26
Tandr, 108
Tanganjika, 191
Tanzanija, 201
Tar, 30
Tara, 143
Tarb, 76
Tasmanija, 219
Taškent, 162, 166
Tatari, 159
Tatre, 153
Tavor, 167
tektonski:
— pokreti, 18, 54, 119
— potisak, 22
— rov, 186, 188
telurski potresi, 186
Temišvar, 156
temperatura, 24, 55
— srednja godišnja, 24, 114, 122
— srednjamesečna, 24, 114, 122
Temza, 197
tercijar, 23, 37, 55, 84, 85, 86, 102, 152
termalizam, 77, 78
termalno-mineralni izvori, 124, 152, 156
termoelektrane, 66, 79, 99, 115, 132, 148, 155, 208
Tesalija, 115
Tetovo, 149
Tibet, 183
Tigar, 168
Tihi okean, 23, 36
Timok, 143
timor,
v. horst
Tirana, 157
Tirindija, 159
Tisa, 123
Titograd, 151
Titovo Užice, 143
Titov Veles, 149
Tjencin, 184
Tjenšan, 54, 161, 167
Togo, 199
Tokijski zaliv, 45
Tokio, 186
topli pojas, 24
topografski oblici, 15
— neobični, 15
— normalni (obični), 15
Topusko, 146
Torino, 45, 115
Toronto, 211
Toskana, 117
Trakija, 115
Transilvanija, 156
transport, 48, 79, 83, 87, 99, 107, 116
transportni kapacitet reke, 16, 18
Travnik, 148
Trebinjsko polje, 124
Trepča, 133
treset, 32, 108, 152
trgovačka mornarica, 48, 101
trgovina, 41, 47, 90, 92, 99, 100, 101, 112, 116, 130, 141, 210
Triglav, 120
trijas, 188
Trikar, Ž., 14
Tronhjem, 101
troposfera, 24, 26, 29, 30
trusne oblasti, 121
Tuarezi, 192
Tubui, 192
Tulon, 79, 91
Tuluza, 67, 77, 90
tundra, 32, 34, 57
Tunguzi, 159
Tunis, 195, 197
Tur, 70
Turci, 58
turizam, 77, 78, 95, 100, 106, 107, 108, 142, 149, 151, 157
Turkmeni, 159
Turkmenistan, 165, 166
Turska, 38, 168, 171
Tuzla, 148

U

UAR, 197
uedi, 31, 190
Uels, 54, 97
ugalj, 40, 43, 45, 46, 76, 79, 83, 84, 97, 99, 100, 115, 131, 132, 147, 154, 155, 156, 157, 161, 165, 167, 194, 208
ugar, 173, 177, 192
Ujguri, 159
Ukrajina, 45, 162, 163, 164
Ukrajinci, 162, 163, 208
Ulcinj, 151
Ulman, Ed., 15
umereni toplotni pojas, 27, 31, 32, 34, 37
Una, 147, 148
Unutrašnja Mongolija, 183, 184
uporednici, 31
uragan, 31
Ural, 43, 45, 151
uranijum, 78, 132, 148, 155
urnis, 18
ušće, 20
uvala, 62
Uzbeci, 159

V

Vale, 118
vale,
v. doline
Valparaizo, 219
Valjevo, 143
vanalpska oblast, 23
Vandeja, 71
Varaždin, 146
Vardar, 121
Vareš, 133
Varšava, 45, 155
Vasa, 100
Vašington, 211
vazdušni pritisak, 26
vegetacija, 14, 15, 24, 31
Velenje, 148
Velika Britanija, 39, 40, 42, 43
Velika Severnoevropska nizija, 152
Veliki Korab, 120
Velikokosovska kotlina, 14
Velington, 220
Venecuela, 38, 47, 218
Venecija, 44, 115
Verhojansk, 54
Vestfalija, 43
vetrovi, 24, 26, 29, 31, 114:
— ascendentni, 26, 29, 30
— bura, 122
— jugo, 122
— košava, 121
— maestral, 122
— pasati, 26, 31, 36, 190
— tramontana, 78
Vezer, 102
Vezuv, 113
Vidin, 157
Vijetnam, 37, 42
v. Demokratska Republika Vijetnam i Republika Vijetnam
Viktorijino jezero, 191

Vildšpic, 106
vinogradarstvo, 84, 116, 138, 148, 162
Visla, 151
Viši, 78
Vitoša, 153
Vjetrenica, 146
Vladivostok, 161, 165
Vlasinsko jezero, 143
Vlaška, 156
vlažnost:
— apsolutna, 24
— relativna, 24
voćarstvo, 83, 100, 138
voće, 66, 116, 125, 138, 156, 157, 162, 192, 195
vodojaža, 20, 36, 172
vodopadi, 30, 50, 55, 123, 148, 191
vodostanje (vodostaj), 16, 32, 191
Vogezi, 54, 84, 85
Vojvodina, 118, 144
Volga, 57, 151
Volgograd, 164
Volujak, 146
Voronjež, 45, 161
Vransko jezero, 124
Vranje, 143
Vrbas, 146
vrela, 123, 147
Vrnjačka Banja, 125, 142
Vroclav, 158
Vršačke planine, 144
Vršič, 129
vrtače, 18, 77, 124
vulkani, 186
vulkanske tvorevine, 23
vuna, 47

Z

Zadar, 118
Zagreb, 146
Zair, 201
Zaječar, 143
zaliv, 63
Zambezi, 191, 202
Zambija, 202
zanatstvo, 137, 168
Zapadna Nemačka, v. Savezna Republika Nemačka
Zelengora, 146
zemljište, 14, 161
zemljoradnja, 138, 155, 156
zemljotresi, 173, 186
Zenica, 131, 148
zenit, 24
ZET, 47, 99, 100, 108, 109
Zlatibor, 143
Zletovo, 134
zona tišina, v. ekvatorijalna zona kalma
Zrenjanin, 144
Zvečan, 134
Zvorničko jezero, 147

Ž

Žabljak, 150
žarki pojas, 24, 27, 29, 30, 31
železare, 134, 147, 150
Ženeva, 108
Ženevsko jezero, 67, 108
Žironda, 62
živinarstvo, 66, 100, 208
Žorž, Pjer, 15

ISTORIJA

A

Abdul-Aziz, 557
Abdul-Hamid, 557
Abdul-Hamid II, 585
Abu-Said, 379
Acteki, 352, 373
Adenauer, 672
Agatokle, 261
Agesilaj, 256
Agidi, 248
Agripa, 272, 274
Ahajci, 239, 245
Ahemenidi, v. dinastija A.
Ahenaton, 237
Ahmes, faraon, 236
Ajzenhauer, 668
Akadi, 227, 234
Akbar, 379, 412
Akermanska konvencija, 567
Alani, 289
Alarih, 291
Alarih II, 292
Alarihov kodeks, v. *Breviarium Alarici*
Aleksandar Veliki, 259, 285, 286
Aleksandar I (ruski), 517
Aleksandar II (ruski), 555, 556, 585
Aleksandar III (ruski), 556, 565
Aleksandar Karađorđević, v. Karađorđević
Aleksandar Nevski, 327
Aleksej (car), 424, 432
Aleksije I Komnin, 315, 316, 326
Alemani, 279, 282, 283, 289, 291
Alfonso V Velikodušni, 346, 372, 391, 393
Alfonso XI, 346
Ali-paša Rizvanbegović, 570, 571
Aljende Salvador, 678
Alkibijad, 256
Alkuin, 301
Al-Mahdi, 306
Almagro, Dijego, 373, 375
Al-Mansur, 306, 307
Almeida, Fransisko, 376
Al-Memun, 306
Al-Mutasim, 306
Amenhemet (Amenemes), 232
Amenofis III, 237
Amerigo Vespuči, 373
Ameroindi, 374, 375
Amorejci, 232
Ana Bolen, 398
Anadolci, 230, 238
Anastasijević, Miša, 569
Andrija II Arpadović, 368
Andronik I, 316
Angli, 289
Anri I, 319
Anri II, 397, 400
Anri IV, 401, 402, 404, 406
Anšlus, 632
Antef, 232
Antioh III Veliki, 260, 268
Antioh IV Epifan, 268
Antonin, 274
Anžujci, v. dinastija A.
Arabljani, 296
Aramejci, 241, 243
Arapska liga, 644
Araukanci, 376
Arbanasi, 476
Arhita, tiranin, 248, 253
Arijevci, 236, 244, 251
Arkadije, 280, 291
Ar-Rašid, Harun, 306, 307
Arsenije III Crnojević (Čarnojević), 470
Arsenije IV Crnojević (Čarnojević), 471
Artakserks II, 256
Artakserks III, 256
Asen, Petar i Jovan, 316
asiento, 436, 447
Asirci, 228, 234, 237, 241, 243, 244
Astijag, Međanin, 252
Asur-Ah-idin, 244
Asurbanipal, 244
Asur-Nasip-Apli II, 24
Ašoka, 262, 267
Atal I, 258
Ataulpa, 375, 376
Atila, 291
Aton, 237
Augsburška ispovest, 385
Augsburška liga, 429, 433
Aurelijan, 279, 282
Austro-ugarska nagodba, 554, 581
Avari, 290, 294, 298
Avgust, 273
AVNOJ:
— *Deklaracija* Drugog zasedanja A., 656, 657;
— Drugo zasedanje, 655;
— konstituisanje, 651;
— Prvo zasedanje, 651, 652, 653

B

Bah, 553
Bahov apsolutizam, 580, 581
Bajazit (Bajazid), 349, 364, 378
Balboa, 376
Balkan, 267
Banković, Andra, 599
Barbarosa (Hajrudin), kapudan-paša, 378
Barbarosa, *v.* Fridrih B.
Bečki kongres, 510, 513, 573
Beduini, 296
Bela III, 368
Beograd:
— opsada B., 364;
— oslobođenje B., 503, 508, 606, 662
— zauzimanje B. od strane Turaka, 370, 378, 395, 434, 470;
— zauzimanje B. od strane Austrije, 434, 470, 476;
Biblija, 242
Bindusara, 262
Birčanin, Ilija, 507
bitka:
— kod Aleksinca, 508
— borodinska, 505;
— na Bregalnici, 600;
— cerska, 609;
— kod Čačka, 567;
— na Deligradu, 508, 509;
— na Dublju, 567;
— u Dubočici, 364;
— za Džerbu, 420;
— na Grahovu, 570;
— kod Kalenberga, 434;
— Kolubarska, 609;
— na Kosovu, 348, 350, 363;
— na Krbavskom polju, 370;
— kod Kresija, 339;
— kod Kumanova, 600;
— kod Lepanta, 411, 420;
— na Mačkovom kamenu, 594;
— na Marici, 348;
— kod Marinjana, 396;
— kod Maršfelda, 371;
— na Mišaru, 503, 508, 510;
— kod Mohača, 365, 370, 391;
— kod Petrovaradina, 434;
— kod Požarevca, 567;
— na Sitnici, 364;
— na Sutjesci, 653, 654;
— kod Tanenberga, 390
Bihzad, minijaturista, 379
Bizmark, 532, 545, 546, 551, 552, 554, 565
Blemi, 283, 289
Bodin, 358
bogumili, 365, 366
Bojović, Petar, 610
Boleslav Veliki, 317
Boleslav I, 327
Bolivar, Simon, 517
bombaška afera, 596, 598
Bonaparta, *v.* Napoleon B.
Bontuova afera, 596
borba za investituru, 318
Borđa, Čezare, 392
Borić, ban, 359
Borna, 355
Borut, 355
Bosna i Hercegovina:
— aneksija, 555, 566, 592;
— okupacija, 555, 557, 565, 591
Branimir, 356
Branković, grof Đorđe, 468, 469, 471
Breviarium Alarici, 292
Bribirski knezovi, 369
Briti, 291
bronzano doba, 225, 232
Brut, 272
Buda, 263
Bugari, 293
Bulanže (afera), 548, 549
buna:
— brsjačka, 593;
— u Bosni, 584;
— Đakova, 568;
— u Gromniku, 575;
— katanska, 568;
— kastiljanska, 395;
— krušička, 571;
— u Lionu, 397;
— Matije Gupca, 461, 462;
— Miletina, 568;
— narodna, 567, 568;
— narodna u Rusiji, 391;
— u Parizu, 479;
— Pere Segedinca, 474;
— Pugačovljeva, 449;
— Rakocijeva, 430, 472, 473;
— rakovička, 582;
— seljačka *(žakerija),* 335;
— severinska, 473;
— u Slavoniji, 469;
— u Sloveniji, 461;
— u Stubici, 575;
— Ticanova, 571;
— Vučićeva, 568
Burgundi, 289, 291
Buržoaski ustav, 491
Bušatlija, Mustafa, 570
Bušatlije, 551

