

nose ni jako kisele ni jako alkalične tekućine a ni više temperature. Filtarska sredstva od vunenih tkanina nekada su se mnogo upotrebljavala za filtriranje vrlo kiselih suspenzija. (Vijek trajanja filtarskih sredstava od vune pet puta je dulji od vijeka trajanja pamučnih filtarskih sredstava u tim uvjetima.)

Filtarska sredstva od tkanina od sintetskog vlakna u mnogim su slučajevima već zamjenila tkanine od prirodnih vlakana, jer imaju neka vrlo dobra svojstva: ne bubre, inertna su prema mnogim kiselinama i lužinama, a neka podnose vrlo visoku temperaturu; osim toga površina im je vrlo glatka, pa se filtarski kolač s njih lako skida.

Ponekad se filtarska sredstva od tkanih tekstilnih materijala izrađuju i od smjese prirodnih i sintetskih vlakana.

Filtarska sredstva od netkanih vlakana sastoje se od razmjernekratkih vlakana sasvim neuredno složenih u sloj i zatim na neki način u njemu učvršćeni. Zbog toga što nemaju gustih čvorišta koja bi ometala protjecanje, kao što je to u tkanim tekstilnim filtarskim sredstvima, pružaju manji otpor strujanju, pa su brzine filtriranja na njima veće. Veliki je nedostatak ovih filtarskih sredstava njihova mala čvrstoća. Zbog toga se i upotrebljavaju u razmjerne debelim slojevima. Prikladni su za dubinsko filtriranje. Od ovih materijala naročito se mnogo upotrebljavaju jastučići, odnosno diskovi od pamuka i ploče od različitih pustova dobivene prešanjem. Vrlo važno filtarsko sredstvo iz ove skupine je i papirna pulpa. Izvanredno dobro uklanja nečistoće i vrlo je propusna. Može se i razmerno lako čistiti, pri čemu je treba razmulfjuti. U nekim slučajevima filtarska sredstva od vlaknatih materijala formiraju se od vlakana koja se dodaju suspenziji. Takve slojeve lakše je formirati na vodoravnim filtarskim površinama, ali se oni upotrebljavaju i na filtarskim bubnjevima i na lisnatim filtrima s okomitim listovima.

Filtarska sredstva istkana od žica, zvana još i metalnim, ustvari su žičana metalna sita. Već prema namjeni, prvenstveno s obzirom na karakter agresivnosti sastojaka suspenzija s kojima dolaze u dodir, izrađuju se od žica od različitih metala (npr. bronce, bakra, nikla, srebra, nerdajućeg čelika, specijalnih slitina). Također se izrađuju platnenim i keper vezom. Ponekad se izrađuju i tkanine od kombinacije žica s azbestnim vlaknima. Pri tome se teško postiže jednolikost veza, što, usprkos nekim izvanrednim svojstvima tih materijala, ograničava njihovu primjenu. Velike su prednosti filtarskih sredstava istkanih od žica njihova čvrstoća i, ako je vrsta njihovog materijala ispravno primjerena agresivnosti sastojaka suspenzije, njihova kemijska otpornost, zbog čega im je onda trajnost velika. Upotrebljavaju se i kao samostalna filtarska sredstva (najviše za filtriranje suspenzija s grubljim česticama čvrste tvari) i kao nosači drugih filtarskih i pomoćnih filtarskih sredstava.

Filtarska sredstva istkana od mineralnih vlakana obuhvataju azbestna i staklena tkiva. Općenito ova sredstva ne podnose djelovanje alkalnih sredina, osim razrijedenih i na običnim temperaturama. Nešto su otpornija prema djelovanju kiselina, izuzevši fluorovodičnu. Neotporna su i na abraziju i slabu su savitljiva.

Dijatomejska zemlja skoro je čisti silicijum-dioksid. Dobiva se od naslaga skeleta kremenjašica. Veličina joj je čestica $\sim 50 \mu\text{m}$. Dostupna je u različitim »stupnjevima« koji se razlikuju propusnošću u omjerima i do 1 : 20. Često se mijesă s azbestnim vlaknima, aktivnom glinom ili aktivnim ugljenom. U tim slučajevima istovremeno djeluje i kao adsorbens.

Perlit je prirodno staklo, vulkanskog podrijetla. Po kemijskom sastavu uglavnom je silicijum-dioksid, a zatim aluminijum-oksid. Gustoća mu je veća od gustoće dijatomejske zemlje, a veličina čestica mu se nalazi u granicama od 50 do $150 \mu\text{m}$. Također se može dobiti u »stupnjevima« za koje se može reći da odgovaraju »stupnjevima« dijatomejske zemlje.

LIT.: A. Kufferath, Filtration und Filter, Berlin 1942. — G. D. Dickey, Filtration, New York 1961. — L. E. Browne, Filtration, u djelu: Kirk-Othmer, Encyclopedia of chemical technology, Vol. 9, New York 1966. — J. B. Pool, D. Doyle, Solid-liquid separations, London 1966. — F. M. Tiller, Chem. eng., 73 No. 13 (1966) 151. — B. A. Жужиков, Фильтрование, Ленинград 1968. — D. A. Blackadder, R. M. Nedderman, Handbook of unit operations, London 1971. — H. F. Porter, J. E. Flood, F. W. Renie, Chem. eng., 78 No. 4 (1971) 39. — C. Alt, Filtration, u djelu: Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie, Weinheim 1972. — S. A. Miller, Filtration, u djelu: Perry i Chilton, Chemical engineers' handbook, New York 1973. — H. Robel, Filtration, u djelu: Lehrbuch der chemischen Verfahrenstechnik, Leipzig 1973.

M. Hraste

FINOMEHANIČKA TEHNIKA je znanstvenotehnička disciplina koja se kao grana strojarstva bavi izučavanjem, konstrukcijom i proizvodnjom finomehaničkih proizvoda (sastavnih dijelova, instrumenata, aparata i strojeva), kao i izborom i primjenom prikladnih tehnoloških postupaka. Dok se u strojogradnji radi s tokovima energije, u finomehaničkim uređajima obraduju se pretežno signali kojima se prema određenim zakonitostima prenose informacije. Finomehanička tehnika u užem smislu bavi se samo obradom signala koji se prenose mehaničkim veličinama, dok finomehanička tehnika u širem smislu obuhvaća i obradu signala koji se prenose bilo kojom drugom fizikalnom veličinom, npr. električnom, akustičkom ili toplinskom. Proizvod je finomehanički ako ima barem jedno od ovih svojstava:

ako je relativno malih dimenzija, pa su troškovi materijala u cijeni proizvoda bitno manji od troškova izrade;

ako je proizvod predviđen da olakšava umni rad čovjeka (npr. računala) ili nadomješta i objektivizira ljudska osjetila (npr. mjerni instrumenti), ili prostorno i vremenski proširuje domet meduljudskog saobraćanja (npr. telekomunikacijski uređaji);

ako mjerilo dobrote proizvoda nije kao u strojogradnji stupanj djelovanja, tj. odnos ulazne i izlazne snage, već ako kao kriterij služi ocjena da li se između izlaznih i ulaznih veličina održava odnos koji je predviđen zakonima obrade.

Svojstva finomehaničkog proizvoda zahtijevaju poseban pristup konstrukciji i tehnologiji proizvodnje. Prema praktičnim tržišnim kriterijima, finomehanički proizvodi se dijele na ove grupe: uredski finomehanički proizvodi i računala; mjerni, upravljački i regulacijski proizvodi; telekomunikacijski proizvodi, proizvodi akustičke tehnike, neki proizvodi medicinske tehnike, konfekcijski strojevi; trgovачki automati, neki proizvodi bijele tehnike i igračke.

Finomehanički proizvodi grade se često uz primjenu više znanstvenih disciplina: mehanike, akustike, automatike, elektrotehnike, elektronike, fluidike, kemije, optike i termodinamike. Znanstvena interdisciplinarnost je bitno obilježje finomehaničke tehnike. Tradicionalna podjela tehnike na elektrotehniku, strojarstvo itd., ima svoj odraz u neuspjeloj podjeli finomehaničke tehnike na mehaničku, optičku, elektroničku itd. Ova podjela je neodrživa, jer se najuspješniji finomehanički proizvodi grade uz istovremenu primjenu više znanstvenotehničkih disciplina. To, međutim, znatno otežava profiliranje stručnih kadrova za finomehaničku tehniku.

Tržišnopropozivodnoj podjeli finomehaničke tehnike pridružuje se znanstvenotehnička prema kojoj se finomehanička tehnika dijeli na: informacijsko-mjernu tehniku, tehniku automatskog upravljanja, računsku tehniku, giroskopsko-navigacijsku tehniku, finu mehaniku (preciznu mehaniku), elektroničku finomehaničku tehniku, optičko-elektroničku finomehaničku tehniku, toplinski finomehaničku tehniku i na finomehaničku tehnologiju.

Ne postoje značevni podaci o razvoju finomehaničke tehnike do XVII st. Ipak je poznato da su već u XIII st. proizvedene naočari i mehanički satovi s pogonskim utezima i regulacijom pomoću nemirnice. Krajevem XVI st. u Nizozemskoj počinju se izradivati prvi teleskopi i mikroskopi. Prvi računski stroj izrađen je 1623 u Stuttgartu. Godine 1657 patentirao je Christian Huygens uru njihalicu, a John Harrison je konstruirao kronometar 1761. Daniel Fahrenheit je 1714 načinio termometar s vinskom žestom, kasnije sa životinjom. Nešto prije 1713 izumljen je pomorski sekstant. U XVII st. izumljeni su još higroskop, anemometar, barometar i mikrometar, a nešto kasnije u XVIII st. vaga s ostrobridnim mostićem. Očigledno je da je suvremeni razvoj finomehaničke tehnike započeo tek u XVII st., stoljeću genija, kada je utemeljeno moderno društvo.

TEORIJSKE OSNOVE

Fizikalni sustav. Finomehanički proizvodi svrstavaju se u tri grupe: u strojeve koji pretvaraju jedan oblik energije u drugi ili u rad; u sprave koje prenose i transformiraju sile i u pribore koji prenose i transformiraju gibanje.

Svaki proizvod, bilo koje navedene grupe, sastoji se od dijelova između kojih postoji uzajamno djelovanje. Dijelovi-komponente između kojih postoji interakcija sačinjavaju sustav. Stanje sustava ovisi o stanju komponenata i strukturi sustava, oblikuje se djelovanjem vanjskih sila.

Finomehanički proizvodi su realni fizikalni sustavi. Njihovo stanje je posljedica tokova mase i energije kako unutar sustava tako i između sustava i okoline. Na sl. 1. predočena je shema su-

stava. Strelica x predočava vanjski utjecaj, a zove se *ulazni signal*. Strelica y predočava stanje sustava, a zove se *izlazni signal*.



Sl. 1. Shematski prikaz sustava

Razlikuju se *statički* i *dinamički sustavi*. U statičkim sustavima ulazni i izlazni signali ne mijenjaju se tokom vremena, a u dinamičkim se mijenjaju. Strogo uvezši, za prijelaz nekog fizičkog sustava iz jednog stanja u drugo uvijek je potrebno vrijeme. U tehničkoj se praksi kao statički uzima takav sustav kojemu se ulazni i izlazni signali tokom vremena zanemarljivo malo mijenjaju.

Matematički model sustava. Stanje sustava je određeno fizičkim zakonima koji se mogu matematički opisati. Matematička formulacija stanja sustava naziva se *matematički model*. U matematičkim modelima statičkih sustava ulazni signal je *varijabla*, a izlazni signal *funkcija* ulaznog signala. U matematičkim modelima dinamičkih sustava varijabla je vrijeme, a ulazni i izlazni signali su funkcije vremena. Najopćenitiji model dinamičkog sustava dan je diferencijalnom jednadžbom:

$$f_1(y^{(n)}, y^{(n-1)}, \dots, y', y) = f_2(x^{(m)}, x^{(m-1)}, \dots, x', x) \quad (1)$$

u kojoj su derivacije po vremenu t prikazane izrazima:

$$\begin{aligned} y^{(n)} &= \frac{d^n y}{dt^n}; & y^{(n-1)} &= \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}}; \dots; y' &= \frac{dy}{dt} \\ x^{(m)} &= \frac{d^m x}{dt^m}; & x^{(m-1)} &= \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}}; \dots; x' &= \frac{dx}{dt}. \end{aligned}$$

Za realne fizičkalne sustave jednadžba (1) je obično nelinearna. Za rješavanje takvih jednadžbi ne postoje univerzalne egzaktne matematičke metode. Zato se u tehničkoj praksi primjenjuju aproksimirani matematički modeli koji imaju oblik linearne diferencijalne jednadžbe:

$$a_0 y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + \dots + a_{n-1} y' + a_n = b_0 x^{(m)} + b_1 x^{(m-1)} + \dots + b_{m-1} x' + b_m, \quad (2)$$

gdje su: a_0, a_1, \dots, a_n i b_0, b_1, \dots, b_m konstante određene početnim stanjem u trenutku $t = 0$.

Nulto početno stanje je stanje sustava koji u trenutku $t = 0$ miruje. Tada su ulazni i izlazni signal, kao i sve njihove derivacije, jednaki nuli. Pogodnom transformacijom varijable t može se jednadžba (2) napisati tako da zadovoljava nulte početne uvjete.

Prijenosna funkcija sustava. Rješavanje jednadžbe (2) je moguće, ali je naporno i dugotrajno. Stoga se jednadžba (2) s pomoću Laplaceovih transformata prevodi u algebarsku jednadžbu: $(a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n) L[y] = (b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_{m-1} p + b_m) L[x]$,

gdje su: $L[y]$ i $L[x]$ Laplaceovi transformati ulaznog i izlaznog signala, p kompleksna varijabla (kompleksni parametar vremena). Iz jednadžbe (3), a za nulto početno stanje, izvodi se prijenosna funkcija sustava $W(p)$:

$$W(p) = \frac{L[y]}{L[x]} = \frac{b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_{m-1} p + b_m}{a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n}. \quad (4)$$

Prijenosna funkcija definira dinamička svojstva sustava jednako dobro kao i matematički model, a osim toga olakšava analizu sustava (v. *Dinamika procesa* TE 3, str. 361).

Karakteristična jednadžba sustava. Ako se nazivnik prijenosne funkcije (4) izjednači s nulom, dobije se karakteristična jednadžba sustava:

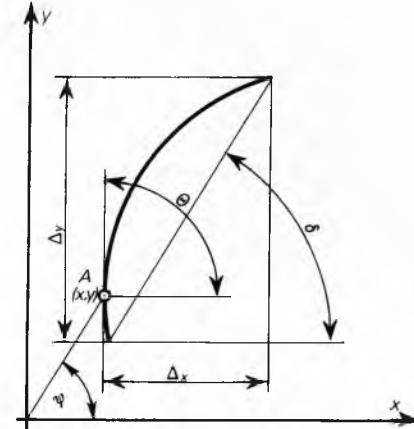
$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n = 0. \quad (5)$$

Karakteristična jednadžba omogućava ocjenu stabilnosti sustava. Ako je realni dio ma i jednog korijena karakteristične jednadžbe veći od nule, izlazni signal s porastom vremena teži beskonačnosti, pa je pripadni sustav nestabilan. Nestabilni sustavi su često tehnički neupotrebljivi.

Statička karakteristika sustava (sl. 2) pokazuje ovisnost izlaznog signala o ulaznom:

$$y = f(x). \quad (6)$$

Statička karakteristika dobiva se iz matematičkog modela tako da se sve derivacije izjednače s nulom. Ako se sustav odnosi na mjeru spravu koja ima skalu, statička je karakteristika ujedno i jednadžba skale. Tada razlike vrijednosti Δx i Δy znače i opseg mjeranja (sl. 2).



Sl. 2. Statička karakteristika sustava

Osjetljivost sustava definira se kao granična vrijednost odnosa prirasta izlaznog i ulaznog signala:

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \right) = \frac{dy}{dx} = \frac{m_y}{m_x} \tan \Theta, \quad (7)$$

gdje je Θ kut tangente statičke karakteristike (sl. 2); m_y i m_x mjerila osi y i x . Osjetljivost sustava određuje se iz prijenosne funkcije (4) uvrštanjem $p = 0$:

$$S = W(0) = \frac{b_m}{a_n}. \quad (8)$$

Srednja osjetljivost sustava \bar{S} je odnos izlaznog i ulaznog opsega djelovanja:

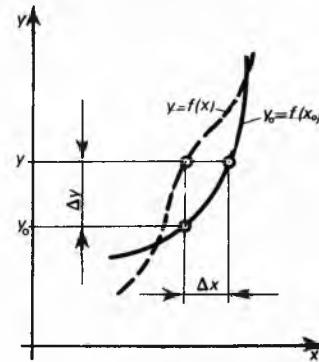
$$\bar{S} = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{m_y}{m_x} \tan \delta, \quad (9)$$

gdje je δ kut teticne statičke karakteristike (sl. 2).

Apsolutne i relativne pogreške sustava. Apsolutna pogreška je razlika izlaznih signala realnog i idealnog sustava, koji nastaju pri istom ulaznom signalu (sl. 3):

$$\Delta y = y - y_0 = f(x) - f(x_0) = \left(\frac{dy}{dx} \right) \Delta x = S(x) \Delta x, \quad (10)$$

gdje je $y = f(x)$ statička karakteristika realnog sustava a $y_0 = f(x_0)$ statička karakteristika idealnog sustava.



Sl. 3. Statičke karakteristike realnog sustava y i idealnog sustava y_0

Relativna pogreška je odnos absolutne pogreške i pripadnog signala:

$$\eta_x = \frac{\Delta x}{x}; \quad \eta_y = \frac{\Delta y}{y}. \quad (11)$$

Točnost sustava ocjenjuje se prema reduciranim pogreškama koje se definiraju izrazima:

$$\xi_x = \frac{\Delta x}{x} \quad \text{i} \quad \xi_y = \frac{\Delta y}{y}. \quad (12)$$

Pogreške i osjetljivost složenih sustava. Složeni se sustavi redovno mogu rastaviti na određeni broj elementarnih sustava. Osjetljivost i pogreške složenog sustava ovise o osjetljivostima i pogreškama elementarnih sustava i načinu njihova spajanja. U tabl. 1. dane su jednadžbe za izračunavanje osjetljivosti i pogreške složenih sustava za tri karakteristična načina spajanja: serijsko, paralelno i paralelnopovratno spajanje.

FINOMEHANIČKE KONSTRUKCIJE

Opći zahtjevi. Finomehanički proizvod treba da je siguran, pouzdan i rentabilan. Sigurnost znači da je isključena mogućnost opasnih posljedica u primjeni proizvoda. To je naročito važno ako se finomehanički proizvod primjenjuje, npr. za regulaciju važnih procesa. Jednako tako sigurni moraju biti i finomehanički proizvodi široke potrošnje, jer ih upotrebljavaju osobe koje ne poznaju njihovo tehničko ustrojstvo. Pouzdanost znači vjerojatnost da se finomehanički proizvodi neće u specificiranom vremenu obavljajući odredene funkcije pokvariti. To je naročito važno ako se proizvod primjenjuje za regulaciju tehnoloških procesa. Troškovi zastoja proizvodnje obično su neuporedivo veći od vrijednosti finomehaničkog proizvoda. Stupanj rentabilnosti je predodređen konstrukcijom. Zbog velikog udjela troškova izrade u cijeni proizvoda, smanjenje troškova izrade bitno utječe na cijenu proizvoda. Zato se, suprotno laičkom mišljenju, u finomehaničkoj proizvodnji izbjegavaju fine i precizne obrade. Često se upotrebljava vučeni šipkasti materijal koji ima dimenzije u tolerancijskom polju $h9$ i $h11$ (oznake prema međunarodnim ISA tolerancijama). To je razlog primjene dvaju sustava dosjedanja u finomehaničkoj tehnici: sustava jedinične osovine i sustava jediničnog prvrta (v. članak *Tolerancije i naleganja*). Troškovi izrade mogu se bitno smanjiti upotrebom unificiranih dijelova i sklopova jer unifikacija omogućava veće serije i specijaliziranu tehnologiju. Upotreba kvalitetnih materijala također može smanjiti troškove izrade. Zato se u finomehaničkoj tehnici često upotrebljavaju plenumni metali i poludrago kamenje (npr. za ležajeve osovine). Finomehanički elementi dimenzioniraju se prema traženoj krutosti i potrebnim dinamičkim svojstvima. Kako su opterećenja redovito vrlo mala, čvrstoća se samo provjerava.

Finomehanički elementi su takvi mehanički dijelovi koji se u manjoj ili većoj mjeri primjenjuju u gradnji svakog finomehaničkog proizvoda. Postoji sličnost između finomehaničkih elemenata i elemenata strojeva, ali postoje i razlike. One se očituju u dimenzijama, materijalu, izradi i primjeni. Podvajanje finomehaničkih elemenata i elemenata strojeva ima i gospodarski značaj

jer se unificiranjem i standardiziranjem dijelova utire put racionalnijoj proizvodnji. Uobičajena je podjela finomehaničkih elemenata u dvije velike skupine: u finomehaničke elemente za spajanje i, u funkcionalne finomehaničke elemente.

FINOMEHANIČKI ELEMENTI ZA SPAJANJE

Načini spajanja u finomehaničkoj tehnici odlikuju se velikom raznolikošću. Zato se spojevi ne dijele u rastavljive i nerastavljive, kao u elementima strojeva, već se spojevi razvrstavaju u ove tri grupe: spajanje promjenom materijala, spajanje plastičnom deformacijom materijala i spajanje elastičnom deformacijom materijala.

U prvoj su grupi pretežno nerastavljivi spojevi, a u posljednjoj pretežno rastavljivi spojevi. Pregled finomehaničkih elemenata za spajanje dan je u tabl. 2.

Spajanje promjenom materijala

Ovamo idu postupci spajanja kod kojih se spoj ostvaruje kohezijskim i adhezijskim silama. To su ovi postupci: lemljenje, zavarivanje, lijepljenje, spajanje kitom, utaljivanje i ulaganje.