C

Carigrad, pad C., 347
Celjski grofovi, 370
Cenić, Mita, 599
Cezar, 271, 272
Ciceron, 272
Cin Še-huang-ti, prvi kineski car, 264, 266
civilizacija:
— Afrike, 229
— andronovska, 244;
— u Americi, 251;
— bakarnog i bronzanog doba, 239;
— bez pisma, 251;
— Čavin, 251, 374;
— Egipta, 228, 232;
— grčko-budistička, 290;
— grčko-latinska, 268;
— halštatska, 248;
— hetitska, 237;
— Inda, 228, 279;
— induska, 236;
— Inka, 352;
— kamenog doba, 227;
— iz Kara-suka, 244;
— karolinška, 292;
— kineska, 309;
— pre Kolumba, 311, 374;
— kritska, 234;
— Maja, 311, 334, 373, 374, 436;
— Mesopotamije, 227;
— mikenska, 238;
— Nazka, 311;
— Nok (Nigerija), 241, 265;
— nordijska, 231;
— Novog sveta, 558;
— osmanlijska, 378;
— podunavska, 231;
— polja urni, 240, 248;
— pontijske stepe, 231;
— semitska, 238;
— starčevačka, 231;
— Tihuanako, 311, 374;
— tripoljska, 231;
— vavilonska, 238
Crni kodeks, 436
Cvetković—Maček, vlada, 630, 645
Cvingli, 385, 388

Č

Čabrinović, Nedeljko, 601
Čandragupta, 263, 279, 290
Čang Kaj-Šek, 621, 624, 625
Čarnojević, *v.* Arsenije Č.
Čarls I, 408
Čarls II, 409, 410, 431
Čartoriski, 569
Čelebija, Evlija, 411
Čemberlen, 622, 628
Čerčil, 603, 638, 658
Čerkezi, 378
Češka braća, 419
Čičimeci, 334
Čubrilović, Vasa, 601
Ču En Laj, 620
Ču Hi, 436

Ć

Ćirilo i Metodije, 303, 355
Ćuprilići, 411, 435, 434, 469
Ćuprilić, Ahmed II, 435, 369;
— Ć. Mustafa III, 435, 470;
— Ć. Numan—paša, 472

D

Dačani, 284
Dalmati, 284
Danci, 302
Danica ilirska, 573, 574
Daničić, Đuro, 578
Danilo, vladika, 468, 469, 471, 472
Danton, 480, 483, 487, 488, 489
Dardanci, 284
Dardanelska operacija, 603
Darije I, 252, 253, 254
Darije III, 259
Decibal, 285
De Gol, 669, 670
Deklaracija UN, 664
Delčev, Goce, 593, 594
Delkase, 565
Demetrije, kralj Baktrijane, 279
Demosten, 258, 260
Desant na Drvar, 658, 659
Desidiati, 284
Deuteronom (Zakoni Ponovljeni), 245

Dijas, Bartolomeu, 373
dijaspora, 245
Dimitrije Donski, 348
dinastija:
— Abasida, 298, 302, 306, 307;
— Ahemenida, 245, 252, 260, 280, 289;
— Almoravida, 328;
— amorijska, 302;
— Anđela, 316;
— Antigonida, 260;
— Anžu, 392;
— Anžujska, 345, 369;
— Arpadovića, 368, 369;
— Arskida, 279, 280;
— Ašikage, 352, 418;
— Atalida, 260;
— Aviza, 346;
— Bakića, 364;
— Brankovića, 363, 364;
— Burbona, 488, 505;
— Cin, 262, 278, 279, 289;
— Cinga, 517;
— Crnojevića, 367, 368, 467;
— Čeu, 250, 262;
— Dela Skala, 392;
— De Monmoransi, 400;
— Fatimida, 308, 329;
— Frankopana, 379;
— Fudživara, 309;
— Giza, 400;
— Gonzaga, 392;
— Gupta, 269, 279, 289;
— Habsburgovaca, *v.* Habsburgovci;
— Hafsida, 378;
— Han, 264, 267, 278;
— Hanoveranska, 438;
— Hoencolerna, 432, 443;
— isavrijanska, 303;
— Jagelovića, 348, 390, 391, 422;
— Kadžara, 557;
— Kapeta, 322;
— Karolinga, 293, 300, 302, 319;
— Karolinga, 293, 300, 302, 319;
— kineska, 309;
— Komina, 359, 368;
— Kotromanića, 366, 370;
— Lodija, 379;
— makedonska, 305;
— Mari, 228;
— Mediči, 345, 382, 384, 392, 393;
— Merovinga, 300;
— Minamoto, 334, 351, 352;
— Minga, 349, 351, 380, 418, 419;
— Nanda, 362;
— Nemanjića, 357, 359, 360, 459, 460;
— Nenadovića, 567;
— Oldenburga, 553;
— Omejada, 298;
— Oranska, 431;
— Osmanlija (Osmanovića), 349, 362, 457, 459, 460, 461, 465;
— Paleologa, 347;
— Pjasta (Pjastovića), 327, 348, 390;
— Pšemislovića, 317, 348;
— Ptolemeja (ili Lagida), 260;
— Raznevida, 308, 329, 333;
— rimska, 276, 277;
— Safarida, 308;
— Safevida, 378, 379, 435;
— saksonska, 316;
— Sasanida, 267, 278, 289;
— Seldžuka (Seldžukida), 308, 314, 329, 333;
— Seleukida, 260, 267;
— Severa, 275;
— Sišung, 262;
— solomonska, 378;
— Song, 309, 331;
— Šang (ili Jin), 240, 244, 250;
— Šubića, 366, 368, 369;
— Tang, 290, 309;
— Timurida, 349;
— Tjudora, 397;
— Tokugava, 418, 444, 447, 504, 561, 562;
— Trpimirovića, 355;
— iz Ura, 228;
— Valoa, 396, 400, 402;
— Vej, 290;
— vizantijska, 303;
— Zrinskih, 369, 463
Diniš, 346
Diokleciajn, 280, 282, 290
Dionisije iz Sirakuze, 261
Direktorijum, 493, 494
Ditioni, 284
Dizraeli, 538, 539, 585
Dokleati, 284
Domicijan, 274
Dorci, 241, 245
Drakon, 248, 253
Drajfus (afera), 549
Drašković, Janko, 576
Društvo naroda, 613, 631
Dubrovnik, *v.* republika dubrovačka
Dušan, car srpski, 348, 361, 362

DŽ

Džeferson, 453, 497
Džejms, Viljem 560
Džekson, 521
Džingis-han, 330, 331, 332, 348
Džoser, 230

Đ

Đak, *v.* buna Đakova
Đenovljani, 316
Đurađ Branković, despot Đurađ, 364

E

edikt:
— u Amboazu, 400;
— Nantski, 429;
— Potsdamski, 432;
— o restituciji, 402;
— sen-žermenski, 400;
— o toleranciji (Jozefa II), 448
Edvard I, 338
Edvard II, 338
Edvard III, 339
Egejci, 238
Egipćani, 228, 239, 244
Elamiti, 238, 241
Eldorado, 376
Elizabeta, kraljica, 388
Engels, Fridrih, 540
Epaminonda, 256
Erazmo, 382, 385
Etiopljani, 244
Etjen Marsel, 340
Etrurci, 250
Eugen (Evgenije) Savojski, 433, 471
Euripontidi, 248
Evangelistička unija, 420
evangelizacija, *v.* pokrštavanje
Evropske zajednice, 669

F

Fabije Maksim Kunktator, 262
fanarioti, 511
Feačani, 246
Feničani, 243, 246, 247, 248
Ferdinand Aragonski, 396
Ferdinand Habsburški, 365, 370, 378
Ferdinand II Habsburški, rimsko-nemački car, 402
Ferdinand Katolički, 393
Ferdinand od Sakson-Koburga, 555
Feri, Žil, 548
feudalizam, 312, 313
Fičino, Marsilio, 382
Filip V Antigonid, 262, 267, 268
Filip Avgust, 317, 322, 325
Filip Lepi, 337, 338, 396
Filip Makedonski, 255, 285
Filip III Smeli, 337, 346
Filip II, 397, 399, 401
Filip II Španski, »Mudri kralj«, 412, 414, 416, 420, 421
Filip IV Španski, 405
Filip V Španski, 433, 442, 443
Filistejci, 241, 242, 243
Fjodor, 432
Flacius Illyricus, Matija Vlačić, 463
Fleri, kardinal, 439
Fokiđani, 247
Fotije, 303
Franc II (Franc I Austrijski), 496, 501, 503, 571
Franc (Franjo)-Ferdinand, nadvojvoda, 555, 566, 590
Franc-Jozef (Franjo-Josif), 545, 555, 580, 585
Franci, 280, 283, 289, 292, 293, 295;
— istočni, 289;
— salijski, 289
Franjo Tahi, 461
Franklin, 453
Frankopan, Krsta, 468, 469
Frankopani, 468
Fransoa I, 374, 378, 383, 393, 394, 395, 396, 397, 398, 400
Fridrih II, 449
Fridrih V, 402
Fridrih I Barbarosa, 316, 317, 318
Fridrih II Sicilijanski, 317, 319, 346
Fridrih-Vilhelm, 432
Frigijci, 241
Frizi, 289
Fugeri, 385
Fuke, 405, 426

G

Gaćinović, Vladimir, 593
Gaj, Ljudevit, 573, 574, 576
Gajzerih, 291, 292
Gali, 262, 272
galikanizam, 440
Galo—Rimljani, 293
Gambeta, 547, 548
Gandi, 625
Gandi, Indira, 679
Garamanti, narod Afrike, 264
Garamantski put, 266
Garašanin, Ilija, 569, 577
Garibaldi, 545
Gepidi, 288, 289
Germani, 275, 289, 290
Geti, 284
Gig, lidijski kralj, 244, 246
Glasinac, 285
Godunov, Boris, 423
Gomes, Fernau, 372
Gorazd, 355
Goti, 283, 289, 292
Gradaščević, Husein (Zmaj od Bosne), 571, 585
Grasi, braća, 271
Grci, 232, 252, 285;
— G. u Indiji, 279
Grdan, vojvoda, 461
Gregović, Ilija, 462
Gustav II Adolf, 423, 424
Gustav III Adolf, 503
Gustav IV Adolf, 503
Guti, 228, 232, 233
Gvičardini, 383
gvozdeno doba, 225

H

Habsburgovci, 343, 365, 371, 391, 393, 394, 430, 442, 485, 509, 553, 555;
— austrijska loza, 419, 421;
— španska loza, 419, 420, 421
Hadrijan, 274, 287
Hadžić, Jovan, 568
Hadži-Mustafa paša, beogr. vezir, 506
Hadži-Prodan Gligorijević, 509
hajduci, 460, 494, 567
Hajnfeldski program, 589
Hajrudin, *v.* Barbarosa
Haldejci, 241
halkolit, 225
Han, *v.* dinastija H.
Hanibal, 262
hanza, 390, 391
Hamurabi, 234
Harapeni, 228, 236
Hati, 230, 238
Hatijeni, 234
Hatišerifi (sultanovi), 567
Hatišerif od đuluhane, 572
Hatušil III Hetit, 237, 238
Hedervari, Kuen, 588, 589, 590
Heleni, 246, 247, 248
helenizacija, 268
Henri II, 322, 324
Henri III, 325
Henri V, 340
Henri VII, 374, 397
Henri VIII, 388, 397
Henrih III, 317, 318
Henrih IV, 317, 318
Henrih VI, 317
Herman II Celjski, 370
Herodot, 243, 246, 248, 255
Heruli, 289
Heterija, 514
Hetiti, 232, 234, 237
Hidalgo, 502
hijeroglifi, 225
Hijeron, tiranin, 257, 262
Hiksi, 233, 234, 236
Hilderih, 292
Hilon Spartanac, 253
Hiong-nu (Hiong-nui), 244, 250, 278, 279, 289, 290
Hiro-Hito, 624
Hitler, 622, 627, 631, 681
Hlodoveh, 292
Hlotar *v.* Lotar
Hmeljnicki, Bogdan, 424
Hoencolern, Karlo, 557
Hoencolern, Leopold, 546
Hoenštaufovci, 317, 318, 319
Homo habilis, 224
Homo sapiens, 224
Honorije, 282, 291
Honorije II, 318
Honorije III, 319
Horemheb, 237
Ho Ši Min, 625
Hotimir, 355
Hruščov, 673
Hrvatska pragmatička sankcija, 472
Hrvatsko-srpska koalicija, 590
Hrvatsko-ugarska nagodba, 554, 555, 588, 611
Huan II, 346
Huan de Kastro, 376
Huan Luis Vives, 382
humanizam, 381
Huni, 283, 288, 290, 291, 292;
— H. Heftaliti, 289, 290, 291

I

Ičko, Petar, 508
ideogrami, 225, 240
ikonoborstvo (ikonoklazam), 303, 304
Iliri, 353
Ilirske provincije, 501, 502, 511, 512
Ilirski pokret, 573
Imhotep, 229, 230
Indijanci, 375, 376
Indoevropljani, 232, 236, 244
Indo-Skiti, 279
Indusi, 244
inkvizicija, 389, 420, 442
Iraklije, 294, 303
Iranci, 244
Isaija, prorok, 245
Isak I Komnin, 305, 314
Isak II Anđeo, 316
Istočno pitanje, 514, 565
Istri, 284, 285
Isus Veliki Etiopski, 436
Italci, 271
Ivan Crnojević, 367
Ivan I Kalita, 348
Ivan III, 390
Ivan IV Grozni, 391, 423
Izrailj, *v.* Jakov
Izrailjci, 242, 243, 280

J

Jagelović, *v.* dinastija J.
Jakov I Aragonski, 326
Jakov, patrijarh, 242
Jalta, 642, 660
Jan Hus, 343
Jan Sobejski, 430, 434, 469
Jan Zamojski, 422
Jang-Kien, 290
janičari, 459, 460;
— pobuna j., 411
jansenisti, 440, 441
jansenizam, 429
Japodi, 285
Je-če (Skiti?), 278, 279
Jelačić, Josip, 576, 577
Jeremija, prorok, 245
Jevreji, 238, 243, 378, 390, 394, 410, 411, 423
Jezekija, judejski car, 245
Jezekilj, prorok, 245
jezuiti, 448
Jiti, 289
Jonski gradovi, 248
Jovan Bez Zemlje, 319, 322, 324, 325
Jovan Hunjadi, 364, 367, 370
Jovan Kantakuzin, 361, 362
Jovan Nenada, 365
Jovan, patrijarh, 461
Jovan, pop, 371, 373, 417
Jovan Zapolja, 365, 370, 391, 411
Jovanka Orleanka, 340
Jovica, pop, 572
Jozef I, 430, 442, 448
Jozef II (Josif II), 448, 473, 476, 483, 485
jozefenizam, 448, 473, 475, 485
Jugoslovenski odbor, 611
Jugurta, 271
Julijan, 280, 281, 283
Julijevci, 274
Justinijan I, 293
Justinijan II, 302, 354

K

Kabot, Sebastijan, 376
Kabral, Pedro Alvares, 373, 374
Kajetan, Toma de Vio, 382
»kajmakamci«, 569
Kaligula, 274
Kalvin, 385, 388
kalvinistički savez, 400
Kambiz, Kirov sin, 252
Kaniška, 279
Kao-Cu, 278
Kapet, Hugo, 302
Karadžić, *v.* Vuk K.
Karađorđe Petrović, vožd, 471, 476, 503, 507, 508, 509, 510, 567
Karađorđević, Petar, 598
Karađorđević, Aleksandar, 618, 630
Karakala, 275
Karlo Anžujski, 319, 326, 346
Karlo Ćelavi, 301, 302
Karlo Debeli, 302
Karlo Martel, 293
Karlo Navarski, zvani Karlo Zli, 339, 340
Karlo Veliki, 298, 299, 300, 301, 302, 317
Karlo IV Španski, 501
Karlo V, 336, 339, 340, 344, 346, 374, 375, 376, 378, 393, 394, 397, 399, 400
Karlo VI, 430
Karlo VII, 340, 342, 344
Karlo VIII, 392
Karlo Smeli, 393, 396
Karlo XI Švedski, 430
Karlo XII Švedski, 430
Karlštat, 385, 388, 399, 400
Karni, 284, 285
Karpini, Đovani Piavo, 349
Kasas, Bartolome de Las, 376
Kasije, 272
Kasiti, 234, 236, 238, 241
Kastro, 678
Katarina I, 443
Katarina II Ruska, 449, 456, 476, 484, 485, 486, 495
katolički kraljevi, 314
Katon, cenzor, 268, 269
Kaun, Diogo, 373
Kečui (Kečuasi), 374, 376
Kefren, 230
Kelti, 257, 285
Kemal-paša Ataturk, 626
Kenedi, Džon, 667, 668
Kenedi, Robert, 668
Kesada, Gonsalo Himenes, 373, 376
Kijaksar Međanin, 243
Kimbri, 271
Kimerci, 244, 246
Kinezi, 278
Kiprani, 238
Kir Mlađi, 256
Kir II Veliki, 245, 252, 256
Kirgizi, 310
Kitati (Kitani), 310
Kju Kluks Klan, 558
Klaudije, 274, 280
Klaudijevci, 274
Klej, Henri, 558
Klemanso, 548, 549, 550
Kleon, 256
Klisten, utemeljivač ostrakizma, 253
Kmeri, 353, 351
Knut Veliki, 327
Kočina krajina, 475
Kolber, 405, 426, 427, 433
kolonizacija, 412, 521, 522
Komod, 275
Komuna, Pariska, 487, 488
koncil. *v.* sabor
Konde, Luj, 400, 405
konferencije nesvrstanih, 666, 676
Konfucije, 264, 349, 351
konkistadori, 374
Konrad II, 317
Konstantin, 280, 282, 283, 289
Konstantin III, 302
Konstantin IV, 302
Konstantin, carigradski patrijarh, 303
Konstantin X Duka, 314
Konstantin Porfirogenet, 354, 356
kontinentalna blokada, 501
Konvent, 487, 488
Kopitar Jernej, 575
Kortes, 373, 375, 413
Kosovo, *v.* bitka na K.
Košćuško, 492
Košut, Lajoš, 528
Koviljan, Pedro, 373
kozaci, 423
KPJ, 645, 646, 647, 649, 658
krapinski čovek, 284
Kras, 271, 272
Krčki knezovi, *v.* Frankopani
Krešimir I, 356
Krez, lidijski kralj, 252
Krićani, 232, 238, 239, 247
Krispi, 552
Kristifor Kolumbo, 373, 374
Kristina Švedska, 430
Krfska deklaracija, 611
Kromvel, Tomas, 398, 409, 410
»krvava nedelja«, 557
Ksavijer, sveti Fransoa, 376, 418
Ksenofont, 256
Kserks, 254
Kršnadeva, Raja, 379
Kublaj-han, 331
Kuk, Džems, 456
Kulin, ban, 365, 366
kultura:
— atinska, 254;
— badenska, 240;
— Čavin, 264, 266;
— grčka, 253;
— halkolitska, 239;
— helenistička, 260;
— međanska, 253;
— Močika, 266, 374;
— Nazko, 266, 374;
— patrijarhalna (srpska), 471;
— persijska, 253;
— Tihuanako, 266
Kumani, 327
Kun, Bela
Kuomintang, 563, 620, 644
Kušani, 267
Kušiti, 230
Kutuzov, 505
kvartar, 224
Kvaternik, Eugen, 581, 582
kvijetizam, 429

L

Lafajet, 480, 482, 523
Lajoš (Ludovik) I, 366
Lakmidi, 289
Langobardi, 288, 289, 290, 294, 295, 298, 354
Lao-Ce, 264
Lapčević, Dragiša, 599
La Peruz, 456
Latas, *v.* Omer-paša L.
Lateranski sporazum, 623
La Valeta, 411
Lazar Hrebljanović, knez, 363
Lefevr, d'Etapl, 385
Lenjin, 557, 613, 614
Letopis Matice srpske, 581
Leopold I, 469
Leščinski, 443, 444
Lepid, 272
Leviti (Levijevo pleme), 245
Levstik, Franc, 583
Libijci, 230
Liburni, 284
Liđani, 244
Lieu-Cong, kineski Atila, 279
Lieu-Pang, 278
Likurg, spartanski reformator, 248
Linkoln, Abraham, 558
Li Trigve, 664
Livijci, 232
Livingston, 523
Lo, Džon, 439, 440
Lojola, Ignacio de, 389
Lok, Džon, 438
Lombardijska liga, 318, 319, 326
Lorenco Vala, 382
Lorenco Veličanstveni, 382, 392
Lotar I (Hlotar), 293, 299, 301, 302
Ludvig Germanski, 302, 316
Ludvig Pobožni, 302, 316
Ludvig IV Prekomorski, 302
Luj VI Debeli, 319
Luj VII, 319
Luj VIII, 322
Luj IX, Sveti, 322, 325, 328, 329, 342, 344
Luj X Oholi, 338
Luj XI, 393, 395, 396
Luj XIV, 405, 426, 427, 428, 429, 432, 439, 470, 477
Luj XV, 439, 440, 441, 451
Luj XVI, 451, 452, 479, 482, 483, 484, 487
Luj XVIII, 491, 495, 505, 515, 516
Luj-Filip, 522, 526
Luj Orleanski, 340
Lugalzagisi, kralj Uruka, 228
Lulubi, 228
Luter, 382, 383, 388, 399
Luvijci, 234

LJ

Ljubibratić, Mića, vojvoda, 585
Ljudevit, knez, 355

M

Mačonoše, vitezovi, 390
Magelan, 374
Maglemozi (Danska), 231
Magna charta libertatum, 325, 338
Makartur, 664
Makenzen, 609
Makijaveli, 383
Mak Maon, 545, 548
Maksimilijan, 391, 394, 402, 411, 422
Mala Antanta, 618
Malinovski, 642
mandarinski sistem, 275
Maneton, istoričar starog Egipta, 229
Manojlo I Komnin, 316, 359, 365
Manučo, Aldo, 382
Mao Ce Tung, 620, 625, 626, 676
Maori, 564
Mara, 480, 483, 487, 489
Marašli Ali-paša, 567
Marcelin, Amijan, 283
Marduk-Apal Idin II, 284
Margareta Navarska, 388
Marija Stjuart, 389, 398, 407
Marija Terezija, 442, 443, 449, 472, 475
Marija Tjudor, 388, 398
Marije, 271
Marijeva reforma, 271
Marko Antonije, 272
Marko Aurelije, 274, 275, 278
Marko Kraljević, 363
Marko Polo, 326, 349
Marković, Sima, 567
Marković, Svetozar, 578, 581, 582, 598, 599
Marks, Karl, 535, 536, 540, 563, 578
Maršalov plan, 664
Masarik, Tomaš, 618, 623
Masinisa, numidski kralj
Matija, car, 402
Matija Gubec, 462
Matija Korvin, 370, 390
Mavri, 292, 314
Mazaren, 404, 405
Mažuranić, Ivan, ban, 576
Mediči, Katarina, 399, 400, 402
Mediči, Kozmo, 392
megaliti, 225
Mehmed II Osvajač, 347, 348, 364, 378
Melanhton, 382, 385, 395
Mendosa, Pedro de, 376, 413
Meneptah, 238, 241
menhiri, 225
Mentnon, g-đa de, 426, 427
Mentuhotep I, kralj tebanske nome, 232
merkantilizam, 381
Mesopotamci, 234
Meternih, 501, 502, 505, 511, 525, 528, 529, 570, 575, 577
Mezi, 284
mezolit, 224, 225
Mihailo Paleolog, 316, 326, 360
Mikenci, 232, 238, 239, 246
Miladinov, Dimitar, 583
Miladinov Konstantin, 583
Miletić, Svetozar, 580, 581, 588, 591
Milovanović, Milovan, 598, 600
Miltijad, 254
Milutin, kralj srpski, 348, 360
Miloš, *v.* Obrenović
Miljanov, Marko, 595
Minojci, 236, 239
Mincer, Tomas, 385, 388
mir:
— ahenski, 355, 434, 444;
— amijenski, 497;
— u Andrusovu, 424;
— beogradski, 444;
— u Brest-Litovsku, 606
— bukureški, 555, 601;
— Ičkov, 508;
— jedrenski, 411, 567, 585;
— u Kampoformiju, 510;
— karlovački, 434, 510;
— u Kato-Kambreziju, 395, 400;
— kučuk-kajnardžijski, 449;
— u Lodiju, 392;
— u Londonu, 600;
— madridski, 461;
— u Malmeu, 391;
— nimvegenski, 434;
— u Olomucu, 390;
— požarevački, 434;
— požunski, 571;
— u Risviku, 434;
— san-stefanski, 557, 585;
— u Saragosi, 418;
— šćetinski, 422;
— špajerski, 391;
— tilzitski, 510;
— u Tordesiljasu, 374;
— torunski, 390;
— zadarski, 369
misionari, 376, 414, 418
Mišić, Živojin, vojvoda, 609, 610, 611
Mitteleuropa, 522
Mješko I, 327
Mlada Bosna, 592
Mlečani, 316, 336, 347
Moavićani, 243
Mojsije, 242, 245
Moler, Petar, 567
Mongoli, 294, 327, 329, 330, 350
Monomotapa (Mutapa), 378
Montekorvino, Đovani da, 349
Montesuma, 375
Montgomeri, 637, 639, 641, 643
Movutali, hetitski vladar, 237
Muhamed, 296, 297
Murat I, 350, 363
Muršil I, Hetit, kralj Hatuše, 234
Musolini, 552, 618, 622, 623, 643