Lemljenje je postupak spajanja dvaju metalnih dijelova pomoću taline trećeg metala, tzv. lema. Pri lemljenju se lem i dijelovi koje treba zalediti zagrijavaju sve dok ne nastupi površinsko legiranje. Lemiti se mogu i nemetalni, npr. keramika, ako se njihova površina pogodnim postupkom prije toga metalizira. Postupci lemljenja razlikuju se po talištu lema, po načinu zagrijavanja i po načinu skidanja oksidnog sloja mehaničkim ili kemikalijama putem s plohe koja se lemi.

Prema talištu lema razlikuje se: meko lemljenje s talištem ispod 450°C i tvrdno lemljenje s talištem iznad 450°C (obično iznad 600°C). Prednost mekog lemljenja su relativno niske temperature lemljenja, a nedostatak mala čvrstoća spoja. Meko lemljeni dijelovi mogu se naknadnim dovodenjem topline razdvojiti. Zato se meko lemljenje primjenjuje npr. za spajanje električnih vodiča. Tvrdo lemljeni spojevi su čvršći od meko lemljenih. Zbog viših temperatura taljenja, tvrdno lemljenje može se primjenjivati rjeđe. Naime, temperatura taljenja osnovnog materijala mora uvijek biti viša od temperature taljenja lema barem za 50°C . Prema načinu dovodenja topline potrebne za taljenje lema razlikuju se ovi postupci: lemljenje lemilom, plamenom, lemljenje u kupki, u pećima, elektrolemljenje (otporno i induksijsko), lemljenje trenjem i difuzijsko lemljenje. Općenito govoreći, mogu se lemiti svi metali, ali se ipak laki metali, kojima se na površini vrlo brzo stvara sloj oksida, teže leme. Lemovi su najčešće legure. Već prema okolnostima, od lema se traži niska temperatura taljenja, sposobnost legiranja s osnovnim materijalom, čvrstoća, antikorozivnost, električna vodljivost i određena boja. Meki lemovi su najčešće legure kositra ili olova, a tvrdi lemovi legure bakra ili aluminijuma. Spojne površine moraju se prije lemljenja očistiti. Osobito je važno odstranjivanje oksidne kožice s površine metala. Zato se uz mehaničko čišćenje površina primjenjuju i sredstva za kemijsko čišćenje (skidanje oksida). U tu svrhu služe za meko lemljenje smjese cink-klorida i salmijaka, a za lemljenje električnih vodiča kolofonijski boraks. U lemljenim spojevima obično je kritično smično naprezanje. Lomno smično naprezanje mekih lemovi je $\tau = 2 \dots 8 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$, a tvrdih lemovi $\tau = 14 \dots 20 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$. Faktori sigurnosti biraju se u granicama $k = 2 \dots 4$. Lemljeni spojevi oblikuju se tako da se nosivost lemljenog spoja povećava kombiniranjem lemljenog spoja i nekog od spojeva plastičnom de-

Tablica 1
OSJETLJIVOST I POGREŠKE SLOŽENIH SUSTAVA

Shema spajanja	Apsolutna pogreška Δy	Osjetljivost S
	$\Delta y = a_1 \Delta y_1 + a_2 \Delta y_2 + \dots + a_n \Delta y_n$ $a_i = S_{i+1} + S_{i+2} + \dots + S_n$	$S = S_1 \times S_2 \times \dots \times S_n$
	$\Delta y = a_1 \Delta y_1 + a_2 \Delta y_2 + \dots + a_n \Delta y_n$ $a_1 = a_2 = a_3 = \dots = a_n = 1$	$S = S_1 + S_2 + \dots + S_n$
	$\Delta y = a_1 \Delta y_1 + a_2 \Delta y_2 + \dots + a_n \Delta y_n$ $a_1 = \frac{1}{1 \pm S_1 S_2}; \quad a_2 = \frac{\pm S_1}{1 \pm S_1 S_2}$ Znak + für negativ-potentielle Verbindung; Znak - für positiv-potentielle Verbindung	$S = \frac{S_1}{1 \pm S_1 S_2}$

formacijom. Zato se i električni vodiči prije lemljenja na prikidan način mehanički učvrste, npr. provlačenjem kroz ušice za lemljenje.

Tablica 2
PREGLED ELEMENATA ZA SPAJANJE

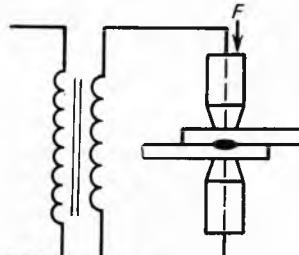
Spajanje		
Elastičnom deformacijom	Plastičnom deformacijom	Promjenom materijala
Stezanje	Zakivanje	Lemljenje
Uprešavanje	Porubljivanje	Zavarivanje
Klinjenje	Utiskivanje	Lijepljene
Uvrtanje	Presavijanje	Kitanje
Pritezanje	Preklapanje i zakretanje	Udaljivanje
Podlaganje	Prošivanje	Ulaganje

nje i savijanjem, ovijanjem oko stupčića za lemljenje i sl. (v. *Zavarivanje i lemljenje*).

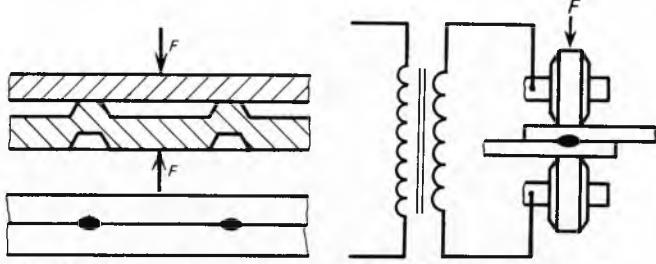
Zavarivanje je postupak spajanja metalnih i termoplastičnih dijelova pri kojem se spojna mjesta zagrijavanjem dovode u gnjecavo ili rastaljeno stanje.

Za zavarivanje metalnih dijelova primjenjuje se elektrootporno zavarivanje ili pak zavarivanje taljenjem pomoću električnog luka ili plinskog plamena (autogeno zavarivanje).

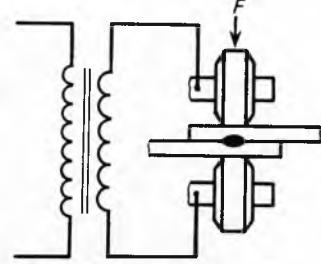
Pri elektrootpornom zagrijavanju materijal se na spojnom mjestu dovodi u gnjecavo stanje i zatim pritiskom spoji. Ovamo se ubrajaju: točkasto (sl. 4), bradavičasto (sl. 5), kolutno (sl. 6) i sučeno (sl. 7) zavarivanje. Sučeno zavarivanje može biti s pritiskom ili uz slabo nalijeganje s iskrešnjem.



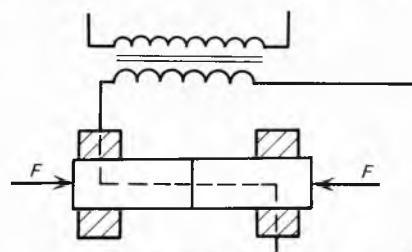
Sl. 4. Točkasto zavarivanje



Sl. 5. Bradavičasto zavarivanje



Sl. 6. Kolutno zavarivanje



Sl. 7. Sučeno zavarivanje

Točkasto zavarivanje daje kružni oblik zavarenog mjestu. Promjer točkastog zavara bira se prema izrazu:

$$d = 5 s, \quad (13)$$

gdje je s debljina najtanjeg lima u spoju.

Bradavičasto zavarivanje je modifikacija točkastog zavarivanja koja omogućava istovremeno zavarivanje na više mjesta što povećava učinak. Kolutno zavarivanje omogućava kontinuirani zavar (šav). Ono se, međutim, primjenjuje i za točkasto zavarivanje u kojem slučaju struja samo povremeno prolazi strujnim krugom, a limovi se pomiču. Točkasto, bradavičasto i kolutno zavaruju se limovi debljina $s = 0,02 \dots 6$ mm izmjeničnim strujama od 1 000 do 100 000 A uz napon na elektrodama 1 ... 15 V. Čvrstoća ovih zvara obično se ne provjerava. Dopušteno naprezanje smika pri statičkom opterećenju je $\tau_{s, dop} \leq 0,65 \sigma_{dop}$.

Sučeno zavarivanje provodi se na dva načina: pod pritiskom ili samo uz blago nalijeganje.

Pri sučenom zavarivanju pod pritiskom, dvije elektrode drže pod stalnim pritiskom šipke koje treba jednu s drugom zavariti. Spojno se mjesto zbog većeg prijelaznog otpora pri prolasku struje zagrije. Kad se ono dovoljno zagrije, metal prelazi u gnjecavo stanje, pa dolazi do zavarivanja uz stvaranje male nabrekline.

Pri sučeonom zavarivanju uz blago nalijeganje dolazi na spojnom mjestu do iskrenja i stvaranja luka, a u vezi s time do izgaranja i topljenja metala. Kad se spojno mjesto dovoljno zagrije, udarcem se šipke spajaju. Sučeno zavarivanje primjenjuje se na šipkasti materijal, i to u finoj mehanici za poprečne presjeke do 150 mm^2 . Sučeno zavarivanje pritiskom daje nešto manju, a sučeno zavarivanje iskrenjem nešto veću čvrstoću od čvrstoće osnovnog materijala.

Velika je prednost elektrootpornog zavarivanja u tome što omogućava zavarivanje raznorodnih metala. Tako se zajamčeno dobro zavari mogu postići između ovih materijala: mekog čelika, nerđajućeg čelika, kobaltnog čelika, nikla, legure nikla i kroma, monel-metala, novog srebra, mjeđi, bronce, manganina, everdura i bakra.

Toplina potrebna za zavarivanje taljenjem može potjecati od plamena ili električnog luka. Zagrijavanje plinskim plamenom omogućava zavarivanje gotovo svih materijala, ali se pri tome dio koji se zavaruje zagrije i na relativno veće udaljenosti od zavara. Zbog toga se unutarnji naponi i deformacije češće pojavljuju u konstrukcijama zavarenim plinskim plamenom.

Elektročrno zavarivanje koje se provodi otvoreno ili u nekom zaštitnom plinu omogućava lokaliziranje topline na zavar, pa je i učinak zavarivanja veći. U svakom slučaju zavarivanje taljenjem je manje podobno za jeftinu masovnu proizvodnju, pa se u finoj mehanici manje primjenjuje. Dopushtena i stvarna naprezanja spojeva zavarenih taljenjem provjeravaju se na isti način kao i u elementima strojeva.

Dijelovi izrađeni od termoplastičnih masa također se zavaruju. Toplina potrebna za zavarivanje dovodi se: topnim plinom, pomoću zagrijanih elemenata, trenjem, topotnim impulsom ili ultrazvukom. (V. *Zavarivanje i lemljenje*.)

Lijepljenje je postupak spajanja dijelova pri kojem se površinska veza među spojenim dijelovima ostvaruje pomoću lijeplja adhezijom, a djelomice i kohezijom. Mogu se lijepliti papir, drvo, koža, guma, plastične mase, keramički dijelovi i metali, i to istorodni i različiti materijali. Prednost lijepljenja je u tome što se spajanje ostvaruje bez zagrijavanja i bez promjene materijalnih svojstava. Lijepljeni spojevi osjetljivi su na savijanje i ljuštenje.

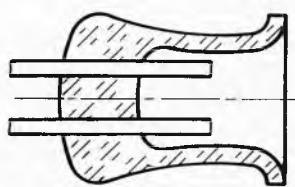
Danas se primjenjuju lijeplja životinjskog porijekla (tutkalo, kazeinska lijeplja), biljnog porijekla (deksstrinska, škrubna lijeplja i otopine kaučuka) i sintetička lijeplja (poliuretanska lijeplja, lijeplja od epoksidnih i fenolnih smola). Za lijepljenje drveta, papira i tektila upotrebljava se tutkalo, kazein i dekstrin. Za lijepljenje gume služe otopine kaučuka u benzINU ili benzolu. Za lijepljenje metala primjenjuju se epoksidne smole poznate npr. pod trgovачkim nazivima Araldit ili Epilox. Kako su adhezijske sile obično veće od kohezijskih, čvrstoča spoja bitno ovisi o debljinu sloja lijeplja ($\sim 0,1 \text{ mm}$). Kao i lemljeni spojevi, tako se i lijepljeni spojevi smiju obično napregnuti samo na smik. Kontroliraju se samo lijepljeni spojevi metala. Za spojeve lijepljene epoksidnim lijepljom, npr. Aralditom, smična lomna čvrstoća iznosi $\tau_L = 2\cdots 5,7 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$ (v. *Lijeplja, tutkala i želatine*).

Spajanje kitom primjenjuje se za stalno i kruto spajanje pojedinih dijelova, kao i za ispunjenje prostora među njima. Kit se na površine koje treba spojiti nanosi u plastičnom stanju. On se nakon određenog vremena stvrđuje i adhezijom drži na spojenim ploham. Spojevi kitom naročito su podobni za spajanje dijelova koji se izrađuju s velikim tolerancijama, npr. za spajanje staklenih i keramičkih dijelova među sobom ili s metalnim dijelovima (npr. za spajanje staklenog balona žarulje s mjenjenim podnoškom).

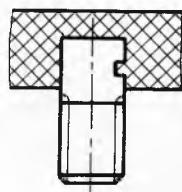
Postoje različite vrste kita. Kit na bazi ulja je smjesa samijevene krede, olovne gledi i drugih prašaka s lanenim uljem, odnosno firnisom. Ti kitovi mogu poslužiti i kao brtve za plinove i tekućine (npr. staklarski kit). Kit na bazi vodenog stakla s dodacima (npr. talkom) otporan je prema kiselinama, vrućini i vatri. Kitovi na bazi smola su otopine smola u alkoholu. Osim spomenutih, postoji još niz drugih kitova: kitovi na bazi gipsa, cementa, magnijuma, lakotopljivog stakla, pa pečatni vosak i drugi.

Da se spoj kitom zaštiti od različitih vanjskih utjecaja, on se često premazuje lakom ili sl.

Utaljivanje se primjenjuje za spajanje staklenih dijelova s metalnim, keramičkim i sličnim dijelovima (sl. 8). Prilikom utaljivanja staklo se zagrije do gnjecavog stanja, dok su metalni dijelovi, iako zagrijani, još uvijek kruti. Prednost za utaljivanje imaju metali s približno istim koeficijentom toplinskog rastezanja kao staklo (platina, volfram, molibden i krom-nikalne legure). Taj se postupak primjenjuje npr. pri izradi staklenih elektronki i žarulja.



Sl. 8. Utaljivanje



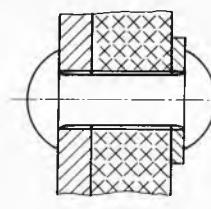
Sl. 9. Ulaganje

Ulaganje. Radi spajanja metalnih dijelova s termoplastičnim dijelovima, ulažu se metalni dijelovi u kalup za izradu termoplastičnih dijelova i tamo učvrste. Nakon prešanja metalni i termoplastični dio čine jednu cjelinu. Naravno, metalni dio predviđen za takvo spajanje mora biti tako oblikovan i usidren da se prilikom upotrebe ne može izvući, okretati i sl. Tako se ulažu u termoplastične dijelove: osnaci, ležajevi, vijci (sl. 9), matice, limene pločice i drugi metalni dijelovi. U elektrotehničkim elementima može termoplastični dio poslužiti i kao električna izolacija. Ponekad uloženi metalni dio štiti otpresak od djelovanja nepovoljnih mehaničkih opterećenja.

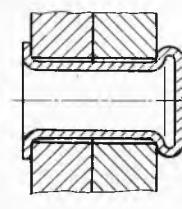
Spajanje plastičnom deformacijom

U finoj mehanici se primjenjuju ovi postupci spajanja plastičnom deformacijom: zakivanje, porubljivanje, utiskivanje, pregrabanje, preklapanje i prošivanje.

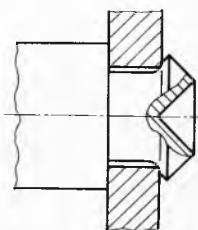
Zakivanje je spajanje plastičnom deformacijom dijela za spajanje. U finoj se mehanici zakivanje primjenjuje za spajanje dijelova među sobom, i za njihovo spajanje s kućištem i šasijom. Zakivanje



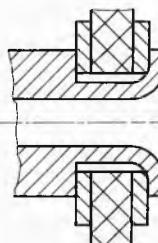
Sl. 10. Posredni zakovični spoj metalnog i keramičkog dijela



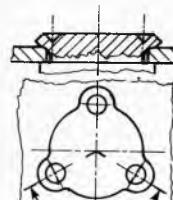
Sl. 11. Posredni zakovični spoj šupljom zakovicom



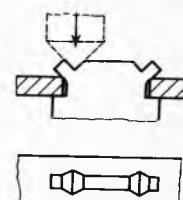
Sl. 12. Neposredni zakovični spoj zakivanjem pomoću šiljka



Sl. 13. Neposredni zakovični spoj šupljeg svornjaka s plastičnom masom



Sl. 14. Neposredni zakovični spoj s djelomično raskovanim glavom



Sl. 15. Neposredni zakovični spoj s pravokutnim strukom

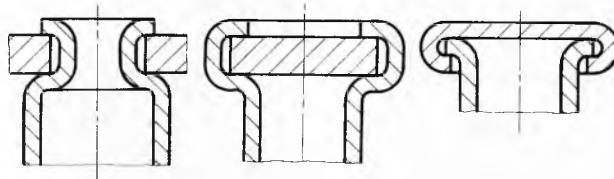
je u finoj mehanici vrlo pogodan postupak jer se zbog malih dimenzija dijelova može mehanizirati. Zakivanjem se spajaju ne samo metalni, nego i nemetalni dijelovi. Kako sila zakivanja raste s čvrstoćom i promjerom zakovice, a velika sila zakivanja može oštetiti dijelove koji se spajaju, hladno zakivanje nameće i neke zahtjeve. Materijal zakovica mora biti što meksi. Stoga se finomehaničke zakovice rade od mekog čelika (Č.0210), bakra, aluminijuma ili srebra, bilo kao pune bilo kao šuplje (cjevaste) za-

kovice. Promjeri punih zakovica ne mogu biti veći od 10 mm. Ako krutost spoja zahtijeva veće promjere, primjenjuju se šuplje zakovice. Primjena šupljih zakovica je pogodna i primjenjuje se vrlo često i pri promjerima (zakovica) manjim od 10 mm. Dosjedna površina ispod glava zakovica treba da je što veća kako bi se smanjio površinski tlak. Zato se, naročito pri zakivanju krtih dijelova, ispod glava zakovica stavljuju podložne pločice koje imaju veći promjer od glave zakovice.

Uz uobičajene poluokrugle, lećaste i upuštene glave, primjenjuju se i podobni oblici djelomično raskovanih glava zakovica. Na sl. 10-15 prikazani su zakovični spojevi karakteristični za finu mehaniku.

U finoj mehanici zakovični se spojevi obično dijele na posredne i neposredne spojeve. U posrednim zakovičnim spojevima zakovica je poseban element, a u neposrednim zakovičnim spojevima jedan izdanak elementa koji se spaja izravno služi kao zakovica. Neposredni zakovični spojevi mogu imati struk koji se zakiva pravokutna oblika (sl. 15). Takvi spojevi su osobito jeftini jer se dijelovi mogu izradivati štancanjem. Ako je potrebno, provjerava se smično naprezanje i površinski tlak u prvoružu zakovičnog spoja. Uobičajeno dopušteno smično naprezanje je $\tau_{dop} = 0,7 \sigma_{dop}$, a dopušteni površinski tlak u prvoružu $p_{dop} \approx 2\tau_{dop}$, pri čemu je σ_{dop} dopušteno vlačno naprezanje osnovnog materijala.

Porubljivanje (sl. 16) je način spajanja cjevastih vanjskih dijelova s drugim cilindričnim cjevastim ili pločastim dijelom.



Sl. 16. Tipični spojevi izvedeni porubljivanjem

Materijal dijela koji se porubljuje treba da je mekan i relativno tanak. Porubljivanjem se često učvršćuju i stakleni dijelovi u metalnim okvirima. Porubljivanje se može mehanizirati, pa ima važnu primjenu u finomehaničkoj tehnici.

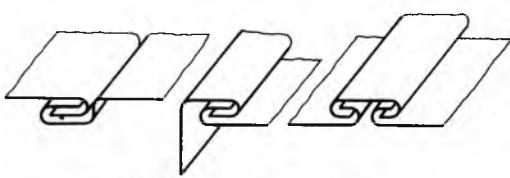
Utiskivanje je postupak utiskivanja žlijeba u cjevastom dijelu od mekog tankog lima. Često se postupak utiskivanja kombinira



Sl. 17. Tipični primjeri utiskivanja

s porubljivanjem. Na sl. 17 prikazani su tipični primjeri utiskivanja. Postupak utiskivanje može se mehanizirati.

Pregibanje (sl. 18) je postupak spajanja limenih dijelova. Materijal mora biti mekan s izrazitom sposobnošću pregibanja

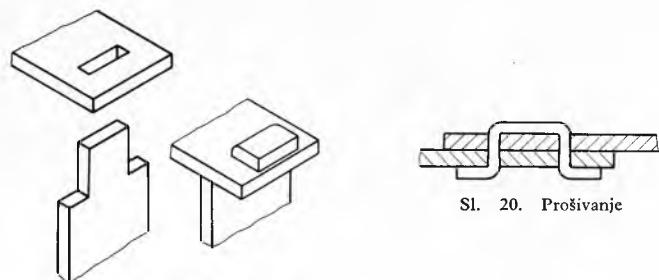


Sl. 18. Tipični pregibni spojevi

kao što su: meki čelik, bakar, cink i legure aluminijuma. Magnezijum nije podoban za pregibanje. Postupak pregibanja može se samo donekle mehanizirati.