N

Nabu-Apal-Usur (Nabopolasar), 244
Nabukodonosor, 245
Načertanije, 568, 569, 577
Napoleon Bonaparta, 492, 493, 494, 495, 496, 497, 498, 499, 500, 501, 502, 503, 505, 506, 511, 513, 517
Napoleon III, 545, 546
Naram-Sin, 228, 238
narodi:
— »Biblije« (Judeji), 242, 245;
— Hausa, 417, 505;
— s mora, 236, 238, 239, 240, 241, 243;
— sa severa, 236, 248;
— stepe, 244;
Narodna zahtijevanja, 576, 577
Naser, 666, 680
neandertalski čovek, 224
Nehru, 666, 679
Neker, 478, 479, 482
Nenadović, Aleksa, 507
Nenadović, Jakov, 507
Nenadović, Prota Mateja, 507, 508,
Nelson, 495, 499
Neohetiti, 243
neolit, 224, 231
NEP, 614, 615
Nepobediva armada, 407, 420
Nerva, 274
Nićifor II Foka, 303, 304
Nikija, 256
Nikmadu, kralj iz Ugarita, 238
Nikola I (ruski), 555
Nikola II (ruski), 556
Norici, 284
Normani, 302, 305, 316
Norvežani, 302
Novaković, Stojan, 596, 597
Nova Srbija (Slavenosrbija), 474
Novi svet, 436
Novi zakon, 280

NJ

»nju dil«, 626

O

Obradović, Dositej, 475, 476, 508
Obrenović, Aleksandar, 597
Obrenović, Mihailo, 569, 577, 584
Obrenović, Milan, 578, 585, 596, 597
Obrenović, Miloš, knjaz, 503, 509, 514, 567, 568, 569, 571, 572, 577, 584
Obznana, 618
Odoakar, 288, 292
»ograđivanje« *(openfield),* 398, 437
Oheda, Alfonso de, 373
Oksfordski dekreti, 325
Oktavijan, 272, 274
Omer-paša Latas, 572, 578, 579, 584
Oreljana, 376
Orfelin, Zaharije, 475
Ostrogorski, Georgije, 303

Ostrogoti, 288, 292
Otokar II Pšemisl, češki kralj, 342, 271
Oton Germanski, 302
Oton IV Braunšvajg, 319
Oton II, 317
Oton III, 317
otkrića, 372 — 381
OUN, 664
Oven, Robert, 515
Oziris, 232

P

paleolit, 224
Pan Čao, 278
panislamizam, 557
panslavizam, 555
pape u Avinjonu, 343
Parćani, 267, 268, 275, 279, 289
Pariska komuna, 547, 548
Pariski parlament, 442
Paro, Andre, 228
Pašić, Nikola, 596, 597
patareni, *v.* bogumili
Pazvanoglu, Osman, 506
Pečenezi, 305, 316, 327, 329
Pećka patrijaršija, 459, 460, 468, 471, 476, 511
Pedro I Svirepi, 346
Pedro III Veliki, 346
Pelagić, Vasa, 598
Perikle, 254, 255
Persijanci, 252, 293, 294
Petar I, crnogorski vladika, 503, 509, 510, 569, 570
Petar II Petrović Njegoš, 569, 570
Petar, knez resavski, 506, 507
Petar Krešimir IV, 357
Petar I Veliki, 434, 443, 469, 471
Peten, 604
Petronijević, Avram, 568
Petrović, Danilo, 578, 579
Petrović, Hajduk-Veljko, 508
Petrović. Nikola, knjaz, 579, 595
Petri, Flinders, 226
Pikti, 283, 289
piktogrami, 225
Pilnic, 484
Pipin Mali, 293, 295, 298, 299, 300
Pir, epirski kralj, 261
piramide, 225, 229
pirinčana pobuna, 456
Pisaro, Fransisko, 373, 375, 376
Pit, Vilijam, 439, 488, 494, 500, 515
pitekantrop, 224
Pizistrat, 248, 253
Plantagenet, 322
pobuna, *v.* ustanak
Podebradi, Đorđe, 390, 394
Poenkare, 623
pokret:
— čartistički, 526;
— flamanskih ikonoklasta, 400, 401;
— ludistički, 500;
— otpora, u Francuskoj, 641;
— radnički, 534;
— republikanski, 527;
— u Sloveniji, 574;
— srpskih socijalista, 578
pokrštavanje, 302, 414, 436, 444
Polibije, grčki istoričar, 269, 271
Pomaci, 572
Pompadur, g-đa de, 440, 444
Pompej, 271, 272
Pomponaci, Pietro, 382
Ponjatovski, Stanislav, 449, 486
popečiteljstva, 508
Popović, Dušan, 599
porodica, *v.* dinastija
Postum, 280
Potemkin, 485, 557
Potsdam, 643, 666
pragmatička sankcija, 344, 430, 442
Prešern, Franc, 575
Prijezda, ban, 366
primirje:
— u Jedrenu, 364;
— moskovsko, 391;
— u Retondu, 606
Princip, Gavrilo, 601, 602
Prob, 280
proglašenje DFRJ, 662
proletarijat, 271, 515, 537, 547
prosvećeni apsolutizam, 448, 449
protivreformacija, 420
Psametih I, saiski kralj, 244, 245
Putnik, Radomir, vojvoda, 609 610, 611
put svile, 278

R

Rački, Franjo, 582, 588
Radić, Antun, 588
Radić, Stjepan, 588, 589
Rajačić, Josif, 576
Rajić, Jovan, 475
Ramzes I, 237
Ramzes II, 237, 238
Ramzes III, 241
rat:
— ahenski, 419;
— aprilski, 645;
— arapsko-izraelski, 668;
— Augsburške lige, 435;
— za austrijsko nasleđe, 444;
— balkanski, 600;
— za bavarsko nasleđe, 449;
— protiv Bugara i Slovena, 302;
— carinski, 598;
— drugi svetski, 633 — 644;
— drugi svetski jugoslovenskih naroda, 645 — 662;
— Dveju ruža, 336, 342, 397;
— u Etiopiji, 631;
— građanski, 558;
— građanski u Engleskoj, 409;
— protiv Granade, 394;
— iz 1870. g., 546;
— kinesko-japanski, 563;
— korejski, 683
— krimski, 542, 555, 569;
— krstaški, 314, 319, 392;
— nizozemsko-španski, 402;
— za poljsko nasleđe, 443;
— prvi svetski, 602 — 607;
— prvi svetski jugoslovenskih naroda, 607 — 611;
— punski, 285;
— rusko-japanski, 563;
— rusko-poljski, 616;
— sedmogodišnji, 422, 444, 446;
— severni, 434;
— Srbije i Crne Gore, 585;
— srpsko-turski, 593;
— stogodišnji, 338, 339;
— za špansko nasleđe, 435;
— šuanski, 489;
— tridesetogodišnji, 399, 402, 421;
— verski, 397, 399, 400
Rauh, Pavao, 588, 590
reformacija, 385;
— anglikanska, 388;
— skandinavska, 391;
— u Sloveniji, 463
rekonkista, 326, 346
renesansa, 381, 382, 383, 386, 387;
— francuska, 397;
— sumerska, 233
republika:
— Dubrovačka, 466, 511;
— Francuska, 487, 547, 548, 549;
— Helvetska, 494;
— Kruševska, 594;
— Rimska, 494;
— seljačka (katolička), 400;
— Vajmarska, 615
revolucija:
— američka, 447, 477;
— u Belgiji, 524;
— ekonomska, 437, 531;
— februarska, 616;
— francuska, 1789. g., 377 — 486;
— 1848. g., 571;
— industrijska, 437, 438, 450, 519;
— intelektualna, 447;
— julska, 516;
— kineska, 563;
— kubanska, 678;
— liberalna, 530;
— u Mađarskoj, 613;
— u Meksiku, 561;
— naroda Jugoslavije, 645 — 662;
— u Nemačkoj, 613;
— nizozemska, 401;
— nuklearna, 682;
— oktobarska, 616;
— u Parizu, 530;
— u Rusiji, 606, 613;
— srpska, 471, 506— 509
Reza Pahlavi, šah, 637
Ričard II, 340
Ričard Lavovo Srce, 316, 322, 324
Riga od Fere, 503
Rimljani, 285, 289, 290
rimske provincije, 286, 287
Ristić, Jovan, 585, 596
Rizvanbegović, *v.* Ali-paša R.
Robert Pobožni, 319
Robespjer, 483, 487, 489, 490
Rodofinikin, Konstantin, 508
Rokfeler, 559
Rokosovski, 637, 638
Roman IV Diogen, 314
Romanov, Mihail Fjodorovič, 423
Romel, 636, 637
Romul, imperator, 292
ropstvo, *v.* trgovina robljem
Rudolf II, 419
Rudolf Habsburški, 318, 342
Ruzvelt, Teodor, 560, 626, 638

S

Sabejani, 243
sabor:
— u Augsburgu, 395;
— Blagoveštenski, 580;
— ekumenski (vaseljenski), 319;
— hrvatski, 573, 574, 576, 581;
— u Konstanci, 344;
— lateranski, 319;
— narodno-crkveni (srpski), 580;
— u Regensburgu, 395;
— u Špajeru, 395;
— Tridentski, 382, 389, 395, 399, 415;
— ugarski, 573, 581;
— Vatikanski, 536;
— u Vormsu, 299, 395, 399
Sam, knez, 354
Samarićani, 243
Samnićani, 261
Samuilo, 304, 358
Samudragupta, 279
Sančo Veliki, kralj Navare, 326
Sandalj Hranić, 367
sarajevski atentat, 600
Sargon, 228
Sargon II, 243, 244
Sasanidi, 279
Sasi, 289, 298, 360
Savonarola, 385, 388, 392
Scipion Afrikanac, 268, 269
Scipion Emilijan, 271
Scipioni (Publije i Gnej), 262, 269
seča knezova, 506
Seleukidi, 279
Selim I, 370, 378, 379
Selim II, 411, 460
Selim III, 494, 503, 506, 510
Seleuk I Nikator, 263
Semiti, 228, 232, 233, 234, 238, 246, 250, 265;
— Zapadni S., 234, 238
Senaherib, 244
Senusret II, 233
Septimije Sever, 275
Sertorije, 271, 272
Sestrinske republike, 492
Seti I, 237
Setnaht, 238
Sforca, Frančesko, 392
Sicilijansko večernje, 346
Sigismund, ugarski kralj, 350
Sigismund I Poljski, 391
Sigismund II Avgust, 422
Sigismund III Vaza, 423
Sigismund (Žigmund) Luksemburški, 370
Sinaitski, Teodosije, 572
Sinan-paša, 461
Sirijci, 230, 232, 233, 237, 238, 241, 243
Skender-beg, 367, 368, 378, 464, 467
Skiti, 244
Sklavinoi, 353
Skordisci, 285
Skoti, 289
slobodno zidarstvo, 438, 475
Sloveni, 284, 289, 293, 295, 298, 302, 555;
— Istočni S., 294;
— Južni S., 294, 353—371, 457—476, 555, 573, 575;
— Zapadni S., 294
Slovenski kongres, 577
Smail-aga Čengić, 572
Snefru, 230
socijalizam:
— konfucijevski, 278;
— marksistički, 520;
— naučni, 536, 552;
— renesansa s., 548
Sokolović, Makarije, 450
Sokolović, Mehmed-paša, 378, 411, 459, 460
Solomon, 378
Solon, 248, 253
Songai, 378
Spartanci, 248, 256
Srbi u Hrvatskoj, 588
Srbi u Podunavlju, 365, 469, 474, 570, 577, 580, 591
Srbi u Ugarskoj, 571
srpsko pitanje, 566
Staljin, 624, 665
Starčević, Ante, 581, 582, 588, 589
Stari svet, 224
Stefan Batori, 422, 423
Stefan Crnojević, 364, 367
Stefan Dečanski, 361
Stefan Lazarević, despot, 363, 364
Stefan Nemanja, 359
Stefan Ostoja, 366
Stefan Prvovenčani, 359, 360
Stefan Vukčić Kosača, 366, 367
Stepanović, Stepa, vojvoda, 610
Stjepan I Kotromanić, 366, 368
Stjuarti, 408, 438
Sto dana, 506
Stratimirović, Đorđe, 576
Strazburške zakletve, 301
suecka kriza, 667
Sukarno, 627
Sula, 271
Suljeman-paša Skopljak, 567
Sulejman II Veličanstveni, 378, 379, 411, 459
Sumeri, 227, 228, 233, 234
Sumu-Abum, 234
Sun Jat-Sen, 563, 620
Supilo, Frano, 588
Suvorov, 449, 485, 492, 495
Sven I, 327
Sveta alijansa, 513, 514
Sveta liga, 392, 393, 394, 420, 434
sveti Avgustin, 281
sveti Jeronim, 288
sveti Jovan Damaskin, 305
sveti Petar, 295
sveti Sava, 359, 461
Svevi, 289, 292
Svetoandrejska skupština, 569

Š

Šambor, 547, 548
Šamaš-Šum-Unin, 244
Šamplen, Samiel, 416
Šampolion, 225
Šamši-Abad I, 234
Šćepan Mali, 472, 509
Šarl VII, 395, 396
Šarl VIII, 383, 396
Šarl X, 527
Šešonk I, 241
Šlifenov plan, 566, 602
štamparije, 382
štrajk, 397, 515, 535, 548, 593
Štorsmajer, Josip Juraj, 581, 582
Šujski, Vasilije, 391, 422

T

Tacit, 272
Tamerlan (Timurlang), 349, 364, 378, 379, 412
Tarkvinije Stariji, 350
Tatari, 391, 423
Temistokle, arhont, 253
Teodora, 293
Teodorih, 292
Teodorik, 288
Teodosije, 280, 282, 283, 289, 291
teorija radioaktivnosti, 226
Tertulijan, 283
tevtonski red, 390
Tiberije, 274
Timoleon, 257
Tirgo, 478
Tit Livije, 250, 267, 274
Tito, Josip Broz, 642, 647 — 662, 666, 674, 675, 676
Tjer, 545, 547, 548
Tolbuhin, 642, 661
Toma Akvinski, 382
Tomas Beket, 322
Tomas Mor, 382
Tomislav, kralj Hrvata, 356
torijevci, 431, 438, 484, 500
Tračani, 241, 353
Trajan, 274, 280, 285
Trajanov stub, 273
trgovina robljem, 415, 417, 436, 447
Trojni pakt, 645
Trpimir, 355, 356
Trubar, Primož, 463
Tucović, Dimitrije, 597, 599
Tukidid, 256
Tukulti-Apal-Ešara III, 243
Turci-Mongoli, 290
Turci-Ujguri, 310
Tutankamon, 237
Tvrtko I, 366, 370
Tvrtko II, 367, 370

U

Uajna—Kapak, 375
ugovor:
— u Alhesirasu, 566;
— bazelski, 501;
— bečki, 501;
— s Bugarskom, 614;
— bukureški, 503, 567;
— Idn, 478;
— u Jašiju, 485, 494;
— u Kampoformiju, 493;
— u Kato-Kambreziju, 393, 397;
— u Madridu, 397;
— Metjuenov, 442;
— u Parizu, 493, 569;
— u Saragosi, 374;
— u Sloboziji, 508;
— sen-žermenski, 614;
— tilzitski, 503, 508;
— u Tordesiljasu, 415;
— trijanonski, 614;
— utrehtski, 443;
— verdenski, 301;
— versajski, 613;
— vestfalski, 424
Ujedinjena omladina srpska, 577, 580
Untaš-Gal, Elamićanin, 238
Ur-Namu, 233
Uroš I, 360, 362
uskoci:
— senjski, 460, 461;
— kotarski, 469
ustanak:
— u Banatu, 461;
— bosanskohercegovački, 585;
— u B i H, 557;
— Đorđa Vojteha, 359;
— dalmatinsko-panonski, 285;
— drugi srpski, 567;
— u Hercegovini, 461;
— na Hvaru, 465, 466;
— ilindenski, 594;
— janičara, 571;
— kamizara, 429;
— Karpošev, 470;
— u Kotoru i Paštrovićima, 364;
— u Krivošijama, 585, 591;
— Luke Vukalovića, 578;
— u Makedoniji, 593;
— mladoturski, 557;
— naroda Jugoslavije, 646 — 662;
— poljski, 524, 555;
— prvi srpski, 506 — 509;
— Sertorijev, 271
— na Siciliji, 545;
— Spartakov, 272;
— tajpinški, 561;
— u Timočkoj krajini, 596;
— topolički, 609;
— protiv Turaka, 471;
— u Ukrajini, 424
ustavobranitelji, 568, 584
U Tant, 664
Utuhegal, kralj Uruka

V

Valdemar I, 327
Valdemar II, 327
Valdivija, osnivač Santjaga, 376
Valdzemiler, 373
Valuk, knez, 354
Vandali, 289
Vardhana (Harša), 291
Varjazi (Šveđani), 301, 327
Varšavski pakt, 666
Vartolomejska noć, 400
varvari, 289, 292, 295
Vasilije II, 304, 305, 358
Vasilije III, Ruski, 391
Vasko da Gama, 373, 376
Vašington, Džordž, 453, 497
Vavilon, 241, 243, 244, 245
»vavilonsko ropstvo«, 245
Vaza, Gustav, 390, 391
Velaskes, Dijego, 375
Veliki interegnum, 318
Veliki Moguli, 412
Vercingetoriks, 272
Veseli Džon, 438
vigovci, 431, 438, 484
Viktorija, kraljica, 538
Viktor-Emanuel, 545
Vilhelm I, 549, 550, 551
Vilhelm II, 551, 566
Viljem I Sicilijanski, 316
Viljem II, 602
Viljem Kopile, 319
Viljem Osvajač, 322, 324
Viskonti, Đan-Galeaco, 344
Višeslav, 355
Vitruvije, 273
Vizantinci, 292, 303, 304
Vizigoti, 288, 289, 291, 292
Vladislav IV, 424
Vlasi *(vlasi)*, 353, 459, 465
Vlastimir, 357
Vojteh, *v.* ustanak Đorđa V.
Vojislav, 358
Vojna granica, 460, 461, 465, 468, 471, 472, 473, 573
Vojna krajina, 460, 469
Vojvoda Janko, 465
Volpol, Robert, 438, 439, 440
Vormski konkordat, 317, 319
Vraz, Stanko, 575
Vu, 262
Vučić Perišić, Toma, 568, 569
Vukan, 359
Vuk Karadžić, 471, 475, 568, 570, 575, 578
Vukalović, Luka, 579, 584
Vulfila, 283, 289
Vulsi, Tomas, 398
Vu-Ti, 278

Z

Zah, Franjo, 569
Zapata, 561
zakonik:
— agrarni, 271;
— Dušanov, 347, 362;
— Građanski, 534;
— Hamurabijev, 234, 237, 238;
— Minga, 380;
— Ovinijev *(lex Ovinia)*, 271
— *Srpski građanski*, 568;
— Šermanov, 559;
— Vinodolski, 368
Zakonodavstvo ili principi zakona, 448
Zaratustra, 253
Zenon, imperator, 292
zigurati, 225
zinjantrop, 224
Zlatna bula, 342, 368
Zlatna Horda, 331
Zlatni Rog, 347
Zmaj Ognjeni Vuk (Vuk Grgurović), 364
Zrinski, Nikola, grof, 460, 468, 469
Zvonimir, 357

Ž

Žan de Betankur, 372
Žan (Jovan) Dobri, 340
Žan Neustrašivi, 340
Žerajić, Bogdan, 593
Žoau I, 346
Žoau II, 393
Žoau III, 376, 415
Žofr, 603, 604, 605
Žofrof plan, 603
Žores, 550
Žuan-Žuan (Avari?), 279, 290

INDUSTRIJA I TEHNIKA

A

Abraham, 842
Ader, Kleman, 794, 803
aerodinamičke sile, 795
aerodinamika, 794;
— krila, 796;
— velikih brzina, 796
aerokosmička tehnika, 792
aeronautika, 794
aerostatika, 792
aglomeracija, 710;
— prahova, 720
Ajfel, Gustav, 794
Ajnštajn, Albert, 703, 851
alat:
— dijamantski, 739;
— od alatnog čelika, 739;
— od brzoreznog čelika, 739;
— od stelita, 739;
— proizvoljni, 738;
— shematski, 738;
— za bušenje, 745;
— za provlačenje, 741
alfa-mesing, 716
algol, 872
alhemija, 702
alkilovanje, 899, 900
alotropska transformacija, 703
alternator, 778
aluminijum, 702
aluminiziranje, 735
aluminotermija, 732
amalgamiranje, 710
aminoplasti, 757
amonijak, 907
amortizer, 788
analiza:
— aktivaciona, 860;
— neposredna, 710;
— pomoću apsorpcije zračenja, 860;
— pomoću dodavanja izotopa, 860;
— pomoću izotopskog razblaživanja, 860;
— slike, 852;
— termička, 707
analizator, panoramski, 863
anizotropija, 704
anoda, 824
anodne karakteristike, 825
antireaktivnost, 919
Apolo, 817
apsidometrijski metod, 697
Armstrong, Nil, 817
Aston, 860
Ašan, R., 863
ateriranje, 801
audion, 825
austenit, 706
autodirigovanje, 815;
— apsolutno, 816;
— astronomsko, 816;
— direktno, 815;
— indirektno, 815;
— prema inerciji, 816
automatizacija, 868
automobil, 770
autožiro, 802

B

Babine-Žamenov kompenzator, 696
Bajerov postupak, 717
bakarni kamen, 716
bakarno doba, 701
bakrenac, 716
balon:
— privezan, 793;
— slobodni, 793;
— sonda, 793;
— stratosferski, 793
Bardin, 832
baza, 832
Bekerel, 703
Bel, Gream, 876
Belen, E., 889
beli liv, 715
Belvil, Delonej, 786
Benc, Karl, 771
beril, 718
berilijum, 924
Bernulijeva jednačina, 795
Berten, Žan, 769
Besemer, 702, 712
beta-mesing, 716
bežični prenos, 847
bit, 871
bituminozni pesak, 893
blende, 716
Blenkinson, 763
Bloh, 842
bočna učestanost, 846
bod, 889
Bodoov aparat, 888
boksit, 716
Bole, Amedej, 770
Bragova formula, 707
Bratin, 832
brevster, 696
Brezen, 770
brideri, 921
Bridžman, 709
briketiranje, 710
Brile, Gobron, 786
brodovi:
— kosmički, 816;
— za bušenje, 894
brojni sistem, binarni, 871
bronza, 701, 716;
— kovna, 716
bronzano doba, 701
bronze, aluminijumske, 716
brušenje, 749;
— čeono, 749;
— elektrolitičko, 752;
— na planetarnim brusilicama, 750;
— ravnih površina, 749;
— spoljnje kružno, 749;
— unutrašnje bez šiljaka, 750;
— unutrašnjih obrtnih površina, 749
brzina:
— orbitalna, 817;
— oslobađanja, 817
Budvil, Andre, 776
burgija, 745
bušenje, 745
bušenje izvora nafte, 893;
— pod morem, 894;
— rotaciono, 893;
— sa blatom, 893;
— sa vazduhom ili gasom, 894
bušilica:
— pokretna, 747;
— radijalna, 747;
— redna, 747;
— sa postoljem, 747;
— stona, 745;
— stubna, 747;
— vertikalna sa više vretena, 747;
— viševretena, 747
butadijen, 905
Buton, 770

C

celuloid, 757
celuloza, regenerisana, 757
celulozni:
— acetat, 757;
— acetobutirat, 757
cementacija, 735;
— čvrsta, 735;
— elektrolitička, 735;
— gasna, 735;
— tečna, 735
Cenerov napon, 832
ceruzit 717
cev:
— analizatorska, 852;
— elektrometarska, 859;
— katodna, 828;
— katodna trihromatska, 854;
— kombinovana, 826;
— Kramptonova, 764;
— rendgenska, 708;
— sa progresivnim talasom, 827
cevi:
— emisione, 826;
— reaktivne, 846;
— sa hladnom katodom, 831;
— sa tečnom katodom, 830;
— za analizu slike, 829;
— za vrlo visoke učestanosti, 827
crna metalurgija, 909
crni liv, 715
Cigler, 744
cilindar, 774
Ciolkovski, 809
cirkaloj, 719