Preklapanje (sl. 19) je tipičan velikoserijski postupak spajanja štancanih limenih dijelova, pa se u finoj mehanici rado primjenjuje. Uške na limenoj ploči moraju biti smještene tako da budu okomite na pravac valjanja lima. Preklapanjem se mogu spajati ne samo metalni dijelovi među sobom, već i metalni dijelovi s plastičnim dijelovima.

Prošivanje (sl. 20) je postupak spajanja tankih dijelova pomoću metalnih kopči. Primjenjuje se za spajanje tankih metalnih ili nemetalnih dijelova, npr. kartona. Prošivati se mogu limovi od mekog materijala debljine do 2 mm. Postupak je mehaniziran.



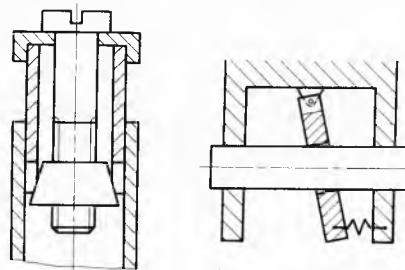
Sl. 19. Prijeklopni spoj

Sl. 20. Prošivanje

Spajanje elastičnom deformacijom

U spojeve s elastičnom deformacijom ubrajaju se stezni, uprešani, zatični, vijčani i bajonetni spojevi, kao i spajanje podlaganjem. Zajednička je karakteristika tih spojeva elastična deformacija dijelova koji sudjeluju u spaju. Ipak, u nekim od tih spojeva moguća je i djelomična trajna deformacija spojenih dijelova. To su uprešani spojevi, zatični spojevi i spojevi podlaganjem. Zato su ova tri spoja ograničeno rastavljiva, dok su preostali, sasvim elastični spojevi, potpuno rastavljivi. Neki ograničeno rastavljivi spojevi – ne svi – mogu se bez zamjene nekog od spojnih elemenata ponovo sastaviti.

Stezni spojevi sprečavaju međusobno pomicanje spojenih dijelova s pomoću sile trenja na njihovim dodirnim površinama.



Sl. 21. Primjeri steznih spojeva

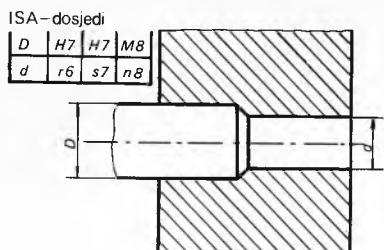
Stoga na dodirnim površinama mora djelovati normalna sila koje za $1/\mu$ puta veća od potrebnog trenja (μ je koeficijent trenja). Veličina dodirnih površina diktirana je iznosom normalne sile i dopuštenim površinskim tlakom. Kako su sile redovno male, stezni spojevi se rijetko proračunavaju. Osnovna je prednost steznih spojeva u tome što se spojeni dijelovi mogu podešavati, pa se mogu proizvoditi dijelovi manje točnosti, dakle jeftinije. Na sl. 21 dana su za finu mehaniku dva tipična stezna spoja.

Uprešani spojevi sprečavaju, kao i stezni spojevi, međusobno pomicanje dijelova s pomoću sile trenja, s tom razlikom što normalna sila nastaje uslijed različitih dimenzija spojenih dijelova. U strojarstvu se primjenjuju dvije vrste uprešanih spojeva: poprečni (prešanje u toploem stanju) i uzdužni (prešanje u hladnom stanju). U finoj mehanici prednost imaju uzdužno uprešani spojevi, ali treba napomenuti da se primjenjuju tri vrste uzdužno uprešanih spojeva, i to: čisti uzdužno uprešani spoj (koji u cijelosti odgovara uzdužnom spoju u strojogradnji), rovašeni uprešani spoj i naknadno uprešani spoj.

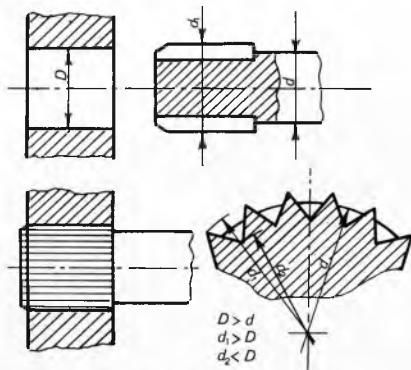
Cisti uzdužno uprešani spoj zahtijeva preciznu prethodnu obradu dijelova, jer razlika promjera rupe i uprešanog dijela ($d - D$) smije varirati samo u vrlo uskim granicama (sl. 22). Uobičajene kombinacije dosjeda navedene su na sl. 22. Uzdužno uprešani spojevi u finoj se mehanici izbjegavaju jer su skupi. Za finomehaničku praksu tipični su rovašeni uprešani spojevi (sl. 23). Primjeri D i d ne moraju biti precizno obradeni. Razlika dimenzija ($d_1 - D$), koja je potrebna za stvaranje normalne sile, ostvaruje se rovašenjem onog dijela koji je tvrdi. Kako je vanjsko rovašenje

lakše, redovno se bira materijal čepa ili osovine tako da bude tvrdi od materijala ležaja u kome se nalazi rupa.

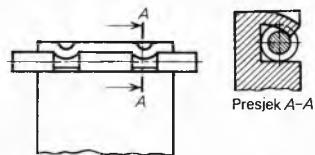
Na sl. 24 predložen je način ostvarivanja naknadno uprešanog spoja. Taj se postupak rijedje primjenjuje.



Sl. 22. Dosjedi finomehaničkih uzdužno uprešanih spojeva

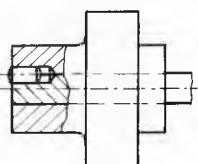


Sl. 23. Rovašeni uprešani spojevi

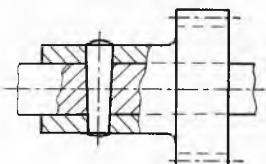


Sl. 24. Naknadno uprešani spoj

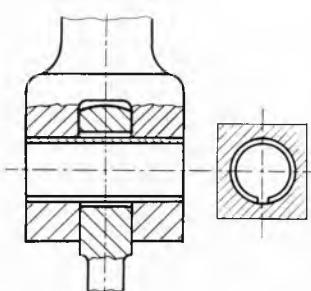
Klinjenje je postupak spajanja pomoću zatika ili klinova. Klinjenje je pouzdanije od uprešavanja, ali i skuplje. Primjena zatika je veća od primjene klinova. Primjenjuju se cilindrični (sl. 25), konični (sl. 26), zasječeni (sl. 27) i elastični (sl. 28) zatici. Kako bi se osigurala međusobna nepomičnost spajenih dijelova



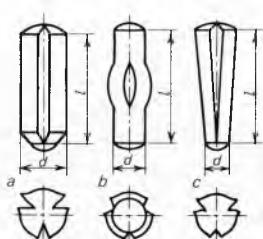
Sl. 25. Spoj s cilindričnim zatikom



Sl. 26. Spoj koničnim zatikom



Sl. 28. Spoj s elastičnom rascjepkom



Sl. 27. Zasječeni klinovi

i sprječilo ispadanje zatika, potrebno je da između zatika i provrta postoji prednapon. Potreban prednapon osigurava se kod cilindričnih zatika čvrstim dosjedom H7/m6 (v. članak *Tolerancije i nalijeganje*), kod koničnih zatika konusom 1: 50, a kod zasječenih i elastičnih zatika deformacijom. Provrt za cilindrične i konične zatike moraju se poslije bušenja još razvrtati na točne dimenzije. Provrt za zasječene i elastične zatike nije potrebno razvrtavati. Zato su spojevi sa zasječenim i elastičnim zaticima jeftiniji, pa u finoj mehanici imaju prednost.

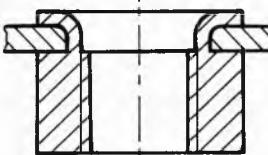
Spojevi zaticima proračunavaju se na smik i površinski tlak u provrtu, na način kako je to uobičajeno u strojogradnji. Da se osovina ne bi suviše oslabila, promjer zatika ne smije biti veći od $\frac{1}{3}$ promjera osovine.

Spojevi uzdužnim klinovima primjenjuju se samo kada treba omogućiti aksijalno pomicanje dijela nasadenog na osovinu.

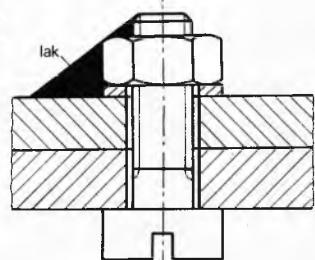
Uvrtanje obuhvaća sve vrste spojeva s primjenom navoja. Upotrebljavaju se sve vrste standardiziranih navoja. Prednost imaju metrički navozi. Kad je potrebna veća samokočnost, upotrebljavaju se metrički fini navozi. Radi ekonomičnosti pretežno se upotrebljavaju standardizirane vrste vijaka i matica. Za spajanje limova upotrebljavaju se i vijci s nareznicom. To su kaljeni vijci koji pri uvrtanju sami narežu potreban navoj matice. Ako je potrebna veća visina matičnog navoja, lim se presavija (sl. 29 a), ili se matica posebno učvršćuje za lim (sl. 29 b).



a

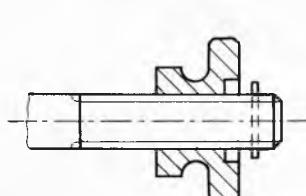


b



Sl. 30. Osiguranje lakom protiv odvrtanja

Sl. 29. Povećanje visine matičnog navoja. a) Presavijeni lim, b) posebno učvršćena matica

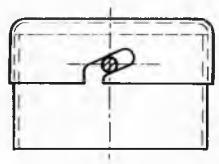


Sl. 31. Plombirani vijčani spoj

Sl. 32. Osiguranje protiv gubljenja maticice

Vijčani se spojevi osiguravaju protiv odvrtanja. Primjenjuju se osiguranja silom trenja i osiguranja obliskom, kao i u strojogradnji. Osim toga, česta je primjena osiguranja protiv odvrtanja pomoću laka (sl. 30). Na taj se način mogu jeftino i dobro osigurati vijci manjih promjera (do M5). Plombiranjem (sl. 31) osiguravaju se ne samo vijci protiv odvrtanja već i cijela konstrukcija protiv nestručnih intervencija. Posebna pažnja posvećuje se osiguranju vijaka i matica protiv gubljenja (sl. 32). Kontrola čvrstoće sprovodi se samo iznimno. Primjenjuju se isti računski postupci kao i u strojogradnji. Često se vijčani spojevi predimenzioniraju, naročito ako se zbog unifikacije primjenjuje suženi izbor navoja.

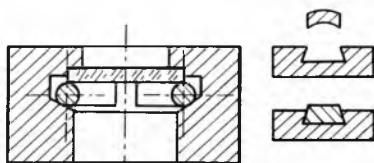
Pritezanjem izvedeni spojevi pozнатi su još pod nazivom bajonetni spojevi (sl. 33). Taj način spajanja primjenjuje se za brzo spajanje i rastavljanje dijelova s tankom stijenkom. Odlike su



Sl. 33. Pritezani (tzw. bajonetni) spoj

abajonetnih spojeva jednostavnost i jeftinoća, naročito ako se dijelovi izrađuju štancanjem.

Podlaganjem izvedeni spojevi mogu osim elastičnih deformacija imati trajne deformacije dijelova (sl. 34). Ovamo se ubrajuju i spojevi izvedeni pomoću sigurnosnih elastičnih prstenova i pločica (Seegerovih elastičnih uskočnika i radikalnih pločica).



Sl. 34. Primjer spajanja podlaganjem

Spajanje podlaganjem odlikuje se jeftinicom, pa se u finoj mehanici mnogo primjenjuje.

FUNKCIJSKI FINOMEHANIČKI ELEMENTI

Uz elemente za spajanje primjenjuje se pri izradi finomehaničkih proizvoda još niz različitih finomehaničkih elemenata koji sačinjavaju skup tzv. funkcijskih elemenata. Ovi se dijele na radne elemente i elemente za podešavanje. Radni elementi omogućavaju spremanje, vođenje ili pretvaranje energije iz jednog oblika u drugi. Prema svojoj namjeni radni se elementi razvrstavaju na spremnike, vodilice i pretvornike. Elementi za podešavanje omogućavaju regulaciju rada radnih elemenata. Razvrstavaju se na otpornike, uklopnike i regulatore. U tabl. 3 predložen je pregled funkcijskih elemenata.

Tablica 3
FINOMEHANIČKI FUNKCIJSKI ELEMENTI

RADNI ELEMENTI		
Spremnići	Vodilice	Pretvornici
<i>Energetski</i> opruga uteg zamašnjak nemirnica giroskop <i>Informacijski</i> bušena kartica bušena traka magnetska traka magnetski disk	<i>Oslonci</i> klizni ležaj šiljasti ležaj živin ležaj zračni ležaj magnetski ležaj valjni ležaj elastična nit prizma klizna vodilica valjna vodilica osovina i vratilo	<i>Prigoni</i> tarni zupčanički s gipkom niti vijčani polužni krivuljni
ELEMENTI ZA PODEŠAVANJE		
Otpornici	Uklopnići	Regulatori
ustavljača graničnik kočnica pričvršćica spojka	prekidač zapinjača uskočnica izvrstiva spojka	strujni regulator centrifugalni regulator ankerski regulator

Spremnići energije

U spremnike se pohranjuje energija potrebna za pogon finomehaničkih mehanizama. Mehanički spremnici mogu biti statički ili dinamički. Opruga i protuteg su statički spremnici, a zamašnjak, nemirnica, njihalo i giroskop su dinamički spremnici.

Opruge. Vanjska opterećenja (sile i momenti) deformiraju svako tijelo. Ako ono nakon prestanka vanjskog opterećenja poprimi prvobitne dimenzije i prvobitni oblik, ono je bilo elastično deformirano. Dio rada koji je potreban za deformiranje tijela troši se na savladavanje trenja među česticama materijala, a preostali dio rada deformacije akumulira se u tijelu u obliku potencijalne energije. Tokom poprimanja prvobitnog oblika i prvobitnih dimenzija, tijelo vraća akumuliranu energiju, te se ona može iskoristiti za obavljanje određenog rada. Opruge su mehanički dijelovi koji zahvaljujući pogodnom materijalu i obliku imaju

Tablica 4
OPRUGE U FINOJ MEHANICI I NJIHOVE
Karakteristike

Naziv	Shema	Primjena
Konzolna opruga		Za mjerjenje, vezu silom i amortizaciju
Bimetala opruga		Za mjerjenje, upravljanje, kompenzaciju
Spiralna opruga		Za mjerjenje, regulaciju, povratni moment
Spiralna opruga u kućištu		Za pogon mehanizama
Negator		Za pogon mehanizama
Cjevasta opruga		Za mjerjenje
Valoviti cjevasti mijeh		Za mjerjenje
Membrana		Za mjerjenje
Valovita membrana		Za mjerjenje i reguliranje
Zahvatna zavojna opruga		Za stvaranje protumomenta, veze silom
Tlačna zavojna cilindrična opruga		Za mjerjenje, veze silom
Vlačna zavojna cilindrična opruga		Za mjerjenje, veze silom
Tlačna zavojna konična opruga		Za amortizaciju dinamičkih sila
Gumena opruga		Za amortizaciju i prigušivanje vibracija

Legenda: F sila koja djeluje na oprugu, φ kut zakretanja opruge

FINOMEHANIČKA TEHNIKA

izrazitu sposobnost elastičnog deformiranja. Opruge se izrađuju od specijalnih čelika, mjeđi, fosforne bronce, novog srebra itd., a i od prirodne i sintetske gume. Uloga nekog elementa u sklopu ne mora biti jednoznačna. Dapače, višežnačnost je odlika racionalne konstrukcije jer se time smanjuje broj dijelova u sklopu. Tako se opruga, osim kao spremnik energije, može upotrijebiti i kao pretvornik mjernog parametra, elastičan oslonac, element za elastično spajanje, odbojnik, prigušivač titrira i razdjelnik opterećenja. U finoj mehanici opruge se veoma mnogo primjenjuju. U tabl. 4 dan je pregled tipičnih finomehaničkih opruga i njihovih karakteristika. Od tih se opruga samo spiralne opruge i negatori primjenjuju isključivo kao spremnici energije.

Prema vrsti naprezanja, opruge se dijele na fleksijske i torzijske. Naprezanje savijanja σ_s ili torzije τ_t kontrolira se prema izrazima:

$$\sigma_s = \frac{M_s}{W} \leq \sigma_{s\text{ dop}}; \quad \tau_t = \frac{M_t}{W_p} \leq \tau_{t\text{ dop}}, \quad (14)$$

gdje su M_s i M_t moment savijanja i moment torzije, W i W_p moment otpora i polarni moment, a $\sigma_{s\text{ dop}}$ i $\tau_{t\text{ dop}}$ dopuštena naprezanja savijanja i torzije.

Fleksijske opruge jesu: konzolna, bimetalna, spiralna, spiralna u kućištu, negator, cjevasta, valovita cjevasta membrana, valovita membrana i zahvatna zavojska opruga, a *torzijske opruge*: tlačna i vlačna cilindrična zavojska opruga i konačna tlačna zavojska opruga. Ako je opterećenje statičko (mirno), dopušteno naprezanje mora biti manje od naprezanja na granici razvlačenja σ_R i τ_R . Ako je opterećenje dinamičko, dopušteno naprezanje mora biti manje od trajne dinamičke čvrstoće σ_D i τ_D . Granica razvlačenja i trajna dinamička čvrstoća povećavaju se ako je materijal opruge hladno vučen, ako su poprečne dimenzije hladno vučenog materijala manje i ako je površina materijala brušena. Čvrstoća se čelička bitno povećava poboljšanjem (termičkom obradom). U finoj mehanici često se dopuštena naprezanja savijanja $\sigma_{s\text{ dop}}$ i torzije $\tau_{t\text{ dop}}$ čeličnih i brončanih opruga računaju prema pojednostavljenim izrazima, i to za statičko opterećenje:

$$\sigma_{s\text{ dop}} \leq 0,5 \sigma_L; \quad \tau_{t\text{ dop}} \leq 0,4 \sigma_L, \quad (15)$$

a za dinamičko opterećenje:

$$\sigma_{s\text{ dop}} \leq 0,3 \sigma_L; \quad \tau_{t\text{ dop}} \leq 0,25 \sigma_L, \quad (16)$$

gdje je σ_L lomna čvrstoća materijala.

Za primjenu bitne su dvije značajke: karakteristika opruge i količina rada (energije) koju opruga može primiti, odnosno dati.

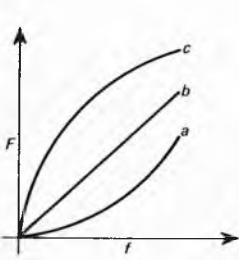
Karakteristika opruge c je funkcija ovisnost opterećenja opruge o deformaciji. Ona iznosi, ako na oprugu djeluje samo jedna sila (npr. kod konzolnih ili zavojskih opruga),

$$c = \frac{df}{df}, \quad (17a)$$

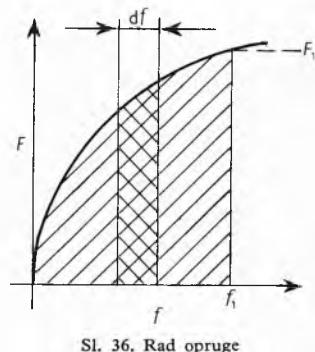
a ako na oprugu djeluje spreg sila (moment), kao npr. kod spiralnih ili torzijskih opruga,

$$c = \frac{dM}{d\varphi}, \quad (17b)$$

gdje su F i f sila na opruzi i pripadni progib, M i φ moment na opruzi i pripadni kut zakretanja opruge. Na sl. 35 predviđene su tri vrste karakteristika opruge: progresivna a , linearna b i degresivna c .



Sl. 35. Karakteristike opruga.
a) Progresivna, b) linearna,
c) degresivna



Sl. 36. Rad opruge

sivna c . Većina opruga ima linearnu karakteristiku. U tom slučaju vrijedi kad na oprugu djeluje samo jedna sila, odnosno moment,

$$c = \frac{F}{f} = \text{konst.}, \quad c = \frac{M}{\varphi} = \text{konst.} \quad (18)$$

Karakteristika opruge zove se u tom slučaju i *konstanta (turdoća, krutost) opruge*. Ona je za različite opruge različita, a ovisi osim o modulu elastičnosti i o vrsti i dimenzijama opruge.