Č

časovnik:
— atomski, 862;
— kvarcni, 862;
— tranzistorski, 862
čelici, 715:
— austenitni, 715, 716;
— brzorezi, 715, 719;
— feritni, 716;
— hrom-molibden, 715;
— hrom-vanadijum, 715;
— legirani, 715;
— martenzitni, 716;
— nelegirani, 715;
— nerđajući, 716;
— neumireni, 715;
— specijalni, 715;
— ugljenični, 715;
— umireni, 715;
— vatrostalni, 716;
— za cementaciju, 715;
— za obradu, 715
čelik, 706;
— Hetfildov, 715
Čeplon, 765
čvrsti rastvori, 703;
— intersticijalni, 703

Ć

ćelija:
— fotoelektrična, 827;
— fotoprovodna, 828

D

Da Vinči, Leonardo, 784
Dajmler, 771
Dalton, 702
Danlop, 771
De Brolji, 703
De Broljijeva formula, 708
De Dion, 770
De Forest, Li, 825
De Lavo, Sanso, 782
De Mongolfje, Etjen i Žozef, 792
De Roša, Bo, 774
De Rozje, Pilatr, 792
Debaj-Šererov metod, 707
debutanizator, 904
defekti u kristalima, 704;
— linearni, 704;
— tačkasti, 704
deformacije, 690:
— kritične, 709;
— plastične, 705, 720, 723;
— proste, 690;
— složene, 690
Dejvi, 702
demetanizator, 894
demodulacija, 885
demodulator, 846
dekatron, 870
depropanizator, 904
Derbi, 702
derik, 893
derivati celuloze, 757
destilacija, 711;
— vakuumska, 899
detekcija, 844;
— metala, 866
detektor:
— sa izbijanjem učestanosti, 866;
— sa jonizacijom, 859;
— sa kristalnom diodom, 844;
— sa uspostavljanjem oscilacija, 866;
— sa vakuumskom diodom, 844
detonacija, 780
dezasfaltovanje, 899
difrakcija X-zraka, 707
difuzija:
— gasna, 922;
— u metalu, 707
dijafonija, 866
Dikrete, 843
dilatacioni spojevi, 766
dilatometrija, 707
Dimon, Santos, 784
dinamo, 778
dioda, 824
diode:
— Cenerove, 832;
— Esaki, 832;
— gasne, 829;
— sa hladnom katodom, 831;
— u paraleli, 838;
— u seriji, 838
dirižabli, 793;
— gipki, 793;
— kruti, 793;
— polukruti, 793
diskaverer, 895
diskriminator, 846
distributor, 881
dizel-motor, 774
dobijanje legura, 710
dobijanje metala, 710
dobijanje sirovog gvožđa, 713
dopant, 831
dopiranje, 831
Dopler-Fizoov efekat, 848
duo-stanovi, 726;
— dupli, 726
duraluminijum, 703
Durandal, 701
Dvajtov postupak, 71

DŽ

Džilkrist, 702, 714

E

Early Bird, 853, 888
Edisonov efekat, 823
Egren, P., 851
Eho I, 888
Eho II, 888
ejdofor, 855
Ekles-Džordanovo kolo, 842
Ekskalibur, 701
eksploatacija nalazišta nafte, 895;
— primarna, 895;
— sekundarna, 896
eksploatacija železnica, 768
ekstenziometar sa vibrirajućom žicom, 861
ekstenziometrija, 861
ekstruzija, 759
elastičnost materijala, 688
elektrane na plimu i oseku, 916
električni:
— peć, 713;
— vuča, 765, 767
elektroerozija, 750
elektroliza, 702, 711, 712
elektrometalurgija, 712
elektronika, 823
elektronske cevi, 823;
— sa radnim opterećenjem, 825
elektronski:
— fleš, 865;
— kola, 823;
mikroskop, 708;
— mikrosonda, 708, 858;
— optika, 824;
— sistem paljenja, 777;
— stroboskop, 866;
— top, 829, 854
elektrum, 701
elementi:
— alfageni, 715;
— gamageni, 715
elisa, 805
emajl, 736
emajliranje, 736
emisija:
— elektrona, 824;
— stimulisana, 851;
— termoelektronska, 824
emitor, 832
Esno-Pelteri, Rober, 809, 817
etilen, 906
eutektik, 706
eutektoid, 706
Evrovizija, 853

F

Fabr, Anri, 794
faktor:
— obogaćenja, 922;
— pojačanja, 825
fanotroni, 829
Farman, Anri, 794
farovi, 792
fazmetar, 849
feding, 846
fenol-formol, 756
Ferije, 825
ferit, 706
Filonov metod, 697
Fleming, 823
flotacija, 703, 710
fluorescentni ekran, 829
Fon Braun, Verner, 809, 812
fonometar sa registratorom, 863
fortran, 872
fosfatiziranje, 736
fotoelastična konstanta, 696
fotomultiplikator, 828
fototelegrafija, 889
Fraskini, 783
frekvencmetri, 863
Frud, Herbert, 783
Frudov broj, 796
Fukolove struje, 867

G

Gajger-Milerov brojač, 708
galenit, 701, 717
galvanometar, 857
gamaradiografija, 708
Garo, Rolan, 784
generator visoke učestanosti, 867
geografija nafte, 910
Gerenov postupak, 728
Ginije, 734
Ginije-Prestonove zone, 734
glačalica, 729
glačanje, obrtno, 729
glaukonit, 712
gliptali, 756
glodači, 744
glodalica, 744:
— horizontalna, 744;
— kombinovana, 745;
— kopirna, 745;
— sa nepomičnim postoljem, 745;
— sa planetarnom glavom, 745;
— sa pokretnim stubom, 745;
— specijalne, 745;
— univerzalna, 745;
— vertikalna, 745
glodanje, 743:
— čeono, 744;
— istosmerno, 744;
— obimno, 743;
— profilno, 743;
— suprotnosmerno, 743
Godard, Robert Hačings, 817
Graf Cepelin, 793
grafit, 924
granica elastičnosti, 705
granična učestanost, 834
granične krive elastične otpornosti, 689
gravimetrijski postupci, 710
Gregoar, 783
Grifitova parna kola, 770
Grinvaltov postupak, 712
Gurnej, 770
gustina, 704
gvožđa, specijalna, 715
gvožđe, 702, 715;
— belo, 715;
— kovno, 715;
— sa sferoidalnim grafitom, 715;
— sivo, 715

H

halkopirit, 716
Hantsmen, 702
Harvic, 868
Hejz, 782
heksafluorid urana, 922
heksoda, 826
helikopter, 801, 802;
— mehanički, 802;
— reaktivni, 802
hematit, 701:
— crveni, 712
— mrki, 712
Henkok, 770
henri, 885
heptoda, 826
Hercov kabl, 847
Herul, 702
Hevisajd, 884
hidrokrekovanje, 899, 900
Hindenburg, 784
Hjuz, 876
Hjuzov telegrafski štampač, 888
hlorit, 712
Holerit, 871
homing, 849
hranilište, 721

I

ignitor, 831
ignitroni, 831
ikonoskop, 829
ilisklit, 718
Ilković, 860
infrastruktura lansiranja, 821
inhibitori, 810
inhromiranje, 735
integrator svetlosti, 857
intenzivna struja zasićenja kolektorskog spoja, 834
interval očvršćavanja, 706
Intervizija, 853
ispiranje, 710
ispravljači:
— poluprovodnički, 837;
— sa fanotronima, 836;
— sa gasnim cevima, 836;
— sa ignitronima, 837;
— sa silicijumskim diodama, 837;
— sa tiratronima, 830;
— sa upravljačkom rešetkom, 831;
— sa vakuumskim cevima, 836;
— sa živinom parom, 830
istiskivač, 726
izobutilen, 905
izohroma, 696
izoklina linija, 696
izolatori, 831
izostatičke linije, 695
izrada čelika:
— u električnoj peći, 715;
— u visokofrekventnoj peći, 715
izrada kalupa, 722;
— u grudvi, 722;
— u jami, 722;
— u kolupnicima, 722
izrada Martinovog čelika, 714
izrada Tomasovog čelika, 713
izvijanje, 690, 691
izvlačenje:
— limova i traka, 728;
— ručno, 728;
— šipki, 727;
— žice, 727

J

Jasejdž, Čarls, 783
Javan, 851
jednačina kružne orbite, 817
jezgrenik kalupa, 722
jezgro kalupa, 722
jonizacija, 829;
— sudarna, 829
Jungov modul, 688, 692

K

kablovi:
— koaksijalni, 886;
— podmorski, 886;
— pupinovani, 884;
— sa simetričnim paricama, 886
Kailčap, 765
kalaj, 701, 702
kalcinacija, 711
kaloriziranje, 735
kalup, 721;
— od peska, 722;
— sa topljivim voskom, 722;
— u pesku sa topljivim modelima, 722
kaljenje, 701, 734;
— izotermalno, 734;
— obično, 734;
— sa indukcionim grejanjem, 734;
— zagrevanjem pomoću plamenika, 734
kameno doba, 701
kapacitivnosti međuelektrodne, 826
karakteristika rešetke, 825
karbidi, 731
karbonitriranje, 735
karburacija, 775
karburator, 774,775
karoserija, 771;
— noseća, 787
karota, 894
kasiterit, 717
Kasten, R., 708, 858
katalitički reforming postupak, 899
katamaran, 894
katoda, 824
kavitacija, 866
Keli, Džordž, 784
kermeti, 731
Kevendiš, 702
Kinjo, Nikola Žozef, 763, 770
Kiri, Frederik i Irena, 703
Kiri, Petar i Marija, 703
Kirkendalov efekat, 730
klip, 774
klipnjača, 774
klistron, 827, 848
Koanda, Anri, 805
kobol, 872
kočnice, 783;
— duo-servo, 784;
— sa diskom, 785;
— sa dobošem, 784;
— sa papučama, 784;
— sa samopodešavanjem, 784;
— sa slobodnim papučama, 784
koeficijent:
— dilatacije, 704;
— multiplikacije, 919;
— sigurnosti, 693
Kokerov metod, 697
kokila, 722
koks, metalurški, 713
koksovanje, 899
kola:
— integrisana, 875;
— logička, 872;
— sa elektronskim cevima, 836;
— sa poluprovodnicima, 842
kolamina, 716
kolektor, 710, 832
Kolins, Majkl, 817
kolumbijum, 719
komora:
— jonizaciona, 859;
— za sagorevanje, 806
kompaund motor, 804
kompresibilnost, 785
kompresor, 806;
— centrifugalni, 806;
— aksijalni, 806
kondenzator za spregu, 840
Konstantinesko, 782
konvertori, 723
konverzioni odnos, 921
konverzioni prinos, 921
kopanje rude, 710
kopolimeri, 753, 755
Kort, 702
Kotal, 782
kovačka čeljust, 725
kovanje, 724;
— u kalupu, 724
Krampton, 763
krečni kamen, 713
krekovanje:
— katalitičko, 899;
— vodenom parom, 905
Kriger, 771
kristalni sistemi, 703
kriolit, 716
kritični:
— napon rešetke, 830;
— radijus, 919;
— veličina, 919
kriva odgovora, 840
Kruks, 823
krutost materijala, 688
kubna rešetka:
— površinski centrirana, 703;
— prostorno centrirana, 703
Kulonov modul, 688, 692
kvarto-stanovi, 726

L

Lambert-Berov zakon, 857
Lameov elipsoid, 689
lančana reakcija, 919:
— divergentna, 919;
— konvergentna, 919
Langmur, 825
lansiranje:
— iz ekvatorijalnih regiona, 818;
— iz polarnih regiona, 818
lansirne baze, 822
Laplas, 912
laser, 753, 823, 851;
— gasni, 851;
— oksidni, 851;
— poluprovodnički, 851
Lavoazje, 702
Ledik, Rene, 808
legure, 703:
— bakra, 701
lemljenje, 733:
— meko, 733;
— tvrdo, 733
Lenoar, Etjen, 770
let:
— horizontalan, 799;
— pri penjanju, 800;
— u kružnom viražu, 800
Levasor, 771
Levasorov menjač, 781
Levi, Lisjen, 845
Levi, Moris, 695
Lilijental, Oto, 794
limiter, 846
limonit, 712
Lindberg, Čarls, 794
linije klizanja, 705
Lisažu, 863
Lisažuove figure, 863
livenje, 720, 723:
— centrifugalno, 723;
— centrifugalno pod pritiskom, 723;
— neprekidno, 723;
— obično, 723;

— okretanjem, 723;
— pod pritiskom, 723;
— polucentrifugalno, 723;
— pravo centrifugalno, 723;
— prekidno, 723;
— u vakuumu, 723
livenje plastičnih materija, 759:
— ekstruzijom, 759;
— pod pritiskom, 759;
— prenošenjem, 759
Lojdov postupak, 712
lom, 706:
— mešoviti, 706;
— zrnasti, 706;
— žilavi, 706
luminofora, 854

M

magneti, 731
magnetit, 712
magnetne osobine, 704
magnetofon, 855
magnetofonska traka, 855
magnetoskop, 856
magnetoskopsko snimanje, 855
magnetron, 827, 848
Majbahov naglavak, dvostruki, 781
makaze, 727:
— cirkularne, 728
makrosegregacija, 731
malahit, 701
Male, 765
Mare, Žil, 794
Markoni, 843
martenzit, 707, 734
martenzitske transformacije, 707
Martin, 702
Martinova peć, 714
maseni spektrograf, 860
maser, 753, 851
mašine za bušenje, 745
mašine za kovanje, 724:
— na spori pritisak, 724;
— na udar, 725;
— sa dvostrukim dejstvom, 725
mašine za provlačenje, 741
matrice:
— proste, 728;
— složene, 728;
— višestruke, 728;
— višestupne, 728;
— za bušenje, 728
međufrekvencija, 845
mehanika leta aviona, 798
mehanizacija, 868
mehanizmi kočnih sistema, 785
mehanizmi, upravljački, 790
Mendeljejev, 702
menjač, 780, 781:
— automatski, 782;
— hidrodinamički, 782;
— planetarni, 782;
— sa stalno spregnutim zupčanicima, 781
Merdok, 770
merenje:
— dužine, 856;
— mehaničkih naprezanja, 861;
— nivoa tečnosti, 860;
— pritiska, 860;
— protoka, 860;
— temperature, 857;
— težine, 861;
— težine bez tegova, 862;
— u oblasti akustike, 862;
— u oblasti svetlosti, 857;
— viskoziteta, 861;
— vremena, 862
mesing, 716
mesinzi, specijalni, 716
Mesnagerov metod, 696
metali:
— neželezni, 701;
— osobine, 703;
— struktura, 703
metalni kalup, 722
metalurgija:
— aluminijuma, 706;
— bakra, 706;
— berilijuma, 708;
— cinka, 716
— cirkonijuma, 719;
— kadmijuma, 718;
— kalaja, 717;
— magnezijuma, 717;
— moderna, 702;
— molibdena, 719;
— nikla, 717;
— niobijuma, 719;
— olova, 717;
— platinskih metala, 718;
— plutonijuma, 718;
— praha, 730;
— srebra, 718;
— tantala, 719;
— titana, 718;
— uranijuma, 718;
— volframa, 719;
— zlata, 718
metod:
— električnih analogija, 697;
— fotoelastometrije, 694, 695;
— momenta, 694;
— odjeka, 708
metodi otkrivanja nafte:
— geofizički, 891;
— gravimetrijski, 891;
— magnetometrijski, 891;
— seizmički, 891
metro:
— na pneumatskim točkovima, 769;
— viseći, vazdušni, 769
mikrofotometri, 858
mikrografija, 707
mikrosegregacija, 721
mikroskop:
— elektronski, 864;
— elektronski sa hiperakceleracijom, 864;
— elektronski sa sekundarnim elektronima, 864;
— sa zagrevnom pločom, 707
mikrousahline, 721
Milikenov eksperiment, 823
Mišlen, 771
mlaznica:
— izduvna, 806;
— termopropulziona, 808
množač učestanosti, 841
modeliranje kalupa, 722
moderator, 918, 923
modul:
— elastičnosti, 688, 704;
— klizanja, 688, 692;
— kompresije, 688;
— otpornosti, 692;
— smicanja, 688, 692;
— torzije, 688
modulacija, 885:
— amplituda, 843, 886;
— frekventna, 845;
— subnosećeg talasa, 854
Mohol, 894
Mohorovičić, 894
molibdenit, 719
moment:
— savijanja, 693, 697;
— ukleštenja, 699
Mondovizija, 753
monokristal, 704, 709
Morov krug, 689
Morzeov telegrafski aparat, 888
motor, 774:
— aerokosmički, 803;
— bezvazdušni, 809;
četvorotaktni, 774, 772:
— dvotaktni, 773, 774;
— električni, 775;
— fotonski, 812;
— hemijski, raketni, 809;
— jonski, 812;
— klipni, 804;
— klipni sa elisama, 804;
— klipnomlazni, 805;
— na plazmu, 812;
— nehemijski, 811;
— pulzoreaktivni, 808;
— pulzoreaktivni aerodinamičkog dejstva, 808;
— pulzoreaktivni sa klapnama, 808;
— raketni hibridni, 811;
— raketni sa čvrstim propergolima, 810;
— raketni sa tečnim propergolima, 810;
— sa obrtnim klipom, 774;
— specijalni, 774;
— statoreaktivni, 808;
— termoelektrični, 812;
— turbinski vazdušni, 805;
— turboelisni, 807;
— turbomlazni, 806;
— vazdušni, 804;
— vazdušni bez turbina, 808
mreža za telekomandovanje i telemetriju, 822
Mujar, Luj, 794
multipleks:
— frekventni, 846;
— vremenski, 846
multivibrator, 842;
— bistabilni, 842
Muncov metal, 716
mutatori, 831

N

nafta, 890
naftovodi, 897;
— Đenova — Švajcarska — Bavarska, 897;
— južnoevropski, 897;
— prijateljstva, 897;
— Roterdam — Rur, 897;
— Severna Nemačka — Zapadna Nemačka, 897;
— za konačne proizvode, 897;
— za sirovu naftu, 897
naizmenično napajanje, 835
najlon, 757
napon:
— dozvoljenog zamora, 698;
— gorenja, 830;
— luka, 830;
— stabilizacije, 831
narezač, 748
narezivanje, 748
Nata, 754
navigacija, hiperbolička, 848
neolitsko doba, 701
negaton, 823
nepermetar, 863
neravnotežna stanja, 707
Nernstovo vlakno, 858
Nikolova prizma, 695
Nikolsonov sifon, 765
Nikvist, 868
nitriranje, 735
Noge, Moris, 794
noseća učestanost, 885
nukleacija:
— heterogena, 720;
— homogena, 720
nuklearna energija, — korišćenje, 924
nuklearni:
— pogon, 927;
— reaktor, 918;
— gorivo, 921

O

obeležavanje:
— naplatak, 788;
— pneumatika, 788
Obert, Herman, 809, 812, 817
oblaganje:
— metalizacijom u vakuumu, 736;
— platiranjem, 736;
— sinterovanjem, 736
oblast:
— dozvučnog strujanja, 795;
— hiperzvučnog strujanja, 795;
— nadzvučnog strujanja, 795;
— okozvučnog strujanja, 795
oblik orbita, 819
oblikovanje:
— eksplozijom, 730;
— magnetno, 730;
— pod visokom energijom, 729;
— pomoću električnog pražnjenja, 730;
— ravnih limova, 727
oblikovanje plastičnih materija, 758;
— istezanjem, 758;
— pod vakuumom, 758;
— savijanjem, 758;
— štampanjem, 758;
— utiskivanjem, 758
obogaćivanje, 710
obrada metala:
— elektrolitička, 752;
— elektromagnetnim zracima, 753;
— elektronskim snopom, 751;
— hemijska, 751;
— mlazom plazme, 752;
— rezanjem, 737;
— ultrazvukom, 751
obrada podataka, 871
obrtno izvlačenje, 729:
— kupasto ili krivolinijsko, 729;
— valjkasto, 729
očvršćavanje legure, 720
odvajanje:
— elektrostatičko, 710;
— magnetno, 710;
— ručno, 710
Ojler, 700
Ojlerov obrazac, 691
Oldrin, Edvin, 817
olefini, 905
olovo, 701, 702
oprema za bušenje, 895
optičko pumpanje, 851
ordinatori, 871
orijenter, 881
ortikon, 829
oscilator, 841:
— elektronski, 841
osciloskop, katodni, 863
Osman, 703
osmatranje, elektromagnetno, 848
osvetljenje, 791
Oto, 771
otporni moment preseka, 698
otpornost:
— materijala, 688;
— odvodna, 840
overdrajv, 782

P

padobran, 801
paljenje, 776:
— baterijsko, 776
Panardu, 771
parna vuča, 764
paraksilol, 907
Paskalova računska mašina, 871
Paten, P., 769
pečenje:
— na gomili, 711;
— u suspenziji, 711;
— uz aglomeraciju, 711
peći:
— električne, 723;
— elektrolučne, 712;
— indukcione, 712, 723;
— jamaste, 711, 722;
— lučne, 723;
— otporne, 712, 723;
— rotacione, 722;
— sa loncima, 712, 723;
— sa topilištem, 711, 722;
— sa trupom, 711;
— za sagorevanje, 722;
— za topljenje, 722
Pegu, Adolf, 794
pehblenda, 718
Peker, Onezifor, 770
pena:
— fenolna, 761;
— od polistirola, 761;
— od poliuretana, 761
Peno, Alfons, 794
pentoda, 826
Peren, F., 859
Peren, Žan, 823
periodni sistem elemenata, 702
perlit, 706
Pero, Anri, 783
petrohemija, 904
Pežo, Arman, 770
pilot, 800
pilotiranje, 800;
— automatsko, 801
Plankova konstanta, 851
plastična materija, 753;
— oblikovanje, 758;
— primena, 762
plastifikatori, 754
plastikovanje, 760
pleksiglas, 756
plima i oseka, 912
plutonijum, 923
PN spoj, 832
pneumatici, 787;
— klasični, 787;
— radijalni, 787
Poasonov koeficijent, 688, 696
pogonski most, 780, 783
pojačanje:
— direktno, 844;

— rezonantno, 841
pojačavač, 838, 885;
— aperiodični, 839;
— klase A, 839
— klase AB, 839;
— klase B, 839;
— klase C, 839;
— sa otpornim opterećenjem, 839;
— sa simetričnom spregom, 840;
— selektivni, 839, 841;
— snage, 840;
— višestepeni, 840
pojačavačke stanice, 885
pokazatelj bazičnosti, 712
Polan, Luj, 784
polarizacija, 834
polarografija, 859
poliacetali, 756
poliamidi, 757
polibutileni, 755
poliestri, 756;
— linearni, 758;
— nezasićeni, 756
polietar, hlorisani, 756
polietilen, 754, 906
polikarbonati, 756
polikristal, 704
polimer, 753;
— ataktičan, 754;
— izotaktičan, 754;
— sindiotaktičan, 754
poliolefini, 754
polipropilen, 755
polistiroli, 755
poliuretani, 756
polivinil-acetat, 755
polivinil-alkohol, 756
polivinilhlorid, 755
položaj luke, 912
polubinarni sistem, 871
poluprovodnici, 823, 831
populacija neutrona, 918
potenciometarski pirometar, 857
pothlađenje, 720
povođenje, 787
povratna sprega, negativna, 834
površinski efekat, 886
pozitron, 823
Prandtlov broj, 796
pravci lakog namagnetisanja, 704
precizno automatsko kovanje, 725
prečišćavanje metala, 711
predajnik:
— sa frekventnom modulacijom, 846;
— sa jednim bočnim opsegom, 846
prednapon, negativan, 839
prednji pogon, 791
pregrevanje, 721
prekidači sa ignitronima, 837
prekidački režim, 834
prekidna tačka, 825
prenos podataka, 889
prenosni mehanizmi, 780
prenosnik:
— diferencijalni, 783;
— glavni, 783;
— sa elastičnom zglobnom spojnicom, 782
prenosno vratilo, 780
presa, 726
presovanje:
— direktno, 727;
— indirektno, 727;
— istiskivanjem, 726
Preston, 734
pretkovanje, 724
pretvarač, 856;
— kapacitivni, 856;
— sa tiratronima, 837
prevlačenje stapanjem, 736
princip konstantnog osvetljaja, 853
prirodni gas, 902
probijanje, 728
programer, 872
programiranje, 872
proizvodnja:
— čelika, 713;
— sintetičkih smola, 754
projektili, 812;
— vazduh — morske dubine, 813;
— vazduh — vazduh, 813;
— vazduh — zemlja, 813;
— vojni, 813;
— zemlja — vazduh, 813;
— zemlja — zemlja, 813
promene orbita, 819
propergol, 909
propilen, 906
propusni opseg, 841, 846
prosejavanje, 710
prospekcija:
— geološka, 890;
— seizmička, podmorska, 892;
— seizmička, refleksijom, 891
proširivanje, 747;
— na strugu, 747;
— pomoću nasađenog proširivača, 747;
— razvrtačem, 747
provlačenje, 741;
— spoljašnje, 741;
— unutrašnje, 741
provlakač, 741
provodnici, 831
prskotine, 721
pruge za valjanje žice, 726
Prust, 702
pseudolegure, 716
psihologija pilota, 801
Pulsen, 855
Pupin Mihajlo, 884
pupinizacija, 884
Pupinov korak, 885
Purp, Mark, 794
putnička kola, 765