Rad opruge (koji ona može primiti, odnosno opet dati) iznosi pri djelovanju jedne sile, odnosno momenta,

$$A = \int_0^f F df, \quad A = \int_0^\varphi M d\varphi. \quad (19)$$

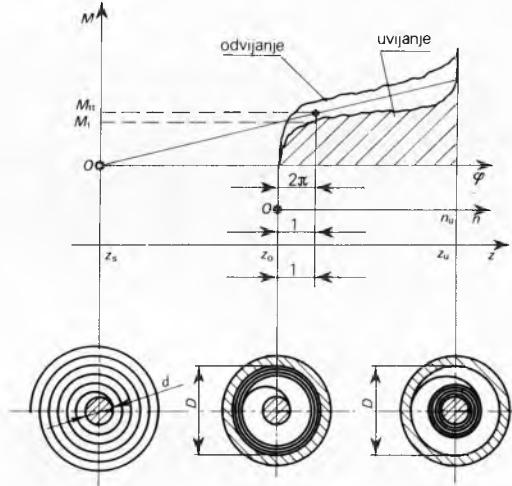
Prema sl. 36 rad opruge je proporcionalan šrafiranoj površini ispod krivulje karakteristike opruge. Ako je karakteristika linearna, ta površina ima oblik trokuta, pa rad opruge na koju djeluje samo jedna sila, uz primjenu izraza (18) iznosi

$$A = \frac{Ff}{2} = \frac{1}{2} cf^2. \quad (20a)$$

Ako na oprugu djeluje moment, važi

$$A = \frac{M\varphi}{2} = \frac{1}{2} c\varphi^2. \quad (20b)$$

Kod spiralnih opruga u kućištu, uslijed trenja između zavoja, primljeni je rad (rad uvijanja) mnogo veći od predatog rada (rada odvijanja). Kako je rad odvijanja koristan rad, opruga se podmazuje da bi se smanjilo trenje. Na sl. 37 predviđena je karakteristika



Sl. 37. Karakteristika spiralne opruge u kućištu

spiralne opruge u kućištu. Prikazana je ujedno i povezanost između kuta uvijanja φ , broja okretaja n (koji osovina može prenijeti na kućište ili osovinu) i broja zavoja z opruge. Ta se ovisnost može prikazati izrazima:

$$\varphi = (z_u - z_s) 2 \pi \quad (21)$$

$$n = (z_u - z_o), \quad (22)$$

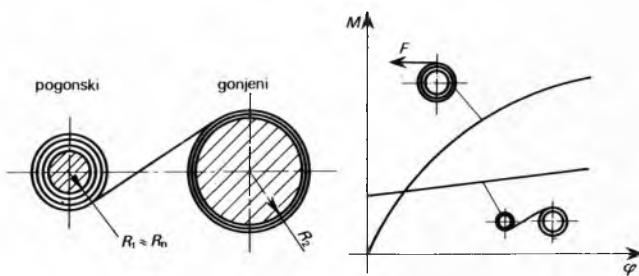
gdje je z_u broj zavoja uvijene opruge, z_o broj zavoja odvijene opruge i z_s broj zavoja slobodne opruge, koji je posljedica trajne deformacije opruge. Brojevi zavoja ovise o promjerima kućišta D , osovine d , debljini lista opruge h , duljini opruge l i faktoru popunjenoosti kućišta α , koji se definira izrazom:

$$\alpha = \frac{V_{\text{opruga}}}{V_{\text{kućišta}} - V_{\text{osovine}}} = \frac{4hl}{\pi(D^2 - d^2)}, \quad (23)$$

gdje V znači volumen.

U finomehaničkoj praksi uobičajeni su ovi odnosi: $d = D/3$; $70 \leq D/h \leq 120$; $\alpha = 0,5$; $n_u \leq 9$; $h = (0,25 \dots 0,55)$ mm. Duljina opruge l odredena je izrazom:

$$l = \frac{\pi}{\alpha h} \cdot \frac{D^2 - d^2}{4}. \quad (24)$$



Sl. 38. Shema negatora s karakteristikom

Prema iskustvu, dobru aproksimaciju ovisnosti momenta M o kutu uvijanja daje izraz:

$$M = M_1 \sqrt[n]{n}, \quad (25)$$

gdje je M_1 moment koji odgovara kutu uvijanja $\varphi_1 = (z_o - z_s + 1) \cdot 2\pi$, a određen je izrazom:

$$M_1 = K \frac{I E}{l} \varphi_1 = K \frac{b h^3}{12} \cdot \frac{E}{l} (z_o - z_s + 1) \cdot 2\pi, \quad (26)$$

gdje je $K \approx 0,75$ koeficijent smanjenja momenta uslijed trenja; I aksijalni moment inercije, E modul elastičnosti, b širina lista opruge, L , φ_1 , z_o , z_s , h već prije definirane veličine.

Prema izrazima (20), (21), (22) i (25) slijedi da je rad A odvijanja spiralne opruge dan slijedećim izrazom:

$$A = \frac{3\pi}{2} M_1 (n^{4/3} - 1). \quad (27)$$

Negator (sl. 38) je spiralna opruga koja je u neopterećenom stanju sasvim uvijena, tako da zavoji sjede jedan na drugom. Moment na gornjem bubnju izračunava se prema izrazu:

$$M = \frac{Eb h^3 R_2}{24} \left(\frac{1}{R_n} + \frac{1}{R_2} \right)^2, \quad (28)$$

gdje je E modul elastičnosti materijala, b širina lista opruge, h debljina lista opruge, R_n i R_2 radijus prema sl. 38. Kako se radijus R_n neznatno mijenja, moment je praktički konstantan (obično se uzima $R_n \approx R_1$). Zato je karakteristika negatora skoro paralelna s osi φ (v. sl. 38).

Rad negatora je:

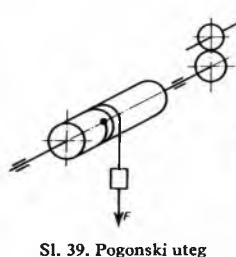
$$A \approx M \varphi. \quad (29)$$

U finoj mehanici ponekad se primjenjuju i sustavi međusobno povezanih opruga.

U tabl. 5 navedena su osnovna svojstva nekih tipičnih sustava opruga.

Uteg je izraziti spremnik potencijalne energije. Akumulirana potencijalna energija $W_p = m g h$ proporcionalna je masi utega m , gravitaciji g i razlici nivoa h . Pomoću utega se obično proizvodi moment, kao što je to predočeno na sl. 39. Uteg daje konstantnu silu, ali da bi se dobio i konstantan zakretni moment, potrebno je da se promjer mehanizma za odmatanje ne mijenja.

Zamašnjak (sl. 40) je spremnik kinetičke energije. Ako se zamašnjak zavrati tako da postigne kutnu brzinu ω , on je time, kao što je iz fizike poznato, akumulirao kinetičku energiju:



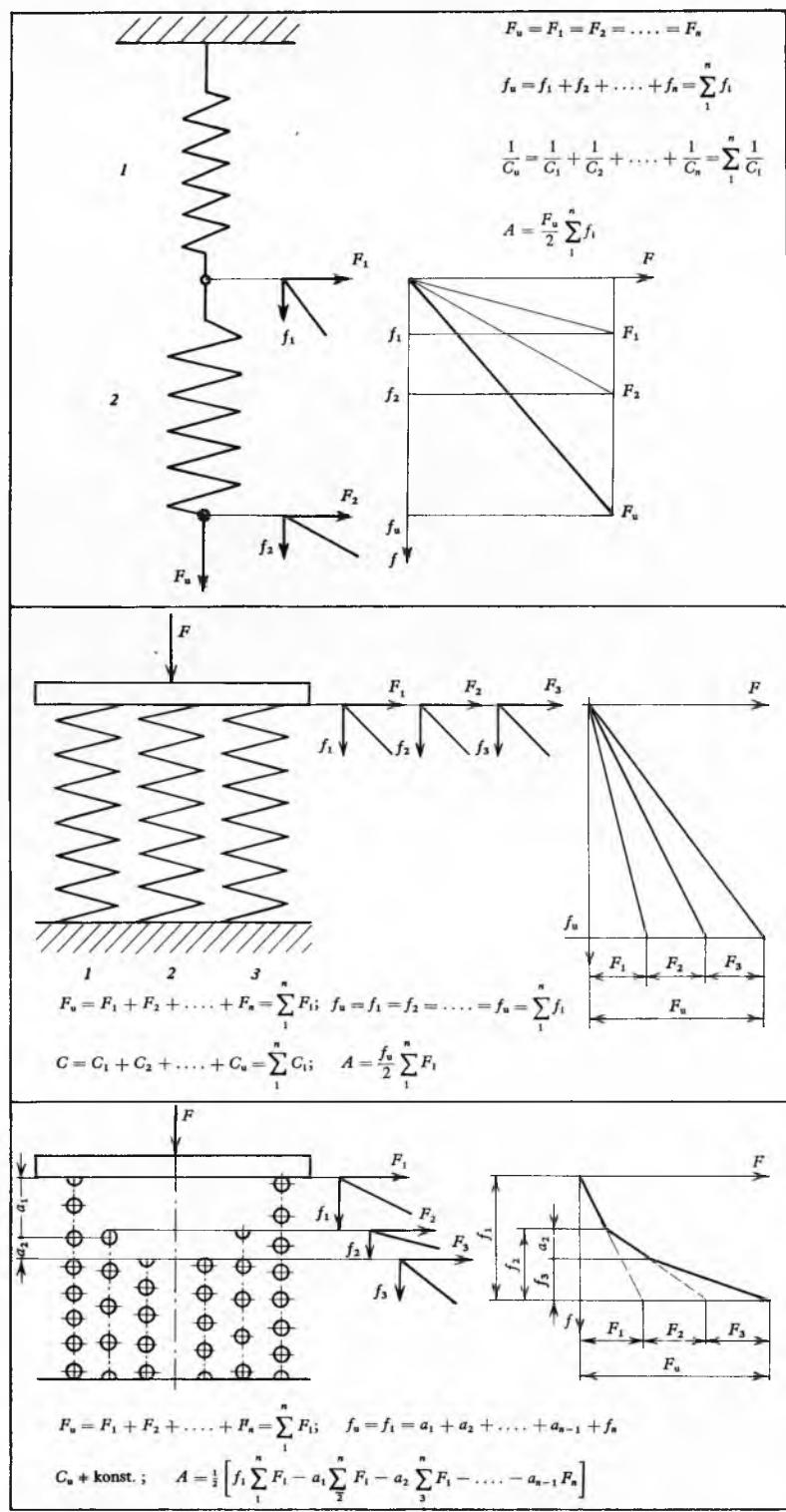
Sl. 39. Pogonski uteg

$$W_k = \frac{1}{2} I_s \omega^2, \quad (30)$$

gdje je I_s dinamički moment inercije (moment tromosti mase) s obzirom na os vrtnje $s-s$, koji iznosi:

$$I_s = \int r^2 dm, \quad (31)$$

gdje je m masa, a r udaljenost mase od osi vrtnje.

Tablica 5
SUSTAVI OPRUGA

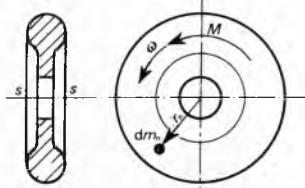
Legenda: F sila; F_1, F_2, \dots, F_n pojedinačne sile, F_u ukupna sila; f, f_1, f_2, \dots, f_n progibi opruga; C konstanta opruge, C_u ukupna konstanta; A rad

Pri kutnoj brzini ω zamašnjak ima kinetički moment (zamah, moment količine kretanja)

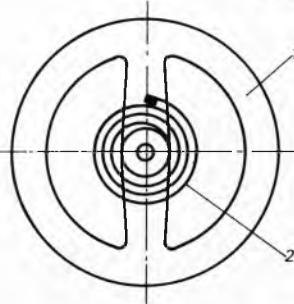
$$K = I_s \omega. \quad (32)$$

Moment koji zamašnjak može prenijeti na mehanizam dan je izrazom

$$M = \frac{dk}{dt}. \quad (33)$$



Sl. 40. Zamašnjak



Sl. 41. Nemirnica. 1 Zamašnjak, 2 spiralna opruga

Nemirnica (sl. 41) je zamašnjak kombiniran sa spiralnom oprugom. Nemirnica omogućava pretvaranje potencijalne energije opruge u kinetičku energiju zamašnjaka i obrnuto. Prema zakonu o održavanju energije, ukupna je energija W titrajnog sustava, kome se izvana ne dovodi energija, jednaka zbroju potencijalne energije W_p i kinetičke energije W_k , $W = W_p + W_k$. Uvrstili su u tu jednadžbu izraz (20 b) za oprugu i (30) za zamašnjak, dobije se

$$\frac{1}{2} c \varphi_u^2 = \frac{1}{2} c \varphi^2 + \frac{1}{2} I_s \omega^2, \quad (34)$$

gdje je c konstanta spiralne opruge, φ_u najveći kut uvijanja opruge, φ trenutni kut uvijanja opruge, I_s dinamički moment inercije zamašnjaka, $\omega = d\varphi/dt$ trenutna kutna brzina zamašnjaka, koja je ovisna o trenutnom kutu uvijanja:

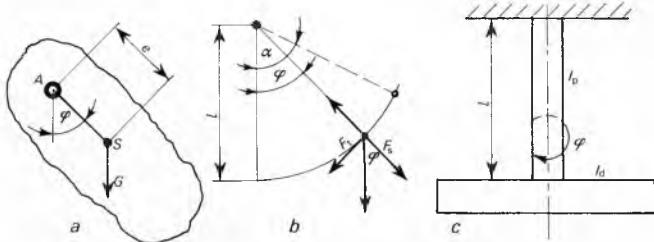
$$\omega = \sqrt{\frac{c(\varphi_u - \varphi)}{I_s}}. \quad (35)$$

Gibanje nemirnice je oscilatorno gibanje. Perioda jednog titraja dana je izrazom

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I_s}{c}}. \quad (36)$$

Nemirnice se primjenjuju u satnim mehanizmima.

Njihalo. Fizikalnim njihalom (sl. 42 a) smatra se svako o horizontalnu osovinu (ovjesište A) ovješeno tijelo kojemu se



Sl. 42. Njihala. a Fizikalno, b matematičko, c torzijsko njihalo

težište nalazi ispod te točke. Izvede li se takvo tijelo iz ravnotežnog položaja i time prenese na njega određena potencijalna energija, ono se, pošto se ispusti, pod utjecajem sile teže nije (klati se) oko svog ravnotežnog položaja. Pri tome se naizmjence potencijalna energija primljena u toku njihanja pretvara u kinetičku energiju, a ta opet u potencijalnu. Njihalo djeluje, dakle, kao pretvarač energije. Vrijeme potrebno da njihalo izvede jedan puni titraj, tj. vrijeme od polaska iz početnog graničnog položaja i povratka u nj, zove se perioda titraja T .

Da bi se olakšao proračun njihala, primjenjuje se zakon tzv. matematičkog njihala (sl. 42 b). To je zamišljeno njihalo kojemu je cijela masa koncentrirana u jednoj materijalnoj točki ovješenoj o ovjesište bestezinskim i nerasterzljivom niti duljine l . Na tu materijalnu točku djeluje sila teža $G = mg$. Ta se sila može rasštaviti na komponentu $F_t = mg \sin \varphi$, koja zateže ovjesnu nit i tangencijalnu komponentu $F_r = mg \cos \varphi$. Moment koji zakreće materijalnu točku iznosi $M = l F_t = l m g \sin \varphi$. Zakretni moment općenito je jednak $M = \ddot{\varphi} I$, gdje je $\ddot{\varphi}$ kutno ubrzanje a I moment inercije koji za matematičko njihalo iznosi $I = ml^2$. Iz tih se izraza dobije da je $\ddot{\varphi} ml^2 = l m g \sin \varphi$, pa jednadžba gibanja matematičkog njihala glasi

$$\ddot{\varphi} = \frac{g}{l} \sin \varphi, \quad (37)$$

gdje je φ trenutni kut otklona.

Perioda titraja matematičkog njihala dana je izrazom:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \left[1 + \left(\frac{1}{2} \right)^2 \sin^2 \frac{a}{2} + \left(\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4} \right)^2 \sin^4 \frac{a}{2} + \dots \right], \quad (38)$$

gdje je a najveći kut otklona (amplituda titraja).

Dobru aproksimaciju perioda titraja daje jednadžba:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \left(1 + \frac{1}{16} a^2 \right). \quad (39)$$

Za male amplitude titraja $a < 8^\circ$, perioda titraja računa se prema jednadžbi

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (40)$$

Perioda titraja fizikalnog njihala dana je za male amplitude titraja izrazom

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I_A}{G e}} = 2\pi \sqrt{\frac{l_0}{g}}, \quad (41)$$

gdje je I_A dinamički moment inercije fizikalnog njihala s obzirom na os kroz točku A (v. sl. 42), $G = mg$ težina njihala, m masa njihala, g akceleracija, e udaljenost težišta S njihala od okretišta A , $l_0 = I_A/m e$ reducirana duljina fizikalnog njihala, tj. duljina matematičkog njihala koje ima istu periodu titraja kao što ga ima fizikalno njihalo.

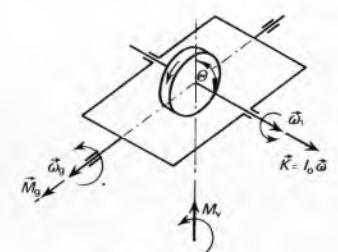
Za razliku od matematičkog i fizikalnog njihala, koja se gibaju u vertikalnoj ravnini uslijed težine, torzijsko njihalo (sl. 42 c) giba se u horizontalnoj ravnini uslijed unutarnjih sila elastične deformacije torzijskih niti. Perioda titraja torzijske niti dana je izrazom

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I_D l}{G I_p}}, \quad (42)$$

gdje je I_D dinamički moment inercije ploče njihala, l duljina torzijske niti, G modul smika torzijske niti, I_p polarni moment inercije torzijske niti.

Njihala služe za mjerjenje vremena, ubrzanja i za utvrđivanje potresa.

Giroskop (zvuk, sl. 43) je kruto rotacijsko tijelo s masama jednolikom raspoređenim oko rotacijske osi. Giroskopi rotiraju velikom brzinom vrtnje ($3000 \dots 60000 \text{ min}^{-1}$). Težište giroskopa leži u osi vrtnje. Tzv. slobodan zvuk s tri stupnja slobode ovješen je s pomoću dva koncentrična kardanska prste na tako da njegova osovina može zauzeti bilo koji smjer u prostoru. Ako je moment inercije s obzirom na os vrtnje I_D i ako se zvuk okreće kutnom brzinom ω_1 , onda njegov kinetički moment (zamah, moment količine gibanja) prema (32) iznosi $K = I_D \omega_1$. Slobodan zvuk s velikom brzinom vrtnje ima tendenciju da zadrži



Sl. 43. Giroskop

svoj položaj s obzirom na svemir. Takvi se zvrkovi primjenjuju u praksi kao držači smjera.

Ako na osovinu slobodnog zvrka djeluje vanjski spreg sila (moment M_v), zvrk na to djelovanje reagira skretanjem svoje osovine (*precesijom*) kutnom brzinom ω_g (gdje je $\omega_g \ll \omega_1$) i momentom M_g koji djeluje u smjeru pomaknutom u smjeru rotacije zvrka za 90° od smjera djelovanja vanjskog sprega sila. Ta se pojava zove giroskopski efekt. To djelovanje traje samo dok postoji vanjski spreg sila. Čim taj prestane djelovati, zvrk zadržava svoj novi položaj i ne vraća se u svoj raniji položaj. Ako vanjski spreg sila ne prestane djelovati, osovinu se zvrka polagano okreće kutnom brzinom ω_g sve dok se smjer kutne brzine ω_1 ne poklopi sa smjerom momenta M_v . Ta se pojava iskoristiava, npr. kod girokompasa u kojima kao vanjski spreg sila nastupa sila teže, pa ti zvrkovi imaju samo dva stupnja slobode. Moment giroskopskog efekta M_g približno je dan izrazom (v. sl. 43)

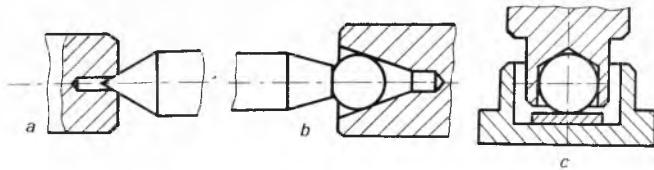
$$\vec{M}_g = \vec{K} \times \vec{\omega}_2; \quad M_v = I_D \omega_1 \omega_g \sin \Theta; \quad \omega_g = \frac{M_v}{K \sin \Theta}.$$

Oslonci

Oslonci su elementi strojeva koji u mehanizmima omogućuju pomicanje pojedinih dijelova jednih u odnosu prema drugima. Njihova konstrukcija ovisi o načinu pomicanja za koje oni služe. U oslonce se ubrajaju: osovine, vratila i ležajevi za kontinuiranu rotaciju; nadalje elastične niti, prizme za njihanje i vodilice za povratno pravocrtno gibanje. U tabl. 6 dan je pregled glavnih vrsta oslonaca.

Osovine i vratila. Osovine su elementi strojeva koji miruju ili rotiraju oko svoje uzdužne osi. Vanjske sile naprežu osovine samo na savijanje. Vratila, pak, jesu elementi koji redovno rotiraju oko svoje uzdužne osi, a napregnuti su osim na savijanje, i na torziju. Osovine i vratila oslanjaju se na ležajeve.

Klizni ležajevi omogućavaju kontinuiranu rotaciju vratila i osovine, pri čemu između ležaja i čepa dolazi do trenja klizanja. Čep je dio osovine ili vratila koji ulazi u ležaj. Prema smjerovima u kojima djeluje reakcija ležajeva oni mogu biti radikalni, aksijalni i radikalno-aksijalni. U finoj mehanici se pretežno primjenjuju radikalni i radikalno-aksijalni ležajevi (sl. 44). Čepovi za klizne



Sl. 44. Klizni radikalno-aksijalni ležajevi. a Konični, b i c kuglasti

ležajevi mogu biti cilindrični (v. tabl. 6 pri dnu), konični (sl. 44 a) i kuglasti (sl. 44 b i c). Konični čepovi omogućavaju regulaciju radikalne zračnosti, a kuglasti čepovi omogućavaju zakretanje vratila u ravnini okomitoj na ravninu rotacije. Dobar klizni ležaj mora imati što manji moment trenja na čepu. Moment trenja na čepu može se smanjiti na dva načina: smanjivanjem trenja ili smanjivanjem radijusa trenja. Trenje se smanjuje podmazivanjem i izborom materijala s malim koeficijentom trenja. Radijus trenja se smanjuje smanjenjem promjera čepa ili na koji drugi način, kao npr. dodirom čepa i ležaja u točki koja leži na osi vrtnje (sl. 44 c).

Šiljasti ležajevi (ležajevi za šiljaste čepove) klizni su ležajevi s izrazito malim radijusima trenja, tabl. 6. Kako se u šiljastim ležajevima ostvaruje dodir između ležaja i čepa teoretski samo u jednoj točki, tlak je na površinu ležaja i pored malih sila vrlo visok. Zato se šiljci izrađuju od čelika legiranih s 1% Cr i 1% W zakaljenih na 60 HRC (tvrdće po Rockwellovoj skali). Ležajevi se izrađuju od safira, legura bakra i berilijuma, legure nikla i berilijuma ili legure nikla, titana i berilijuma. U svakom slučaju, materijal ležaja treba da je tvrdi od materijala šiljka. Dopuseni maksimalni kontaktni tlak za nabrojene materijale iznosi $p_{\max \text{ dop}} = 3 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$. Pri tom tlaku koeficijent trenja iznosi $\mu = 0,12$. Dodirne su plohe ležaja i šiljka kuglaste. Uobičajeni su odnosi radijusa zakrivenosti (sl. 45) $r_2/r_1 = 2 \dots 5$. Za radijus šiljka

Tablica 6
OSLONCI

Vrsta	Prikaz
Za rotaciono gibanje	Klizni ležaj
	Šiljasti ležaji
	Zivin ležaj
	Zračni ležaj
	Magnetski ležaj
	Valjni ležaj
	Elastične niti
	Prizme
	Klizna vodilica
	Valjne vodilice
Za djelostičnu rotaciju	Elastične vodilice
	Osovine i vratila s čepovima

uzima se $r_1 = 0,01 \dots 0,2$ mm. Promjer cilindričnog dijela šiljka iznosi $d = 0,25 \dots 1$ mm. Šiljasti ležajevi upotrebljavaju se kako za vertikalne tako i za horizontalne osovine. Točnost centriranja je umanjena jer se mora predvidjeti aksijalna zračnost z da bi se spriječilo zaklinjavanje uslijed promjene temperature. Za horizontalne osovine uzima se aksijalna zračnost $z = 0,25 r_2$, a za vertikalne osovine $z = 0,02 \dots 0,03$ mm. Za približni proračun karakterističnih veličina šiljastih ležajeva primjenjuju se iz H. R. Hertzovih jednadžbi izvedene jednadžbe. Za aksijalno opterećene šiljaste ležajeve iznosi maksimalni kontaktni tlak (na dodirnoj površini):

$$p_{\max} = \left[0,25 A \left(\frac{1/r_1 - 1/r_2}{1/E_1 + 1/E_2} \right)^2 \right]^{1/3}, \quad (44)$$

moment trenja

$$M_t = \frac{3}{16} \pi \mu A a, \quad (45)$$

polumjer kontaktne površine (po Hertzu)

$$a = \left(0,628 A \frac{1/E_1 + 1/E_2}{1/r_1 + 1/r_2} \right)^{1/3}, \quad (46)$$

a za horizontalno opterećene šiljaste ležajeve iznosi maksimalni kontaktni tlak

$$p_{\max} = \left[0,235 N \left(\frac{1/r_1 - 1/r_2}{1/E_1 + 1/E_2} \right)^2 \right]^{1/3}, \quad (47)$$

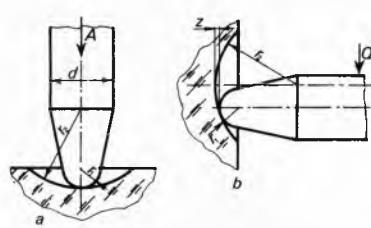
moment trenja

$$M_t \approx r_1 Q \mu, \quad (48)$$

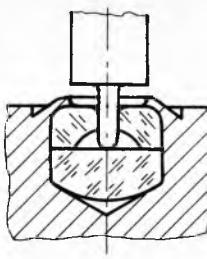
normalna sila na mjestu kontakta

$$N = \frac{Q(r_2 - r_1)}{\sqrt{z[2(r_2 - r_1) - z]}}. \quad (49)$$

U izrazima (44)...(49) jesu: N normalna sila na mjestu kontakta, A aksijalna sila, Q poprečna sila, $E_{1,2}$ moduli elastičnosti šiljka 1 i ležaja 2, $r_{1,2}$ radijusi kolata šiljka 1 i ležaja 2, μ koeficijent trenja, z aksijalna zračnost te a polumjer kontaktne površine.



Sl. 45. Šiljasti ležajevi. a) Uzdužno opterećen, b) poprečno opterećen ležaj

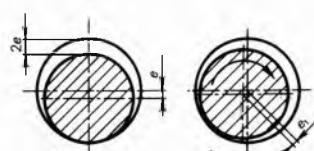


Sl. 46. Radijalno-aksijalni šiljasti ležaj

Kad istovremeno djeluju i aksijalne i radijalne sile, kad je potrebno bolje centriranje, primjenjuju se šiljasti ležajevi prema sl. 46.

Živin ležaj (v. tabl. 6) također je klizni ležaj. Kontakt između ležaja i čepa ostvaruje se na torusnoj površini žive, pa je trenje vrlo malo. Torusna površina žive nastaje uslijed površinskog napona i sila kohezije. Trenje s vremenom raste zbog starenja žive. Primjenom više koncentričnih prstenova žive može se povećati nosivost ležaja.

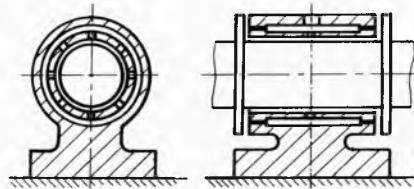
Zračni ležajevi (v. tabl. 6) također su klizni ležajevi s vrlo malim trenjem. U zračnim ležajevima između dodirnih površina čepa i ležaja nalazi se sloj zraka debljine 5...20 μm. Prema načinu nastajanja sloja zraka, razlikuju se aerodinamički i aerostatski zračni ležajevi. Princip rada aerodinamičkog ležaja može se objasniti s pomoću sl. 47. Za vrijeme mirovanja čep se oslanja na donji dio ležaja. Za vrijeme vrtnje čep trenjem uvlači zrak iz atmosfere u kli-



Sl. 47. Princip rada aerodinamičkog ležaja. a) Mirovanje, b) gibanje

nasti prostor između čepa i ležaja. Tlak zraka raste i nakon izvjesnog vremena, pri dovoljnoj brzini vrtnje, on odvoji čep od ležaja (sl. 44 b). Nosivost aerodinamičkih ležajeva je mala, iznosi do $0,7 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ površine projekcije ležaja.

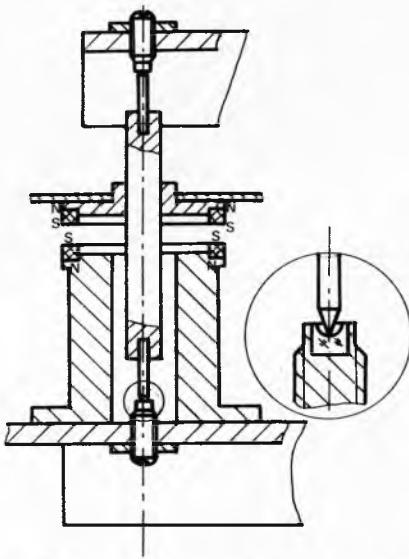
U aerostatske ležajeve (sl. 48) dovodi se zrak stlačen na $0,5 \dots 8 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$. Zato je nosivost tih ležajeva do $3,5 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$.



Sl. 48. Aerostatski ležaj

U praksi se i u aerodinamičke ležajeve za vrijeme pokretanja i zaustavljanja također dovodi stlačeni zrak. Stlačeni zrak dovodi se dok je god brzina vrtnje manja od $500 \dots 600 \text{ min}^{-1}$, jer je pri toj brzini vrtnje tlak zraka u klinastom međuprostoru premašen da bi mogao odvojiti čep od ležaja. Zračni ležajevi primjenjuju se za velike brzine vrtnje, npr. za giroskope $60\,000 \text{ min}^{-1}$.

Magnetski ležaj (v. tabl. 6). Rad magnetskog ležaja je zasnovan na uzajamnom djelovanju dvaju magneta, od kojih je jedan učvršćen na osovini, a drugi na ležaju. Trenje u magnetskim ležajevima je vrlo malo jer su normalne sile u ležaju male. Magnetski ležajevi kombiniraju se s nekom drugom vrstom ležajeva, koji održavaju centričnost. Na sl. 49 predviđena je kombinacija



Sl. 49. Kombinacija magnetskog i šiljastog ležaja

magnetskog ležaja sa šiljastim ležajevima. Osnovna je mana magnetskih ležajeva što su skupi.

Valjni ležajevi. U valjnim ležajevima javlja se trenje valjanja. Trenje valjanja manje je od trenja klizanja, pa je u tome osnovna prednost valjnih ležajeva. Tu prednost donekle umanjuje činjenica da su radijusi trenja znatno veći pa moment trenja valjnih ležajeva ne mora uvek biti manji od momenta trenja kliznih ležajeva. Navedeno se odnosi naročito na valjne ležajevе normalnih dimenzija kakvi se upotrebljavaju u strojogradnji. Zato u finoj mehanici imaju prednost minijaturni valjni ležajevi. Valjni ležaj (sl. 50) sastoji se od unutarnjeg prstena koji se natiče na čep, vanjskog prstena koji dosjeda u kućištu i valjnih tijela koja se nalaze među prstenovima. Ležajevi manjih dimenzija izraduju se bez unutarnjeg prstena pa u tom slučaju valjna tijela dosjedu direktno na čep (sl. 51). Valjna tijela su kuglice ili valjci. U finoj mehanici rjeđi su ležajevi s koničnim ili bačvastim valjnim tijelima. Najmanje dimenzije minijaturnih kugličnih ležajeva s unutarnjim prstenom jesu: $d = 1 \text{ mm}$, $b = 1 \text{ mm}$ i $D = 3 \text{ mm}$

(v. sl. 50). Najmanje dimenzije kugličnog ležaja bez unutarnjeg prstena jesu: $d = 0,32 \text{ mm}$, $D = 1,8 \text{ mm}$, $b = 0,75 \text{ mm}$. Takođe ležaj pri aksijalnoj sili od $0,1 \text{ kp}$ ima moment trenja $M_T = 0,005 \text{ p mm}$.

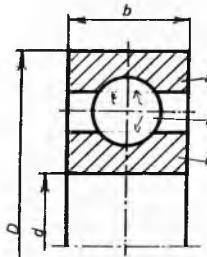
Minijaturni valjni ležajevi nisu još standardizirani. Približna vrijednost momenta trenja može se izračunati prema izrazu:

$$M_T = (\mu_1 Q + \mu_2 A) \frac{d}{2}, \quad (50)$$

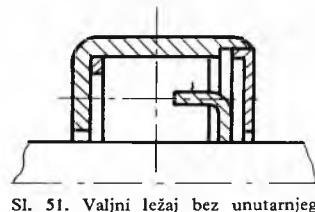
gdje je μ_1 reducirani koeficijent trenja za radikalnu reakciju Q , μ_2 reducirani koeficijent trenja za aksijalnu reakciju A , d promjer čepa.

Za radikalne kuglične ležajeve (v. sl. 50) je $\mu_1 = 0,002$, a $\mu_2 = 0,004$; za radikalno-aksijalne kuglične ležajeve (v. tabl. 6) $\mu_1 = 0,003$, a $\mu_2 = 0,005$. Radni vijek L standardiziranih ležajeva procjenjuje se na način koji je uobičajen u strojogradnji:

$$L = \left(\frac{C}{F} \right)^p, \quad (51)$$



Sl. 50. Valjni kuglični ležaj. a Vanjski prsten, b valjno tijelo, c unutarnji prsten



Sl. 51. Valjni ležaj bez unutarnjeg prstena

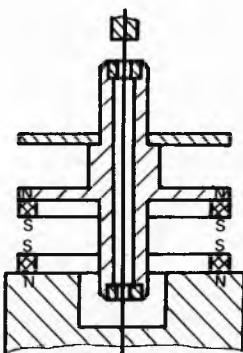
gdje je C dinamička nosivost ležaja, tj. opterećenje pri kojem ležaj izdrži 10^6 okretaja, a koji podatak daje proizvodač u katalogu, F ekvivalentna sila koja djeluje na ležaj, $p = 3$ za kuglične ležajeve, a $p = 10/3$ za sve ostale ležajeve. Ekvivalentna sila F izračunava se prema izrazu:

$$F = xQ + yA, \quad (52)$$

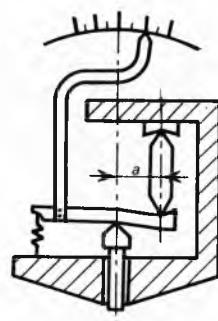
gdje su Q i A poprečna, odnosno aksijalna reakcija, x i y faktori prema katalogu proizvodača.

Elastični elementi (tabl. 6), kao što su elastične niti, žice, trake i sl., spajaju nepomičan i pomičan dio, omogućavajući svojom elastičnom deformacijom pomak pomičnog dijela. Gibanje pomičnog dijela je ograničeno. On se može njihati oko nekog ravnotežnog srednjeg položaja. Prema vrsti deformacije razlikuju se fleksijski i torzijski elastični elementi. Elastični elementi obično se kombiniraju s nekom drugom vrstom ležajeva. Na sl. 52 prikazana je kombinacija elastičnog elementa i magnetskog ležaja. Elastični elementi osiguravaju pri malim pomacima visoku točnost položaja pomičnog dijela. Oni mogu biti cilindrični s promjerom $1\cdots 100 \mu\text{m}$ ili pravokutni debljine $5\cdots 50 \mu\text{m}$ i širine $50\cdots 400 \mu\text{m}$.

Prizme su oslonci koji omogućavaju njihanje pomičnog dijela oko ravnotežnog srednjeg položaja. Sastoje se od nepomičnog



Sl. 52. Elastična nit kombinirana s magnetskim ležajem



Sl. 53. Primjena prizmatičkih oslonaca

koritastog dijela i nožastog pomičnog dijela (v. tabl. 6). Između nepomičnog i pomičnog dijela javlja se malo trenje valjanja. Prizme se odlikuju izvanredno malim momentima trenja. Primjenjuju se u vagama i mjernim instrumentima (sl. 53).

Vodilice. *Klizne vodilice* (v. tabl. 6) omogućavaju pravocrtno pomicanje pomičnog dijela. Između pomičnog i nepomičnog dijela djeluje trenje klizanja. Klizne vodilice primjenjuju se kad veličina trenja nema većeg značenja ili kada trenje treba da drži pomičan dio na danom mjestu.

Valjne vodilice (v. tabl. 6) također omogućavaju pravocrtno pomicanje pomičnog dijela. Kontakt između pomičnog i nepomičnog dijela ostvaruje se posredno pomoću kuglica, valjaka ili kotačića, pa se prilikom gibanja javlja trenje valjanja. Zbog toga valjne vodilice pružaju manji otpor gibanju.

Elastične vodilice pravocrtnog gibanja (v. tabl. 6) omogućavaju aksijalni pomak svojom elastičnom deformacijom. Primjenjuju se za manje pomake koji moraju biti proporcionalni aksijalnoj sili.

Prigoni

Prigoni (prijenosnici, prijenosni mehanizmi) služe za pretvaranje (transformaciju) gibanja (npr. kružnog u translatorno, za promjenu vrtnje i sl.). Prigoni se sastoje od više članova (strojnih elemenata ili grupa strojnih elemenata), koji mogu biti vrlo različiti: mogu biti zupčanici, poluge, ležajevi i drugo. Mehanička se energija privodi prigonu putem tzv. *pogonskog elementa* a izlazi iz njega i prelazi zatim transformirana na druge uređaje preko tzv. *gonjenog elementa*. Osim tih članova može se u prigonu nalaziti još i određen broj drugih, tzv. posrednih elemenata. Prigoni bave se teorijom mehanizama. Do prigona se dolazi na taj način što se u tzv. zatvorenom kinematičkom lancu (u sklopu s više međusobno u lanac spojenih pokretnih članova) jedan od članova fiksira, a jednou povjeri ulogu pogonskog elementa.

Prema tome u svakom je prigonu jedan od članova nepomičan i fiksiran, npr. držać ili kućište s ležajevima. Svaki par članova, koji se relativno kreću jedan u odnosu prema drugom, spojeni su dodirnim ploham, tzv. kinematičkim parom. Te se dodirne plohe jedna od druge razlikuju po tome kakvo kretanje dozvoljavaju (npr. translatorno pomicanje, okretanje i sl.) i po tome kakve su im dodirne plohe (točkasti, linjski ili plošni dodir).

Članovi prigona ili cijeli njegov mehanizam mogu imati različit broj stupnjeva slobode. Stupanj slobode pojedinog člana ili cijelog mehanizma prigona ocjenjuje se tako da se prigon postavi u ishodište pravokutnog prostornog koordinatnog sustava i posmatra mogućnosti njegova kretanja s obzirom na osi x , y i z . Jedan stupanj slobode ima član koji se može samo translatorno kretati duž jedne osi ili vrtjeti se oko nje. Šest stupnjeva slobode ima tijelo koje se može u prostoru translatorno pomicati u bilo kojem smjeru (3 stupnja slobode) i okretati se u prostoru u bilo kojoj ravnini (3 stupnja slobode).

Za prijenos kretanja s jednog člana na drugi primjenjuju se sile tlaka, trenja ili vlasta (kod vučnih elemenata). Prigoni se dijele na osnovne i složene. Osnovni prigoni sadrže samo članove koji su osnovni elementi i imaju svega jedan ili dva stupnja slobode. Složeni prigoni su sklopovi od više elemenata s više od dva stupnja slobode. Prigoni karakteriziraju dva odnosa: prijenosni broj i funkcija položaja.

Prijenosni broj je pri rotacijskom gibanju jednak omjeru kutne brzine ω_1 pogonskog elementa i kutne brzine ω_2 gonjenog elementa

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2}. \quad (53)$$

Za prigone u kojima se elementi kreću translatorno, prijenosni se broj definira na analogan način.

Funkcija položaja općenito se definira izrazom:

$$\varphi_2 = f_{21}[\varphi_1(t)], \quad (54)$$

gdje su: φ_1 i φ_2 pomaci pogonskog, odnosno gonjenog elementa, a t vrijeme.

Prigoni se dijele na prigone s konstantnim prijenosnim brojem i na prigone s promjenljivim prijenosnim brojem. U prigone s $i = \text{konst.}$ idu tarni, zupčanički i vijčani prigoni, kao i neki prigoni s gipkom niti, kao npr. remenski prigoni. U prigone s promjenljivim prijenosnim brojem ($i \neq \text{konst.}$) ubraju se neki zupčanički prigoni, kao što su prigoni s eliptičnim zupčanicima, većina polužnih prigona i grebenasti prigoni.

Kutna brzina definirana je općenito izrazom:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt}. \quad (55)$$

Prema (54) i (55) slijedi:

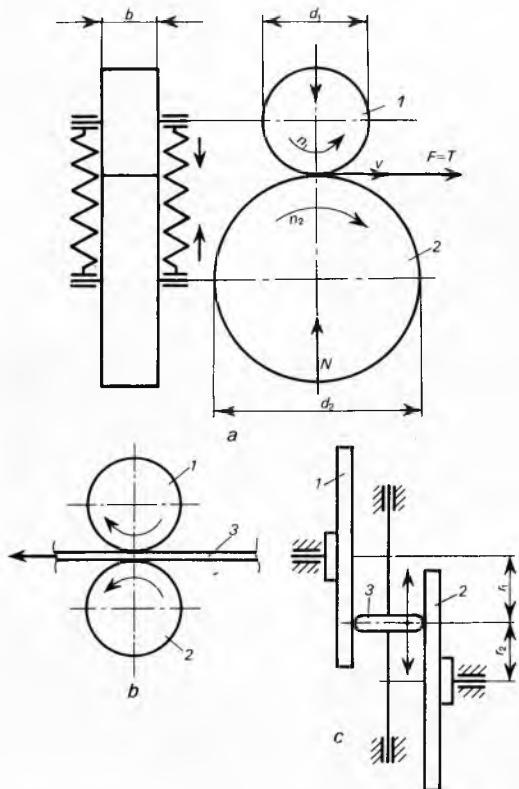
$$\omega_2 = \frac{d\varphi_2}{dt} = \frac{d\varphi_2}{d\varphi_1} \cdot \frac{d\varphi_1}{dt} = f'_{21} \omega_1. \quad (56)$$

Iz (56) proizlazi:

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{1}{f'_{21}}. \quad (57)$$

Izraz (57) daje međusobnu zavisnost između prijenosnog broja i funkcije položaja. U finoj mehanici primjenjuju se tarni, zupčanički, vijčani i polužni prigoni, kao i prigoni s gipkom niti i grebenasti prigoni.

Tarni prigoni (tarni ili frikcijski prijenos) služi za pretvaranje (transformaciju) rotacijskog gibanja pogonske tarenice 1 u izmijenjeno rotacijsko gibanje gonjene tarenice 2 (sl. 55 a i c) ili u translatorno gibanje posrednog elementa 3 (sl. 55 b). Snaga



Sl. 55. Tarni prigoni. a) Neposredni cilindrični, b) posredni cilindrični, c) posredni tanjurasti prigoni

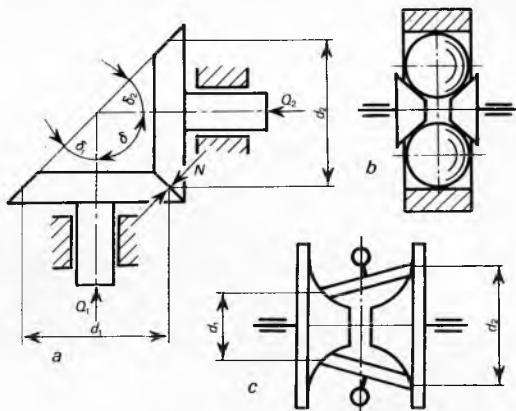
se prenosi u tarnom prigonu neposrednim dodirom tarenica, a pogonska sila gonjene tarenice je trenje. Detaljni podaci o tarnim prigonima mogu se naći u poglavljju: *Tarni prijenosi* članka *Elementi strojeva*, str. 281.

Sila trenja T_2 (sl. 55 a) jednaka je obodnoj sili F na pogonskoj tarenici. Da između tarenica ne bi došlo do proklizavanja, mora biti ispunjen uvjet $N > F/\mu$, odnosno:

$$\frac{\mu N}{F} = S = 1,4 \dots 2, \quad (58)$$

gdje je μ koeficijent trenja, N normalna sila između tarenica i S faktor sigurnosti.