R

računari, 871;
— analogni, 871, 874;
— cifarski, 871, 874;
— tehnički, 907;
— za upravljanje, 907
radar, 845
radilica, 774
radioaktivni:
— obeleživači, 708;
— otpaci, 927
radioaktivnost, veštačka, 703
radio-difuzija, 847
radio-far, 848
radio-goniometrija, 848
radio-izotopi, 925
radio-relejne veze, 887
radio-telefonija, 844
radio-telegrafija, 843
radio-veze, 843
Rafar, 771
rafinacija, 898
Rajt, Orvil i Vilbur, 794
Raketa, 763
rakete, 812;
— komercijalne, 813, 814;
— naučne, 813;
— nuklearne, 812;
— za aerodinamička istraživanja, 813;
— za astronomska osmatranja, 813;
— za istraživanje visokih slojeva atmosfere, 813;
— za lansiranje satelita i kosmičkih sondi, 814
Rankinov obrazac, 691
Rasel, 770
rastvaranje, 710
ravnotežna stanja, 706
razvodni mehanizam, 779
razvodnik:
— klipni, 765;
— ventilski, 765;
— volšertov, 765
reaktivnost, 919
reaktori:
— brzi, 920;
— oplodni, 921;
— sa obogaćenim uranom, 920;
— termalni, 920
redukcija, 710
regulator napona, 778
regulator sa tiristorima, 869
rekristalizacija, 706, 733
retifikaciona kolona, 904
Reley I, 888
rendisaljka:
— dugohodna, 740;
— kratkohodna, 740;
— kratkohodna sa nepokretnom glavom, 740;
— kratkohodna sa pokretnom glavom, 740;
— vertikalna, 740
rendisanje, 739
Reno, Luj, 771
Renoov direktni stepen prenosa, 781
Renouf, 783
Rentgen, 703
Reomir, 703
reprodukcija zvuka, 843, 855
rešetkasta greda, 694
Revel, 770
Ričardson, 824
rilsan, 758
Riterov metod, 694
Roberts, 770
rondele, 728
Rošetova so, 860
rude, 710;
— karbonatne, 710;
— manganove, 713;
— oksidne, 710;
— silikatne, 711;
— sulfidne, 711
Rumkorfova bobina, 770
Rut, 868
rutil, 718

S

sabijanje, 690
sajdvinder, 894
samopaljenje, 780
satelit, 816, 820, 888;
— aktivni, 888;
— bez posade, 820
— biološki, 821;
— meteorološki, 821;
— naučni, 821;
— pasivni, 888;
— sa posadom, 820;
— sa slučajnom (povremenom) vezom, 888;
— sinhroni, 820;
— sinhronizovani, 888;
— stacionarni, 888;
— telekomunikacioni, 821;
— vojni, 821
savijanje, 690;
— prosto, 692;
— ravno, 692;
— složeno, 693
scintilacioni brojač, 857, 860
sečenje, 727;
— makazama, 727
sedišta za izbacivanje, 801
Segen, 763
segregacija, 720;
— u bloku, v. makrosegregacija;
— u kristalima, v. mikrosegregacija
sekač, 738
selsin, 869
Sendzimir, 726
Sent Kler Devil, 702
separacija, elektromagnetska, 922
servo kočnica, 786
servomehanizmi, 868;
— brzinski, 867;
— pozicioni, 867
siderit, 712
signal:
— hrominentni, 853;
— luminentni, 852;
— osvetljaja, 852;
— za horizontalnu sinhronizaciju, 852;
— za sinhronizaciju, 852;
— za vertikalnu sinhronizaciju, 852;
— železnički, čujni, 766;
— železnički, vidni, 766
signalizacija, železnička:
— prostorna, 766;
— za zaštitu pružnih uređaja, 766
sijalica:
— jodna, 791;
— sa halogenim parama, 791
simbolički jezik, 872
Simens, 702
simetrična učestanost, 845
Simington, 770
simulatori, 875
singularne tačke, 696
sinhromotor, 869
sinhronizacija prenosa, 781
sinhronizator, 782
sinterovanje, 730, 731
sintetički:
— benzin, 900;
— smola, 753
sistemi:
— G. C. A., 850;
— I. L. S., 850;
— multipleks, 846;
— NTSC, 854;
— PAL, 854;
— SECAM, 854;
— Takan, 849
sistem oslanjanja:
— aerostabl, 789;
— hajdrolastik, 789;
— Sitroen, 789
sistem za vođenje:
— po pravcu, 850;
— silaska, 850
skupljanje, 721
smicanje, 690, 691
smole:
— akrilne, 756;
— alkidne, 756;
— epoksidne, 756;
— fenilne, 756;
— fenoksi, 757;
— karbamid-formol, 757;
— melaminske, 757;
— vinilne, 756
sočiva:
— elektromagnetna, 825;
— elektrostatička, 825
sonde, geodezijske, 821
Sorbi, 703
spektrofotometrija, 858;
— infracrvena, 858
spektrometrija, 858
spojnica, 780;
— automatska, 780;
— elektromagnetska sa prahom, 781;
— hidraulična, 781;
— mehanička, 780;
spuštanje planiranjem, 798
spuštanje sa propulzijom, 799
srebro, 701
sredstva praćenja:
— elektromagnetska, 822;
— optička, 822
stabilizacija, 834
stabilnost vozila, 786
stereofonija, 855
stezna glava, 725
stišljivost materijala, 688
Stivenson, Džordž, 763
stoker, 765
strmina cevi, 825
strug, 741;
— čeoni, 743;
— paralelni, 742;
— revolverski, 743;
— vertikalni, 743;
— za poprečnu obradu, 743
struganje, 741
struja:
— inverzna, 832;
— održavanja, 835;
— upravljačka, 778;
— zasićenja, 824
strujni regulator, 778
strukturno kaljenje, 707
subnoseći talas, 853
superheterodin, 845
supertanker, 897
svećica, 777;
— hladna, 777;
— topla, 777
Syncom III, 888

Š

šasija, 771, 786;
— sa centralnim nosačem, 787;
— u obliku platforme, 787
Šefild, 763
šerardiziranje, 735
šipke:
— kompenzacione, 920;
— regulacione, 920;
— sigurnosne, 920
školjka, 722
škriljci, 893
Šokli, 832
Šotkijev šum, 845
štampač, 874
šumovi:
— prouzrokovani elektronskim cevima, 845;
— termički, 845
šupljikavost, 721

T

talasna mehanika, 703
talasovod, 886
taloženje, elektrolitičko, 735
Taten, Viktor, 794
Tavnes, 851
teledirigovanje, 815;
— automatsko, indirektno, 815;
— automatsko u domenu vidljivosti, 815;
— indirektno, 815;

— ručno u domenu vidljivosti, 815
telefonija, 876;
— sa nosećim strujama, 885
telefonske centrale, automatske, 880;
— sistem elektronski, 883;
— sistem Krosbar, 880, 882;
— sistem Panel, 880;
— sistem Rotari, 880, 882;
— sistem R6, 880, 881;
— sistem Straudžer, 880
telefonske centrale, ručne, 878;
— sa lokalnom baterijom, 878;
— sa centralnom baterijom, 878
telefonski aparat, 876
telegrafija, 888
telegrafon, 855
teleks, 889
teleprinter, 874, 889
televizija, 852;
— u boji, 853
televizijski:
— predajnik, 853;
— prijemnik, 853
Telstar I, 888
Telstar II 888
Telstar Relay, 853
temper liv:
— američki, 715;
— evropski, 715
temperatura:
— kraja očvršćavanja, 706;
— početnog očvršćavanja, 706
teorija:
— dislokacija, 703, 705;
— relativiteta, 703
teretna kola, 765
tergal, 907
termičko hromiranje, 735
termodifuzija, 922
teška voda, 923
tetroda, 826
— tiratronska, 830
tirator, 835
tiratron, 830;
— čvrsti, 835;
— sa hladnom katodom, 831
tiristori, 835
Tislad-Holov postupak, 713
Tomas, S., 714
Tomasova čeličana, 714
Tomasovo gvožđe, 712
Tomson, 860
toplotni kumulativni proces, 834
topljenje, 711;
— sa šljakom, 710
toranj za bušenje, 893
torijum, 923
torzija, 690, 691
transhorizon, 847
transkoder, 854
transport:
— beskrajnom trakom, 769;
— hidraulični, 769;
— nafte, 896
transporteri, 769
transverzalna sila, 697
tranzistor, 832;
— sa efektom polja, 835;
— unipolarni, 835;
tranzistori snage, 835
Trepardu, 770
Trevitik, 763, 770
trijade, 854
trinistor, 835
trio-stanovi, 726
trioda, 825;
— gasna, 830
Truve, 771
turbina, 806;
— gasna, 774, 805
— kompresora, 774;
— snage, 774
turbogenerator, 807
turbomotor, 807

U

ubrizgavanje goriva, 776;
— neposredno, 776;
— posredno, 776
udarni talasi, 797
ugao povođenja, 787
ugljovodonici, aromatični, 906
ultrazvučna kontrola, 708
ultrazvuk, 708, 856, 866
unutrašnji:
— naponi, 721;
— otpornost, 825
upravljanje vozilom, 789
uran, 921
uran 233, 923
uran 235, 922
uranit, 718
uranotorit, 718
uređaj:
— za navigaciju, 849;
— za paljenje, 774;
uređaji za kočenje, 765, 768
urezivanje, 748;
— na mašini, 748;
— ručno, 748
usporenje, 784
uzletanje:
— kratko, 803;
— vertikalno, 803

V

Vajtl, Frank, 805
valjanje, 725;
valjaonički stan, 726;
— specijalni, 726;
— za blumove i slabove, 726;
— za debele limove, 726;
— za gredice, 726;
— za hladno valjanje, 726;
— za šine i profile, 726;
— za toplo valjanje, 726
Vankelov motor, 773
varničar, 892
Vaši, L., 884
Veneltova elektroda, 732
vešanje mosta, 783
veze (troposferske), 847
VF telefonija, 885
vidikon, 829
Vignerov efekat, 705
Vilson, 782
visinomeri, radio-električni, 849
visoka peć, 713
visokofrekventni:
— generatori, 867;
— zagrevanje, 867
viskoznost, 795
vitkost, 691
Vivian, 763
vizbreking, 899
vodonik, 702
vodovi:
— fantomni, 883;
— nadzemni, 883;
— podzemni, 883
vratilo sa kardanskim zglobom, 782
vreme:
— odziva kočnice, 784;
— reagovanja vozača, 784
vuča:
— dizel-motorima, 767;
— motorima sa unutrašnjim sagorevanjem, 765

Z

zadnji pogon, 791
zakošenje, 722
zamak, 716
zatezanje, 690
zatur, 789
zavarivanje, 720, 721;
— autogeno, 732;
— difuzijom, 732;
— elektronskim bombardovanjem, 732;
kovanjem, 732;
— oksiacetilensko, 732;
— otporno, 732;
— pomoću atomskog vodonika, 732;
— tačkasto, 732;
— trenjem, 732;
— u luku, 732;
— ultrazvukom, 732
zavarljivost, 731
zglob, homokinetički, 783
zglobni prenosnici, 782
zlato, 701
Zvorikin, 829
zvučna »barijera«, 798

Ž

Žakar, 871
Žanto, 771
železnica, 763;
— na »vazdušnom jastuku«, 769
železnički:
— kola, 765, 767;
— pruga, 764, 766;
— signalizacija, 766
železno doba, 701
železo, 701, 702;
— čisto, 716
žirodin, 802
žiroplani, 801
živa, 702