Tarni prigoni bez posrednog elementa (sl. 55 a) imaju stalni prijenosni broj, a tarni prigoni s posrednim elementom obično imaju mogućnost promjene prijenosnog broja (sl. 55 c). Tarni prigoni s promjenljivim prijenosnim brojem zovu se *varijatori*. Tarenice su rotacijska tijela. Najčešći su oblici tarenica, valjak, stožac, kugla i globoid (sl. 56).



Sl. 56. Oblici tarenica. a) Konične tarenice, b) kuglaste tarenice, c) globoidne tarenice

Prijenosni broj tarnog prigona izvodi se iz uvjeta jednakosti obodnih brzina, dakle za slučaj kada između tarenica nema proklizavanja. Prema sl. 55 a slijedi:

$$v_1 = d_1 \pi n_1 = d_2 \pi n_2 = v_2,$$

pa je prijenosni broj

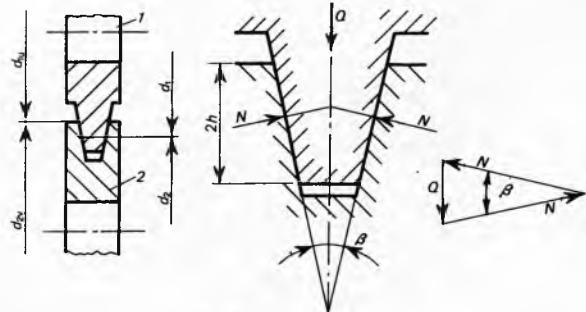
$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1} = \frac{\omega_1}{\omega_2}. \quad (59)$$

U izrazu (59) n_1 i n_2 su brzine vrtnje pogonske, odnosno gonjene tarenice, d_1 i d_2 promjeri pogonske, odnosno gonjene tarenice, ω_1 i ω_2 kutne brzine pogonske, odnosno gonjene tarenice. Prijenosni su brojevi izvedenih finomehaničkih tarnih prigona u granicama $i = 7 \dots 15$ (maks. 25).

U stvari, između tarenica ipak dolazi do proklizavanja zbog elastičnih deformacija u zoni kontakta tarenica i zbog geometrijskih uvjeta.

Proklizavanje uslijed elastičnih deformacija ovisi o opterećenju tarenica i materijalu od kojeg su izradene. Pri uobičajenim kontaktnim naprezanjima brzina proklizavanja uslijed elastičnih deformacija iznosi za tarenice od sivog lijeva ili čelika $\sim 1,5\%$ obodne brzine, a za kombinaciju tarenica s tekstolitnim i čeličnim obodom $\sim 3\%$ obodne brzine.

Pojava proklizavanja uslijed geometrijskih uvjeta može se objasniti na žlebastim i klinastim tarenicama (sl. 57). Ako su



Sl. 57. Žlebaste tarenice

na promjerima d_1 i d_2 obodne brzine $v_1 = v_2$, onda na promjerima d_{1u} i d_{2v} mora biti $v_{1u} < v_{2v}$, pa se na tim promjerima javlja brzina klizanja

$$v_{k1} = v_{2v} - v_{1u} \approx v_1 \frac{h}{2d_1} \left(1 + \frac{1}{i}\right).$$

U određenim situacijama može se primjena žljebastih tarenica i pored štetnog proklizavanja opravdati malom radikalnom silom Q , dakle malim opterećenjem vratila i ležajeva prigona.

Proklizavanje se uzima u obzir faktorom proklizavanja ψ koji u ovisnosti o opterećenju, obliku i materijalu tarenica poprima vrijednosti $\psi = 0,8 \dots 0,95$. Stvarna brzina vrtnje n_{2s} gonjene tarenice dana je izrazom:

$$n_{2s} = \frac{n_1}{i} \cdot \psi. \quad (60)$$

Proklizavanje smanjuje stupanj djelovanja tarnog prigona i izaziva zagrijavanje tarenica. Stupnjevi djelovanja racionalno građenih tarnih prigona leže u granicama $\eta = 0,75 \dots 0,97$.

Kako brzina klizanja raste s porastom obodne brzine, obodna brzina ne treba da je veća od 25 m/s. Pri obodnim brzinama većim od 10 m/s preporuča se primjena zakaljenih i brušenih čeličnih tarenica podmazivanih uljem jer se time smanjuju gubici zbog proklizavanja i zagrijavanja. Nedostatak je takvih prigona potreba za velikom normalnom silom N .

Način mijenjanja prijenosnog broja vidljiv je na sl. 55 c. Premještanjem međutarenice 3 mijenjaju se radijusi r_1 i r_2 , a time i prijenosni broj $i = r_2/r_1$. Granične vrijednosti prijenosnih brojeva jesu:

$$i_{\max} = r_{2\max}/r_{1\min}; \quad i_{\min} = r_{2\min}/r_{1\max}. \quad (61)$$

Omjer maksimalne i minimalne brzine vrtnje gonjene tarenice, koji se zove *područje regulacije* iznosi:

$$\frac{n_{2\max}}{n_{2\min}} = \frac{i_{\max}}{i_{\min}} = 4 \dots 9. \quad (62)$$

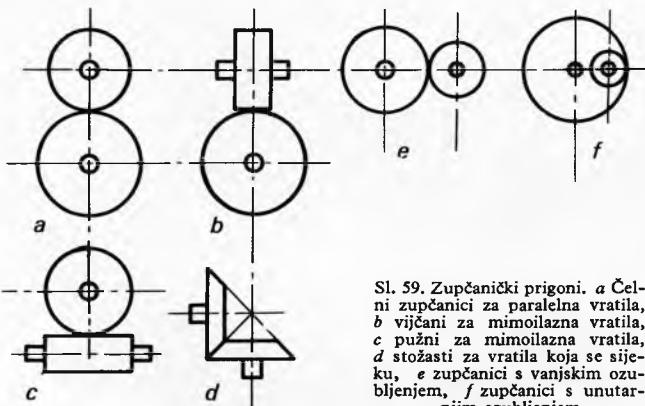
Na sl. 58 prikazan je tarni varijator koji se može primijeniti kao računski prigon. Ako nema proklizavanja ili je ono zanemarljivo, obodna je brzina $\omega_2 r_2 = \omega_1 r_1$. Uzme li se da $\omega_1 \hat{=} x$, $r_1 \hat{=} y$, a $\omega_2 r_2 \hat{=} z$, onda je $z = xy$, pa je očigledno da se s pomoću varijatora, prema sl. 58, može množiti. S pomoću opisanog varijatora može se i integrirati. Naime iz jednakosti obodnih brzina $\omega_2 r_2 = \omega_1 r_1$ i izraza (55) dobije se:

$$r_2 d\varphi_2 = \omega_1 r_1 dt$$

i odavde

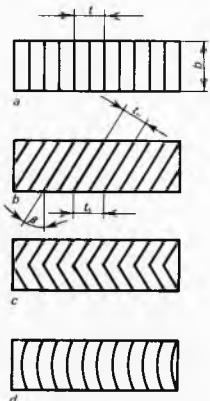
$$\varphi_2(r_2/\omega_1) = \int r_1 dt,$$

pa se uz $\varphi_2(r_2/\omega_1) \hat{=} y_1 r_1 \hat{=} x(t)$ može napisati $y = x(t) dt$, što dokazuje da se navedenim varijatorom može i integrirati.

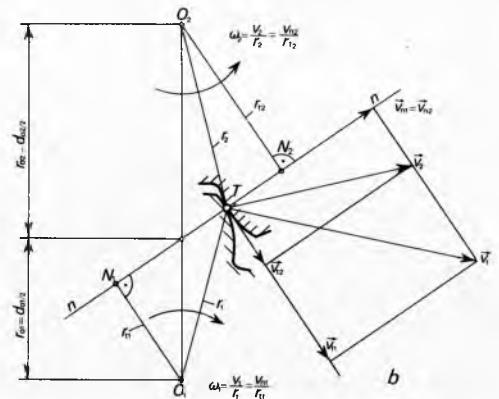
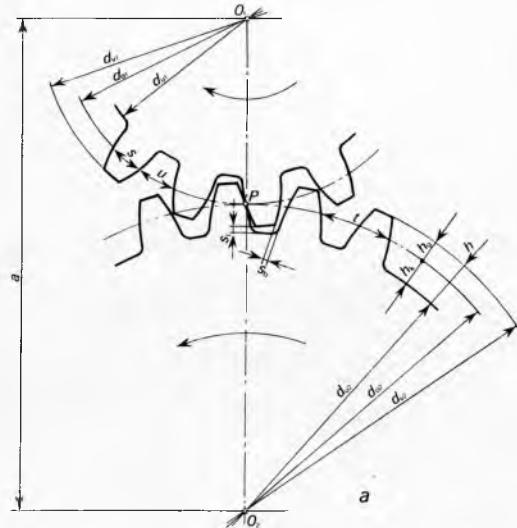


Sl. 59. Zupčanički prigoni. a Čeljni zupčanici za paralelna vratila, b vijčani za mimoilaznu vratila, c pužni za mimoilaznu vratila, d stožasti za vratila koja se sijeku, e zupčanici sa vanjskim ozubljenjem, f zupčanici s unutarnjim ozubljenjem

Zupčanički prigoni (zupčani prijenosi) moguću transformaciju rotacije pogonskog zupčanika u rotaciju gonjenog zupčanika ili u translaciju ozubljene letve i obrnuto. Međusobni položaj vratila predodreduje oblik zupčanika. Za paralelna vratila primjenjuju se čelni (čeoni zupčanici, sl. 59 a) s vanjskim ozubljenjem (sl. 59 e) ili s unutarnjim ozubljenjem (sl. 59 f). Za mimoilaznu vratila mogu se upotrijebiti bilo vijčani zupčenici (sl. 59 b), bilo pužni prigon (sl. 59 c). Ako se osi dvaju vratila sijeku, primjenjuju se stožni (stožasti zupčanici, sl. 59 d). Prema obliku uzdužne linije boka zuba, zubi zupčanika mogu biti ravni, kosi, strelasti ili lučni (sl. 60). Proklizavanje na dodirnim kružnicama tarenice sprečava se u tarnim prigonima silom trenja, proklizavanje među zupčanicima sprečava se oblikom, tj. međusobnim zahvatom zuba. Pri tome i na zupčanicima postoji par kružnica na kojima su



Sl. 60. Oblici uzdužnih linija boka zuba, a Ravn zubi, b Kosi zubi, c Strelasti zubi, d Lučni zubi



Sl. 61. Geometrijske izmire i izbor profila zuba. a Izmjere zupčanika: d_0 diobeni promjer, h_g visina glave zuba, h_k visina korijena zuba, d_v tjemni promjer, d_u podnožni promjer, t korak na diobenoj kružnici, s debljina zuba na diobenoj kružnici, u širina uzubine na diobenoj kružnici, s_i tjemena zračnost, s_b bočna zračnost, a razmak osi, h visina zuba. b Izbor profila zuba

obodne brzine na oba zupčanika jednake. Po analogiji s tarenicama one se zovu *dodirne kružnice*. Prema dodirnim kružnicama izvodi se prijenosni broj zupčaničkog prigona na isti način kao i kod tarenica. S obzirom na značenje dodirnih kružnica, njima je dodijeljena i uloga *diobenih kružnica* (d_{01}, d_{02} , sl. 61 a), tj. kružnicâ na kojima se

određuje razmak među zubima. Treba, međutim, naglasiti da se dodirne i diobene kružnice ne poklapaju uvijek. Tako, npr., ako se već postojećim zupčanicima promijeni razmak osi a (sl. 61 a), formirat će se novi par dodirnih kružnica, koji se neće poklapati s prvobitnim diobenim kružnicama. Razmak između dva susjedna zuba mјeren po diobenoj kružnici zove se korak zuba t . Broj koraka jednak je broju zubâ z , stoga da bi se dobio cijelobrojni broj zubâ, mora biti ispunjen uvjet: $d_0\pi = zt$. Diobeni promjer prema tome iznosi:

$$d_0 = \frac{t}{\pi} z = mz, \quad (63)$$

gdje je m , tzv. modul koji se izražava u mm kao i d_0 i t .

Veličine modula koji se primjenjuju u strojogradnji standardizirane su (od 0,3 mm pa naviše). U finoj se mechanici primjenjuju i manji moduli, i to: 0,08...0,1 mm s porastom po 0,0025 mm; 0,1...0,20 mm s porastom po 0,005 mm; 0,20...0,30 mm s porastom po 0,01 mm i 0,30...0,50 mm s porastom po 0,02 mm. Modul i broj zubâ su polazne veličine s pomoću kojih se definiraju sve ostale geometrijske izmjere zupčanika (v. sl. 61 a), koje su uz sve ostalo što treba znati o zupčanicima opširno obradene u poglavljiju *Zupčani prijenosi* članka *Elementi strojeva*, str. 285. Razlike između finomehaničkih zupčanika i onih što se upotrebljavaju u strojogradnji očituju se samo u proporcijama visine glave h_g i korijena zuba h_k (v. sl. 61 a).

Zakoni ozubljenja. U toku rada zubi zupčanika ulaze i izlaze iz zahvata. Točka dodira T (sl. 61 b) u toku zahvata stalno se pomiče po profilima zubâ. Da bi gibanje gonjenog zupčanika bilo kontinuirano, par zubâ koji je u zahvatu mora se u toku cijelog zahvata dodirivati. To znači da komponente obodnih brzina u pravcu zajedničke normale na profile zubâ moraju biti jednake. Prema sl. 61 b nadalje slijedi:

$$\begin{aligned} v_{n1} &= v_{n2} \\ \omega_1 : \omega_2 &= \frac{v_{n1}}{r_{t1}} : \frac{v_{n2}}{r_{t2}} = r_{t2} : r_{t1}. \end{aligned}$$

Kako su trokuti O_1N_1P i O_2N_2P slični, to je

$$r_{t2} : r_{t1} = r_{o2} : r_{o1},$$

pa je

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{r_{o2}}{r_{o1}}. \quad (64)$$

Iz izraza (64) slijedi prvi zahtjev ozubljenja: da bi prijenosni broj u toku cijelog zahvata bio konstantan, moraju profili zubâ biti odabranici tako, da zajednička normala u svakoj trenutnoj točki dodira prolazi uvijek kroz istu nepomičnu točku P na spojnici središta zupčanika O_1O_2 . Točka P određuje polumjere dodirnih kružnica.

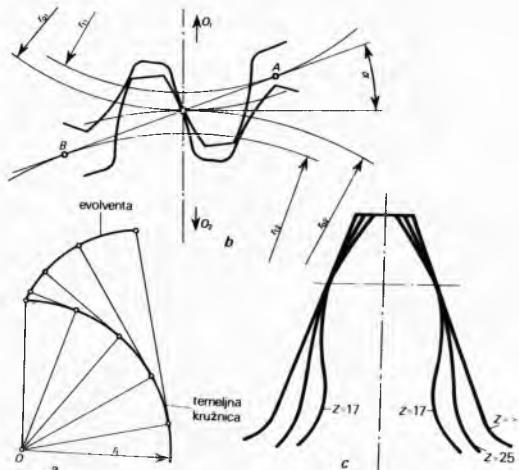
Prema sl. 61 b očigledno je da tangencijalne komponente obodnih brzina v_{t1} i v_{t2} nisu jednake. Zato zubi jedni po drugima kližu, pa se dio energije pogonskog zupčanika troši na rad trenja među zubima. Klizanje nadalje uzrokuje trošenje i zagrijavanje zubâ.

Da se prijenos gibanja s pogonskog zupčanika na gonjeni ne bi prekidao prije nego jedan par zubâ izade iz zahvata, drugi par zubâ mora ući u zahvat. To je drugi zahtjev ozubljenja. Drugi zahtjev ozubljenja bit će ispunjen ako je duljina zahvatne linije veća od koraka zuba. Zahvatna linija je geometrijsko mjesto trenutnih točaka dodira u toku zahvata.

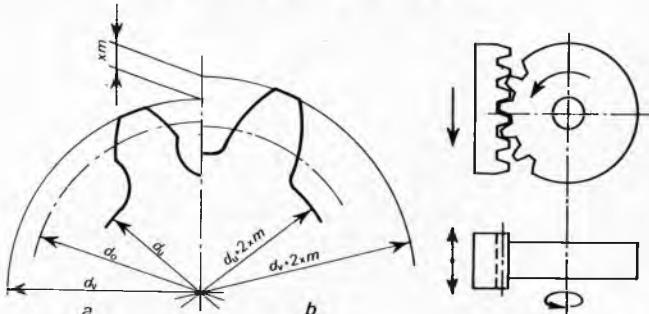
Vrste ozubljenja zupčanika. Bokovi profila zupčanika mogu imati različite oblike. U finoj mechanici primjenjuje se evolventno, cikloidno i kvazikcikloidno (satno, lučno) ozubljenje, ozubljenje s valjcima i još neka pojednostavnjena ozubljenja kao cilindrično, krunko i vijčano.

Evolventno ozubljenje najviše se primjenjuje. Evolventu opisuje točka na pravcu koji se valja po tzv. temeljnoj kružnici (sl. 62 a). Na sl. 62 b predloženi su evolventni zubi u zahvatu. Na sl. 62 c prikazan je utjecaj broja zubâ na oblik zubâ. Što je broj zubâ z veći, zakrivljenost zuba je manja. Pri $z = \infty$ profil zuba je ograničen ravnim linijama. Ako broj zubâ padne ispod neke granične vrijednosti, dolazi do pojave tzv. podrezivanje zubâ, (sl. 63 a).

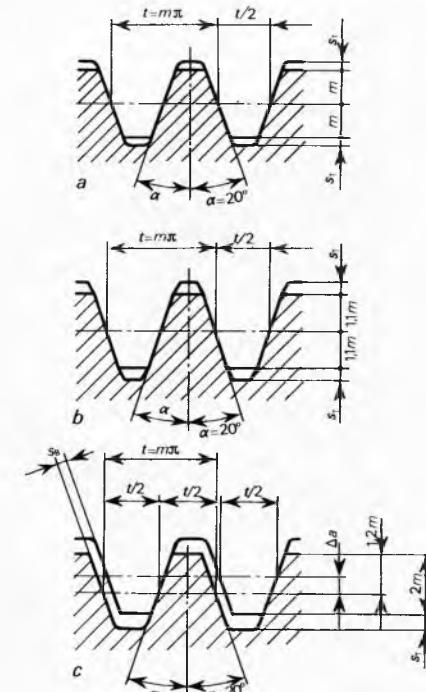
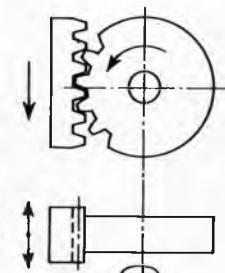
Evolventni zupčanici istog modula mogu se jedan s drugim sparavati bez obzira na broj zubâ. To omogućava obradu evol-



Sl. 62. Evolventno ozubljenje, a Konstrukcija evolvente, b zubi u zahvatu, c utjecaj broja zubâ na oblik zubâ



Sl. 63. Podrezivanje i korigiranje zubâ. a Podrezani zub, b korigirani zub



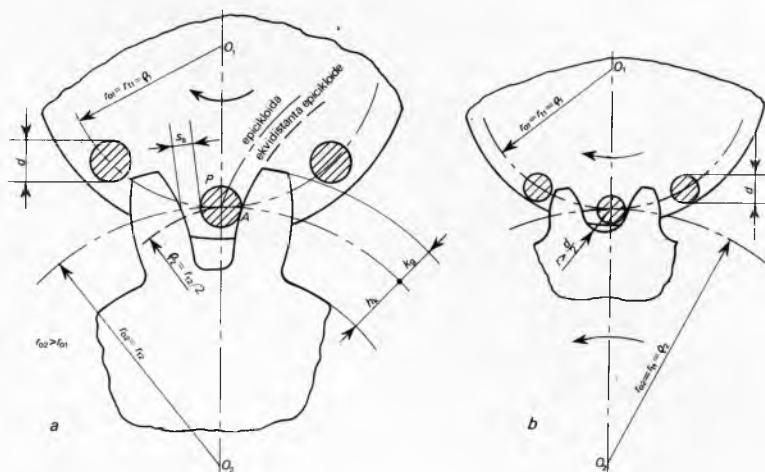
Sl. 65. Standardni profili. a U strojogradnji, b i c u finoj mehanici

ventnih zubâ metodom odvaljivanja. Alat koji ima oblik zupčanika i izradak za vrijeme obrade gibaju se jedan prema drugom kao par zupčanika u zahvatu (sl. 64).

Zupčanik s beskonačno velikim diobenim promjerom jest ozubljena letva. Profil zuba ozubljene letve ocrtan je ravnim linijama (sl. 62 c). Zubi ozubljene letve mogu se stoga vrlo precizno izraditi, pa se ozubljena letva često primjenjuje kao alat za obradu zuba (sl. 64). Profil zuba ozubljene letve standardni je profil. Na sl. 65 predloženi su standardni evolventni profili. Profil prema sl. 65 a upotrebljava se za module $m \geq 1$ mm, a za manje module profili prema sl. 65 b i c.

Prednosti evolventnog ozubljenja jesu: što se mogu obraditi odvaljivanjem (nije potreban veliki broj alata, v. čl. *Alatni strojevi*, TE 1, str. 164), što se mogu spajati bez obzira na broj zuba i što nije potreban krajnje točan razmak vratila. Nedostaci su: veliki minimalni broj zuba i loša svojstva pri povećavanju brzine vrtnje ($i < 1$). Evolventno ozubljenje primjenjuje se za čelne, vijčane i stožne zupčanike.

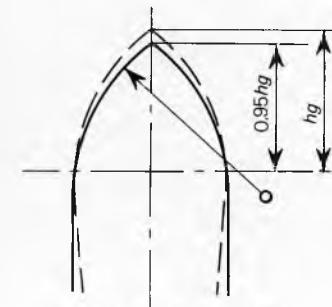
Zubi s cikloidnim profilom u zahvatu prikazani su na sl. 66 c. Glava cikloidnog zuba ograničena je epicikloidom, a korijen zuba hipocikloidom. Epicikloidu opisuje točka na kružnici polumjera ϱ koja se izvana valja po nepomičnoj kružnici polumjera r_1 (sl. 66 a). Nepomična kružnica naziva se temeljna kružnica. Hipocikloidu opisuje točka na kružnici polumjera ϱ koja se iznutra valja po temelj-



$r_{t2}/\varrho_2 = 3$. Odnosi $r_{t1}/\varrho_1 = 2$ i $r_{t2}/\varrho_2 = 2$ daju radijalne boke profila korijena zuba (sl. 66 d).

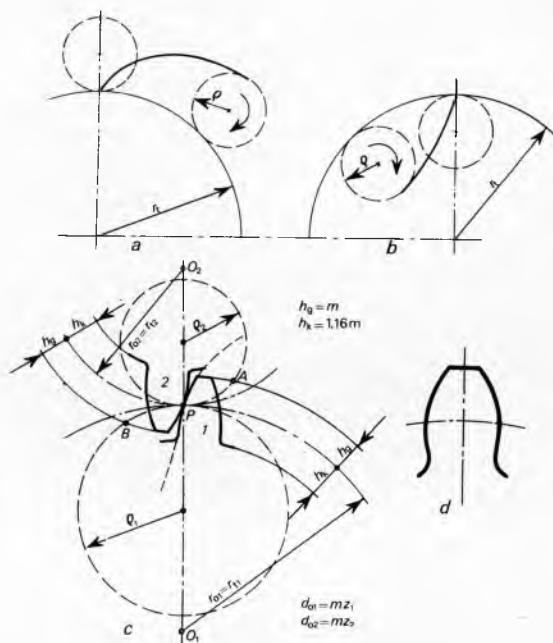
Čepno ozubljenje (sl. 67) je modifikacija cikloidnog ozubljenja. Veći zupčanik ima cikloidno ozubljenje, a manji je pliča s čepovima. Čepno ozubljenje nastaje ako na manjem zupčaniku bude ispunjen uvjet $r_{t1} = r_{t2} = \varrho_1$. Čepno ozubljenje je podobno za manja opterećenja. Neosjetljivo je na nečistoće.

Satni zupčanički prigoni moraju biti malih dimenzija jer se primjenjuju u urarstvu. Ti prigoni pretežno služe za povećanje broja okretaja. Zato je polazna osnova tih zupčanika cikloidno ozubljenje s radijalnim profilom korijena zuba ($r_t = 2\varrho$). Profil glave zuba nije epicikloida već kružni luk (sl. 68). Osim profila prikazanog na sl. 68, primjenjuju se u urarstvu još neke druge modifikacije cikloidnog ozubljenja. Profili zuba satnog ozubljenja ne udovoljavaju prvom zahtjevu ozubljenja, pa se prijenosni broj u toku zahvata mijenja. To u ovom slučaju, međutim, ne smeta jer se kod cijelog satnog mehanizma regulira nemirnicom. Maksimalni prijenosni brojevi kod satnog ozubljenja iznose $i_{max} = 12,5$ po jednom stupnju prijenosa.

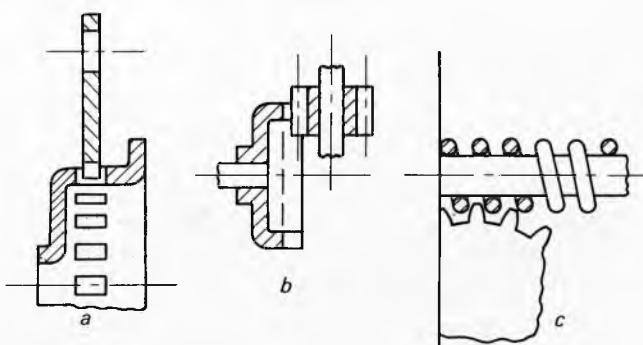


Cilindrično, krunko i vijčano (zavrtno) ozubljenje primjeri su pojednostavnjениh ozubljenja; prikazani su na sl. 69. Ni sva ta ozubljenja ne udovoljavaju prvom zahtjevu ozubljenja, zbog upotrijebljenih oblika zuba, ali se odlikuju jednostavnosću i jeftinicom.

Prosti zupčanički prigoni. Zupčanički prijenosni mehanizmi mogu se podijeliti na proste i složene i na jednostepene i višestepene. Prosti zupčani prigoni imaju nepomične osi vratila zup-

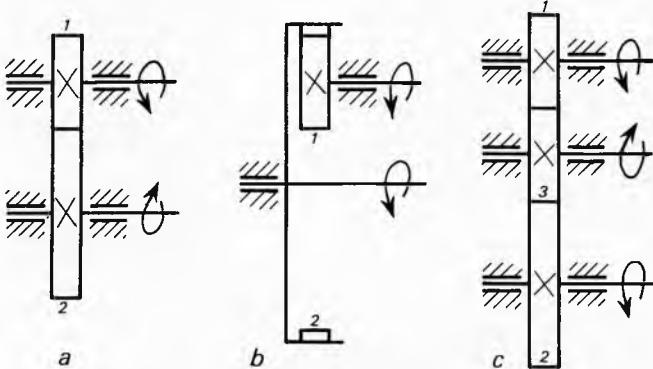


noj kružnici (sl. 66 b). Temeljna kružnica zupčanika 1 je diobena kružnica polumjera $r_{o1} = r_{t1}$, a temeljna kružnica zupčanika 2 je diobena kružnica polumjera $r_{o2} = r_{t2}$ (sl. 66 c). Glava zuba zupčanika 1 nastaje valjanjem kružnice radijusa ϱ_2 , a korijen valjanjem kružnice radijusa ϱ_1 po temeljnoj kružnici r_{t1} prvog zupčanika. Analogno vrijedi za zupčanik 2. To znači da postoji samo jedan par cikloidnih zupčanika koji se mogu zajedno spregnuti. Stoga je za obradu svakog cikloidnog zupčanika potrebno posebno profilirano glodalno. To je osnovni nedostatak cikloidnog ozubljenja, pa se ono primjenjuje u finoj mehanici samo još u pojedinim slučajevima, npr. u električnim brojilima i u filmskim kamerama. Zahvatnu liniju cikloidnog ozubljenja sačinjavaju kružni lukovi AP i PB (sl. 66 c). Očigledno je da razmak vratila zupčanika mora biti vrlo točan, da bi se realizirala tražena zahvatna linija. To je drugi bitan nedostatak cikloidnog ozubljenja. Nasuprot navedenim nedostacima stoji osnovna prednost cikloidnog ozubljenja: minimalni broj zuba je $z_{min} = 4 \dots 5$. Zato cikloidni prigoni omogućavaju mnogo veće prijenosne brojeve od evolventnih (v. izraz 65). Povoljni profili zuba postižu se primjenom odnosa $r_{t1}/\varrho_1 = 3$.



čanika. U složenim su prigonima osi vratila nekih zupčanika pomične.

Prosti jednostepeni zupčanički prigoni su osnovni prigoni. Prijenosni broj definiran je izrazom (53) $i = \omega_1/\omega_2$. U tom izrazu implicitno je sadržan i predznak prijenosnog broja. Ako obje kutne brzine ω imaju isti smisao vrtnje, onda je $i > 0$ (sl. 70 b),



Sl. 70. Prosti jednostepeni zupčani prigoni. a) S vanjskim ozubljenjem $i < 0$, b) s vanjskim i unutarnjim ozubljenjem $i > 0$, c) s meduzupčanicom $i > 0$

a ako kutne brzine imaju suprotni smisao vrtnje, onda je $i < 0$ (sl. 70 a). Uzimajući u obzir da je $\omega = 2\pi n$ i da je prema (63) $d_0 = 2r_0 = m z$, prijenosni broj jednostepenog prostog zupčaničkog prigona može se definirati izrazom:

$$i_{12} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} = \pm \frac{d_{02}}{d_{01}} = \pm \frac{r_{02}}{r_{01}} = \pm \frac{z_2}{z_1}. \quad (65)$$

Par zupčanika s vanjskim ozubljenjem ima $i_{12} < 0$, a ako u paru zupčanika jedan ima unutarnje ozubljenje, onda je $i_{12} > 0$. Međuzupčanik 3 na sl. 70 c ne utječe na iznos prijenosnog broja, već mu samo mijenja predznak. Kako se smisao vrtnje prostih zupčaničkih prigona može lako utvrditi, obično se predznak prijenosnog broja ispušta.

Po analogiji s izrazom (65) može se napisati

$$i_{21} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{1}{i_{12}}. \quad (66)$$

Na sl. 71 prikazan je višestepeni prosti zupčanički prigon. Prijenosni brojevi pojedinih jednostepenih prigona koji sačinjavaju višestepeni prigon jesu:

$$\begin{aligned} i_{12} &= \omega_1/\omega_2; \\ i_{34} &= \omega_3/\omega_4; \dots i_{k,k+1} = \omega_k/\omega_{k+1}. \end{aligned}$$

Ukupni prijenosni broj višestepenog prigona dan je izrazom

$$i_{1,k+1} = \omega_1/\omega_{k+1}. \quad (67)$$

Pomnože li se pojedinačni prijenosni brojevi i uzme li se $\omega_2 = \omega_3; \omega_4 = \omega_5$ itd., dobije se

$$i_{12} \cdot i_{34} \cdots i_{k,k+1} = \frac{\omega_1 \cdot \omega_2 \cdots \omega_k}{\omega_2 \cdot \omega_3 \cdots \omega_{k+1}} = \frac{\omega_1}{\omega_{k+1}} = i_{1,k+1}.$$

Dakle, prijenosni je broj višestepenog prostog zupčaničkog prigona

$$i_{1,k+1} = i_{12} \cdot i_{34} \cdots i_{k,k+1} = \frac{z_2}{z_1} \cdot \frac{z_4}{z_3} \cdots \frac{z_{k+1}}{z_k}. \quad (68)$$

Složeni zupčanički prigoni dijele se prema broju stupnjeva slobode gibanja na planetne prigone (s jednim stupnjem slobode) i na diferencijale (s dva stupnja slobode gibanja).

Planetni prigoni vrsta su zupčaničkih prijenosnika u kojima neki zupčanici (tzv. planeti) uz rotaciju oko vlastite osi izvode još i kružno gibanje po unutarnjem obodu središnjeg (tzv. sunčanog)

zupčanika. Pogonsko i gonjeno vratilo su koaksijalni. Jednostepeni planetni prigon prikazan je na sl. 72. On se sastoji od zupčanika 1, 2 i 4 i vodila 3. Zupčanik 4 je vezan s postoljem (kućištem) pa je nepomičan. Zupčanik 1 i vodilo 3 rotiraju oko nepomične osi O_1O_3 . Zupčanik 2 rotira oko vodila, a zajedno s vodilom oko osi O_1O_3 . Ukupni je prijenosni broj

$$i_{13}^4 = \frac{\omega_1}{\omega_3}. \quad (69)$$

Brojka 4 desno iznad prijenosnog broja označava član prigona koji je nepomičan.

Ako se zupčanik 4 osloboди od kućišta, a vodilo 3 veže za kućište, dobije se prosti jednostepeni zupčani prigon s međuzupčanicom kojemu je prema (65) prijenosni broj

$$i_{14}^3 = \frac{\omega_1}{\omega_4} = - \frac{z_4}{z_1}.$$

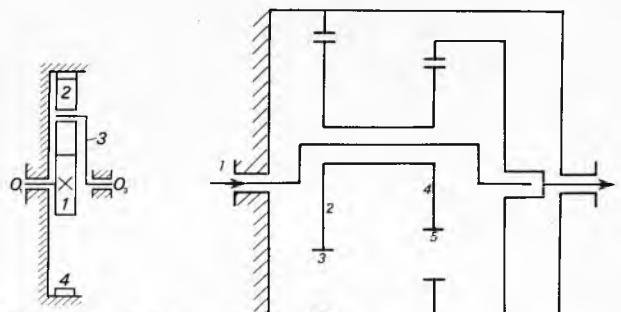
Isti efekt bi se postigao ako bi se na postojećem prigonu s nepomičnim zupčanicom 4 ($\omega_4 = 0$) svakom pomicnom članu pridružila kutna brzina ω_3 . Dakle:

$$i_{14}^3 = \frac{\omega_1 - \omega_3}{\omega_4 - \omega_3} = 1 - \frac{\omega_1}{\omega_3} = 1 - i_{13}^4. \quad (70)$$

Prema tome ukupni prijenosni broj jednostepenog planetnog prigona prema sl. 72 iznosi:

$$i_{13}^4 = \frac{\omega_1}{\omega_3} = 1 - i_{14}^3 = 1 + \frac{z_4}{z_1}. \quad (71)$$

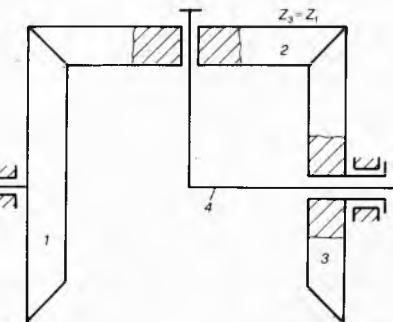
Ovdje primijenjena metoda određivanja prijenosnog broja planetnog prigona naziva se metoda zaustavljanja vodila. Tom metodom mogu se odrediti prijenosni brojevi i za višestepene planetne prigone. Na sl. 73 prikazan je dvostepeni planetni prigon.



Sl. 72. Jednostepeni planetni prigon. 1, 2, 3 Zupčanici, 4 vodilo, O_1, O_3 osi

Sl. 73. Dvostepeni planetni prigon

Planetni prigoni imaju vrlo zbijenu konstrukciju. Uz isti prijenosni broj, planetni prigoni su 1,5...5 puta lakši od prostih prigona. Višestepeni planetni prigoni mogu imati vrlo velike prijenosne brojeve čak do $i = 10000$. Ipak treba reći da većina



Sl. 74. Shema diferencijala s koničnim zupčanicama. 1, 2, 3 Zupčanici, 4 vodilo

planetnih prigona s vrlo velikim prijenosnim brojevima nije podobna za prijenos većih snaga i za trajni pogon. Izrada planetnih prigona je složenija. Za izbor broja zuba nije mjerodavan samo

željeni prijenosni broj, već i potreba da razmaci osi zupčanika budu jednaki te da se zubi satelitnih zupčanika poklapaju s užubinama, tj. udubinama između dva susjedna zuba zupčanika s kojima su istovremeno spregnuti.

Diferencijal je zupčanički prigon s dva stupnja slobode. Na sl. 74 prikazana je shema diferencijala s koničnim zupčanicima. Kutne brzine svih članova diferencijala mogu se odrediti samo ako su poznate kutne brzine dvaju članova. Zaustavi li se vodilo 4, zupčanici 1 i 3 okreću se istim kutnim brzinama, ali u suprotnom smjeru. Prema tome je:

$$i_{1,3}^4 = \frac{\omega_1 - \omega_4}{\omega_3 - \omega_4} = -\frac{z_3}{z_1} = -1.$$

Kako okretanje zupčanika 1 i 3 ovisi o opterećenju, prijenosni broj nije unaprijed određena vrijednost. Kao jednadžba diferencijala javlja se izraz za kutnu brzinu vodila

$$\omega_4 = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}.$$

Opterećenje finomehaničkih zupčaničkih prigona je redovno malo. Zato je u većini slučajeva dovoljna kontrola zuba na savijanje prema pojednostavljenom proračunu po Bachu (sl. 75). Obodna sila na diobnom promjeru d_0 je $F_0 = \frac{2 M_t}{d_0}$,

pri čemu je M_t torzijski moment koji zupčanik prenosi. Sila na vrhu zuba je $F < F_0$, pa se za moment savijanja M_s s povećanom sigurnošću može napisati: $M_s = F_0 h \leq \frac{b s_k^2}{2} \sigma_{s, dop}$ i odavde uzimajući za debljinu zuba $S_k = 0,52 t$ i visinu zuba $h = 0,64 t$ dobije se:

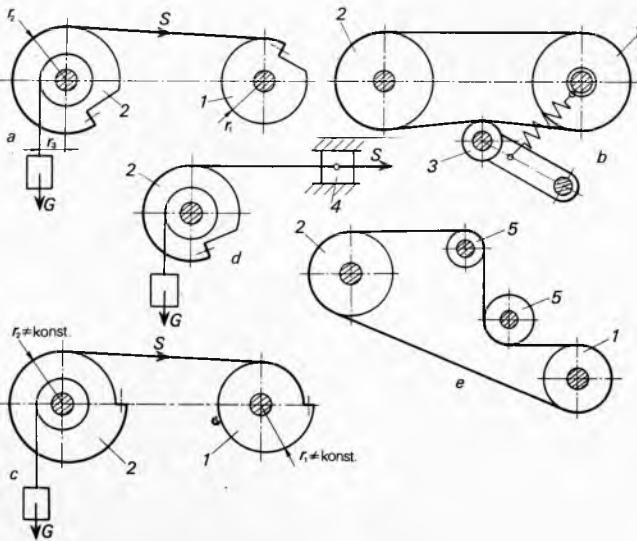
$$F_0 \leq b t \cdot 0,07 \sigma_{s, dop} = b t c, \quad (72)$$

gdje je b širina zuba, t korak zuba, $\sigma_{s, dop}$ dopušteno naprezanje na savijanje. Vrijednosti za c mogu se računati prema izrazu

$$c = 0,07 \sigma_{s, dop} \approx (0,02 \dots 0,03) \sigma_R \approx (0,01 \dots 0,015) \sigma_L. \quad (73)$$

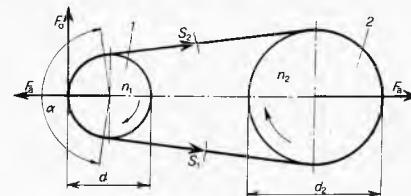
U izrazu (73) je σ_R granica razvlačenja, σ_L lomna čvrstoća čelika.

Prigoni sa savitljivim vučnim elementom primjenjuju se za prijenos kružnog gibanja između vratilâ s relativno velikim razmakom ili složenim prostornim razmještajem. Takvi prigoni omogućavaju i pretvaranje kružnog gibanja u pravocrtno. Savitljivi vučni element povezuje pogonski i gonjeni član prigona (sl. 76). Savitljiv element može biti od gipkog materijala ili sastav-



Sl. 76. Prigoni sa savitljivim vučnim elementom. a) Otvoreni prigon, b) zatvoreni sa zateznim kolom, c) otvoreni s promjenljivim prijenosnim brojem, d) za pretvaranje pravocrtnog gibanja u kružno, e) zatvoreni sa skretnim klimama, 1 Pogonsko, 2 gonjeno, 3 zatezno kolo, 4 klizač, 5 skretno kolo

ljen od članaka, npr. lanac. Kao savitljivi elementi služe konopci, remenje i užad izrađeni od svile, pamuka, kudelje, kože, gume, poliestera, poliamida i čelika. Primjena lanaca je rjeđa. Poprečni presjek savitljivih elemenata može biti kružan, pravokutan ili trapezan (klinasto remenje). Prigoni sa savitljivim elementom mogu biti otvoreni ili zatvoreni. Savitljiv vučni element otvorenih prigona spaja se s pogonskim i gonjenim članom. Kod zatvorenih



Sl. 77. Sile u prigonu sa savitljivom niti

prigona, izuzmu li se lanci, veza vučnog elementa s pogonskim i gonjenim članom ostvaruje se trenjem. Da ne bi došlo do proklizavanja vučnog elementa, mora biti ispunjen uvjet (sl. 77):

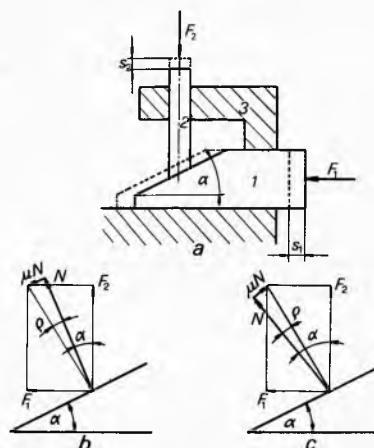
$$F_0 = T = S_1 - S_2 = S_2 (e^{\mu a} - 1) = S_1 (e^{\mu a} - 1) \cdot e^{-\mu a}. \quad (74)$$

U izrazu (74) je F_0 obodna sila, T trenje, S_1 i S_2 sile u savitljivom elementu, μ koeficijent trenja, a obuhvatni kut. Što je veći obuhvatni kut to je potrebna manja sila zatezanja F_a , koja opterećuje vratila i oslonce. Smanjenju sile zatezanja pridonosi i zaklinjavanje u žlijebljennim obodima kola (sl. 78). Ako nema proklizavanja između vučnog elementa i radnih kola, obodne su brzine obaju kola jednake. Iz jednakosti obodnih brzina dobije se prijenosni broj:

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1}. \quad (75)$$

U zatvorenim je prigonima prijenosni broj konstantan, u otvorenim prigonima prijenosni broj može biti promjenljiv. To se postiže promjenljivim promjerima pogonskog i gonjenog kola (sl. 76 c). Nosivost prigona iznimno se kontrolira. U tu se svrhu primjenjuje način proračuna kakav je uobičajen u elementima strojeva.

Prigon s klinovima (sl. 79) sastoji se od pogonskog kline 1, gonjenog kline 2 i postolja 3. Kako se prigoni s klinovima pri-



Sl. 79. Pogon s pomoću klinova. a) Elementi i posmatraci, b) sile pri dizanju gonjenog kline 2, c) sile pri spuštanju gonjenog kline 2. 1 Pogonski klin, 2 gonjeni klin, 3 postolje, a) nagibni kut pogonskog kline, α kut trenje, μ koeficijent trenja, F_1 sila pogonskog kline, F_2 sila gonjenog kline, N normalna sila

mjenjuju za prenošenje sila i regulaciju pomaka, pri čemu brzina pomicanja redovno nije bitna, prijenosni se broj prigona s klinovima izražava kao omjer pomakâ:

$$i_s = \frac{s_1}{s_2} = \cot \alpha = \frac{1}{\tan \alpha}, \quad (76)$$

gdje je α nagibni kut pogonskog klina 1.

Prema sl. 79 b i c, odnos sila na pogonskom i gonjenom klinu dan je izrazom:

$$F_1 = F_2 \tan(\alpha \pm \varrho). \quad (77)$$

U izrazu (77) znak + vrijedi za dizanje, a znak - za spuštanje gonjenog klina 2; ϱ je kut trenja.

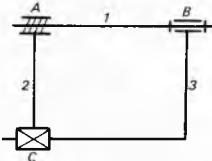
Stupanj djelovanja prigona s klinovima iznosi prema (76) i (77):

$$\eta = \frac{F_2 s_2}{F_1 s_1} = \frac{\tan \alpha}{\tan(\alpha \pm \varrho)}. \quad (78)$$

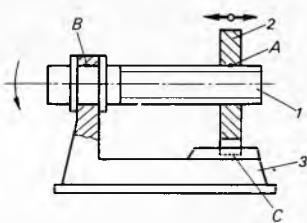
Vijčani prigon je modifikacija prigona s klinom. Teorijski uzeto, vijčani prigon nastaje obavijanjem pogonskog klina oko cilindričnog gonjenog klina, pri čemu nagnuta ploha pogonskog klina opisuje zavojnu vijčanu plohu. Izrazi (77) i (78) vrijede i za vijčani prigon s tim da je $F_1 = F_0$ = obodna sila na navoju, a $F_2 = F_a$ = aksijalna sila u vijku. Stavi li se za $s_1 = \varphi d/2$ i za $s_2 = s_a$, može se prema (76) za vijčani prigon prijenosni broj prikazati izrazom

$$i_s = \frac{\varphi d}{2 s_a}. \quad (79)$$

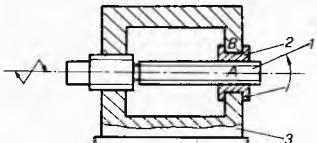
U izrazu (79) je φ kut zakretanja vijka, d srednji promjer navoja, s_a aksijalni pomak vijka.



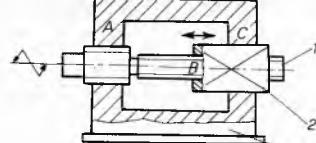
Sl. 80. Strukturna shema vijčanog prigona. 1 Član s vijčanim zglobom A i rotacijskim zglobom B, 2 član s vijčanim zglobom A i translatornim zglobom C, 3 član s rotacijskim zglobom B i translatornim zglobom C



Sl. 81. Konstrukcijska shema vijčanog prigona za pretvorbu kružnog gibanja u pravocrtno. 1 Član s vijčanim zglobom A i rotacijskim zglobom B, 2 član s vijčanim zglobom A i translatornim zglobom C, 3 član s rotacijskim zglobom B i translatornim zglobom C



Sl. 82. Vrijčani prigon s dva vijčana i jednim rotacijskim zglobom za pretvorbu uvrtenja u kružno gibanje. A Vrijčani zglob, B rotacijski zglob. 1 2 i 3 članovi prigona



Sl. 83. Vrijčani prgon s dva vijčana i jednim translatornim zglobom za pretvorbu uvrtenja u pravocrtno gibanje. A Vrijčani zglob, B rotacijski zglob. 1 2 i 3 članovi prigona

Vrijčani prigon (sl. 80) sastoji se od tri člana i tri zgloba: vijčanog A, rotacijskog B i translatornog C. Jedan član mora biti nepomičan (postolje). O izboru postoljnog, pogonskog i gonjenog člana ovise gibanja vijčanog prigona. U tabl. 7 sačinjen je pregled mogućih kombinacija.

Na sl. 81 dana je konstrukcijska shema vijčanog prigona za pretvorbu kružnog gibanja u pravocrtno. Konstrukcijske su sheme ostalih kombinacija slične. Osim vijčanih prigona s jednim vijčanim zglobom primjenjuju se i vijčani prigoni sa dva vijčana zgloba. U tom je slučaju treći zglob bilo rotacijski, bilo translatorni.

Konstrukcijska shema vijčanog prigona sa dva vijčana i jednim rotacijskim zglobom dana je na sl. 82. Takav prigon omogućava pretvaranje uvrtenja pogonskog člana 1 u kružno gibanje gonjenog člana 2. Za postizanje velikog prijenosnog broja isko-

rištava se razlika uspona vijčanih zglobova. Prijenosni je broj prigona

$$i_\varphi = \frac{\varphi_1}{\varphi_2} = \frac{h_1}{h_1 - h_2}. \quad (80)$$

U izrazu (80) i_φ je prijenosni broj prigona, φ_1 i φ_2 kutovi su zakretanja pogonskog i gonjenog člana, h_1 i h_2 usponi navoja pogonskog i gonjenog člana. Prema izrazu (80) mogući su ovi slučajevi:

$$0 < h_2 < h_1, \text{ što daje: } i_\varphi > 0 \text{ pa je: } \varphi_1 > \varphi_2 > 0$$

$$0 < h_1 < h_2, \text{ što daje: } i_\varphi < 0, \text{ pa je: } \varphi_2 < 0 < \varphi_1.$$

Takvi prigoni pogodni su za fino podešavanje.

Tablica 7
MOGUĆA GIBANJA VIJČANOG PRIGONA

Postoljni	Član		Gibanje pogonskog člana gibanje gonjenog člana
	Pogonski	Gonjeni	
3	1	2	Kružno / pravocrtno
3	2	1	Pravocrtno / kružno
2	1	3	Uvrтанje / pravocrtno
2	3	1	Pravocrtno / uvrtanje
1	3	2	Kružno / uvrtanje
1	2	3	Uvrtanje / kružno

Na sl. 83 prikazan je vijčani prigon sa dva vijčana i jednim translatornim zglobom, koji omogućava pretvaranje uvrtenja u pravocrtno gibanje. Taj se prigon naziva i diferencijalni vijčani prigon. Prijenosni broj diferencijalnog vijčanog prigona iznosi:

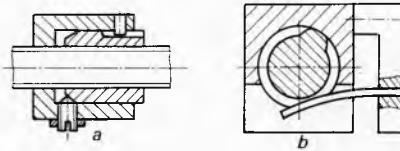
$$i_s = \frac{s_1}{s_2} = \frac{h_1}{h_1 - h_2}. \quad (81)$$

U izrazu (81) su s_1 i s_2 aksijalni pomaci pogonskog i gonjenog člana, h_1 i h_2 usponi navoja pogonskog i gonjenog člana. Pomak gonjenog člana određen je izrazom

$$s_2 = \frac{1}{2\pi} (h_4 - h_2) \varphi_1. \quad (82)$$

U izrazu (82) φ_1 je kut zakretanja pogonskog člana.

Vijčani prigoni često se primjenjuju za mjerne uređaje i fina podešavanja. Zračnost između navoja ima pri promjeni smjera uvijanja (vrtnje) tzv. mrtvi hod, pa zakretanje pogonskog člana nije praćeno aksijalnim pomakom gonjenog člana. Zato se poduzimaju posebne konstruktivne mjere za sprečavanje mrtvog hoda. Mrtvi hod može se spriječiti čvrstom konstrukcijom (sl. 84 a) ili elastičnom konstrukcijom (sl. 84 b).



Sl. 84. Poništavanje mrtvog hoda. a Čvrstom konstrukcijom, b elastičnom konstrukcijom

Polužni prigoni mogu biti elementarni i složeni. Elementarni polužni prigoni su četverozglobni (sl. 85), a njihovi zglobovi mogu biti rotacijski ili translatorni. Prema vrsti zglobova razlikuju se ove vrste četverozglobnih prigona: s četiri rotacijska zgloba, s tri rotacijska i jednim translatornim zglobom, s dva rotacijska i dva translatorna zgloba i s jednim rotacijskim i tri translatorna zgloba.

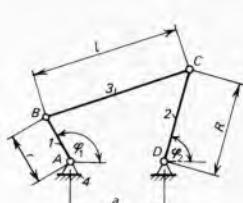
U tabl. 8 dan je pregled četverozglobnih prigona.

Dopunjavanjem elementarnih prigona nastaju složeni prigoni. Na sl. 86 prikazan je složeni šesteročlani polužni prigon s rotirajućom kulisom.

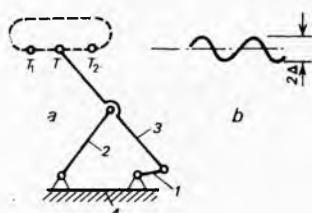
Tablica 8
ČETVEROZGLOBNI MEHANIZMI

Naziv	Prijenosni broj		
	$i > 0$ ili $i < 0$	$i \geq 0$ ili $i \leq 0$	$i \geq 0$
Četverozglobni prigon			
Motorni prigon			
Kulisni prigon			
Sinusni prigon			
Tangensni prigon			
Elipsograf			
Četverozglobni prigon s jednim rotacionim zglobovom			
Gibanja članova	1 Kontinuirano	Periodično	Kontinuirano
	2 Kontinuirano	Periodično	Periodično

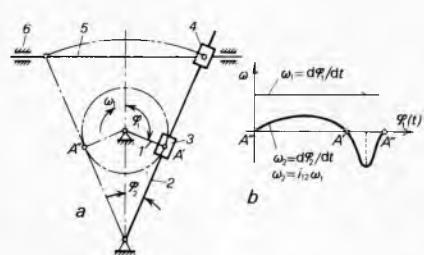
Od polužnih prigona zahtijevaju se unaprijed odredena kinematička svojstva, kao što su zadana funkcija položaja $\varphi_2 = f_{21}[\varphi_1(t)]$, zadana funkcija prijenosnog broja $i_{12} = f_{12}[\varphi_1(t)]$ i zadane putanje, brzine ili ubrzanja pojedinih točaka prigona. Tako se npr. od kulisnog prigona (sl. 86) koji



Sl. 85. Četverozglobni prigon.
1 pogonski član (r), 2 gorenji član (R), 3 spojni član (L), 4 postolje (s), A , B , C i D zglobovi



Sl. 87. Četverozglobni prigon za pravocrtno vodenje. a Shema prigona, b stvarna putanja točke T

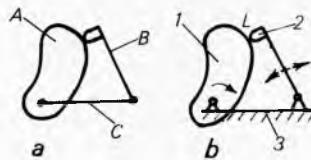


Sl. 86. Šesteričlani polužni prgon s rotirajućom kulisom. a Shema mehanizma, b graf funkcija $\omega_1(\varphi_1)$ i $\omega_2(\varphi_1)$, $1 \dots 6$ članovi prigona

se primjenjuje za pogon blanjilica zahtijeva da brzina jalovog hoda bude veća od brzine radnog hoda, što je prema sl. 86 b i ostvareno. Na sl. 87 a prikazana je shema četverozglobnog prigona za pravocrtno vodenje. Točka T tog prigona između točaka T_1 i T_2 ima približno pravocrtnu putanju.

Kinematička i dinamička svojstva prigona ovise o odnosu dimenzija pojedinih članova, i o strukturi prigona. Pod strukturom se razumijeva broj članova, međusobni razmještaj zglobova i njihove vrste. Strukturnu, kinematičku i dinamičku analizu i sintezu polužnih prigona obrađuje teorija mehanizama.

Krivuljni (grebenasti) prgoni (tabl. 9) za razliku od polužnih prigona omogućavaju realizaciju gotovo svake zadane funkcije položaja. Krivuljni se prgon redovno sastoji od tri člana: krivuljnog člana, spojnog člana i pomicaljke (sl. 88). Iako



Sl. 88. Krivuljni prgon. a Kinematički lanac, b krivuljni prgon, A krivuljni član, B pomicaljka, C spojni član, 1 pogonski član, 2 gorenji član, 3 postolje

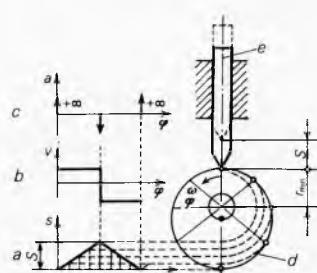
krivuljni prgon ima samo tri člana, moguće su brojne transformacije tih članova, pa se dobivaju vrlo različiti prgoni. Sažet prikaz tih transformacija dan je u tabl. 11. Ipak, u većini slučajeva pogonski član je krivuljni član koji rotira jednolikom kutnom brzinom. Svaki krivuljni prgon ima barem jedan zglob (kinematički par) višeg reda s dodirom po liniji ili u točki (L na sl. 88 b). Krivuljni prgoni imaju dva bitna svojstva: sastoje se od malog

Tablica 9
KLASIFIKACIJA KRIVULJNIH (GREBENASTIH) PRIGONA

Kriterij	Varijante	Sl. broj	
Postolje	Spojni član	1, 4-17	Krivuljni član
	Krivuljni član	2	Pomicaljka
	Pomicaljka	3	Postolje
Pogonski član	Krivuljni član	1, 5-17	Spojni član
	Pomicaljka	4	
Gibanje pogonskog člana	Spojni član	2, 3	
	Rotacija	1-10, 12-16	
Gibanje gorenjeg člana	Translacija	11, 17	
	Rotacija	1, 4, 7, 10, 12	
	Složeno gibanje	2, 3	
Oblik krivuljnog člana	Translacija	5, 6, 8, 9, 11, 13-16	
	Ploča	1, 2, 3, 5, 6, 11-17	
Oblik dodirne površine na pomicaljki	Traka	4	
	Bubanj	7, 8	
Oblik dodirne površine na pomicaljki	Konus	9	
	Globoid i slično	10	
Plohe gibanja	nož	12, 16, 17	
	Vajjak-čep	4	
	kotač	1, 2, 5, 6, 11, 14, 15	
Veza krivuljnog člana i pomicaljke	Kugla	7-10	
	Ravnina	3, 13	
Sliom	Paralelne ravnine (ravn prgoni)	1-6 + 11-16	
	Neparalelne plohe (prostorni prgoni)	7-10	
Oblikom	Silom	1, 2, 3, 5, 6, 7	
	Oblikom	9, 11-13, 16, 17	

broja članova, pa stoga mogu biti zbijene konstrukcije i imaju relativno malu moć nošenja zbog visokih kontaktnih pritiska, u kinematičkom paru višeg reda.

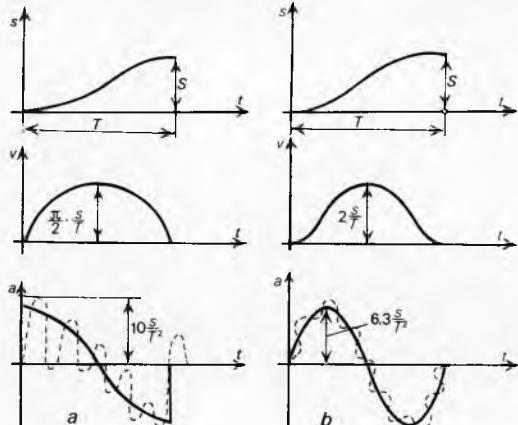
Konstrukcija krivuljnog člana prema zadanoj funkciji položaja predočena je na sl. 89. Gibanje gonjenog člana određuju tri kinematička parametra: pomak $s[\varphi(t)]$, brzina $v[\varphi(t)]$ i ubrzanje $a[\varphi(t)]$. Ako se krivuljni član giba jednoliko, vrijedi $\varphi = \omega t$. Gibanje pomicaljke obično je periodično. Brzina se određuje deriviranjem funkcije položaja, a ubrzanje deriviranjem brzine. Derivirati se može grafički ili analitički. Na sl. 89 prikazani su grafovi brzine i ubrzanja koji odgovaraju zadanoj funkciji položaja. Apscisama $0, \pi, \pi$ i 2π , u kojima funkcija položaja ima lom, odgovaraju skokovite promjene brzine, a skokovitim promjenama brzine pripadaju teoretski beskonačno velika ubrzanja.



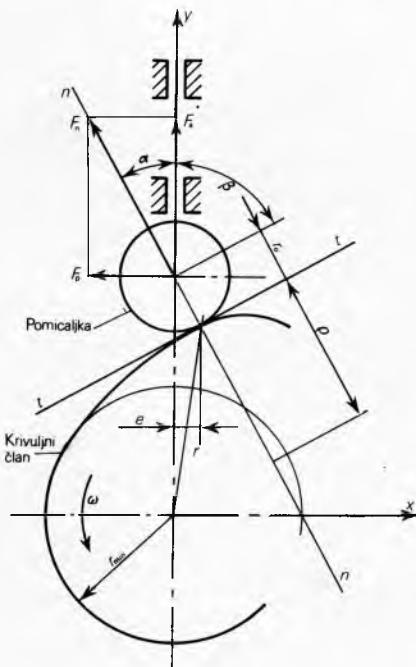
Sl. 89. Konstrukcija krivuljnog člana i grafova $v[\varphi(t)]$ i $a[\varphi(t)]$ prema zadanoj funkciji položaja $s[\varphi(t)]$. a) Graf funkcije položaja, b) graf brzine v , c) graf ubrzanja a , d) krivuljni član, e) pomicaljka (ticalo)

Zbog elastičnih deformacija i trenja, ta su ubrzanja doduše konačna, ali vrlo velika, pa se prema zakonu $F = m a$ (gdje je m masa, a a ubrzanje) javljaju vrlo velike sile inercije F , koje izazivaju velike gubitke trenja, habanje kontaktnih površina, a ponekad i lom. Funkcije položaja koje se lome izazivaju tvrde udare, pa nisu podobne za krivuljni prigon.

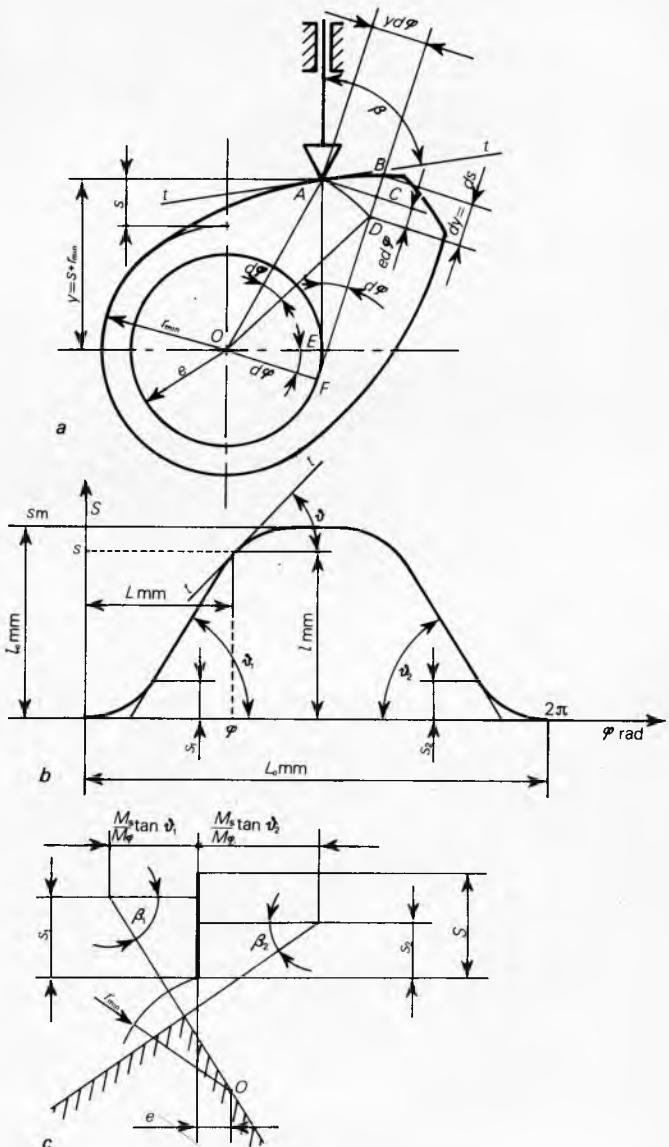
Na sl. 90 prikazane su kosinusna i sinusna funkcija položaja. Kosinusna funkcija ima skokovite promjene ubrzanja na početku i kraju ciklusa pa se svrstava u funkcije položaja s malim udarima. Sinusna funkcija nema uopće udara jer se ubrzanje mijenja kontinuirano. Sinusna funkcija ima međutim veću maksimalnu brzinu od kosinusne funkcije. To je nedostatak, jer su gubici trenja pri većim brzinama veći. Ako funkcija položaja nije unaprijed čvrsto određena, bira se funkcija koja ima što manje udare i što manje maksimalne brzine. Normalna sila F_n , koja djeluje na mjestu kontakta krivuljnog člana i pomicaljke može se rastaviti u dvije komponente: komponentu F_a u smjeru tangente na putanju pomicaljke i komponentu F_p u smjeru normale na putanju pomicaljke



Sl. 90. Funkcije položaja krivuljnih prigona. a) Kosinusna, b) sinusna



Sl. 91. Sile na pomicaljki. $t-t$ Tangenta, $n-n$ normala, F_n normalna sila, F_p komponenta sile u smjeru tangente, F_t komponenta sile u smjeru normale na pomicaljku, α kut pritiska, β kut prijenosa, r_{min} minimalni radius krivuljnog člana



Sl. 92. Meduzavisnost prijenosnog kuta β , priklonog kuta θ tangente na funkciju položaja i minimalnog radiusa r_{min} krivuljnog člana. a) Relevantni odnosi na krivuljnog člana, b) funkcija položaja, c) određivanje minimalnog radijusa r_{min}

(sl. 91). Poprečna sila F_p stvara trenje u osloncima pomicaljke. Prema sl. 91 je $F_p = F \tan \alpha$. Kut α zove se *kut pritiska*. Komplementarni kut β zove se *kut prijenosa*. Kod manje opterećenih krivuljnih prigona kut prijenosa β ne smije biti manji od 45° , a kod jače opterećenih prigona od $60^\circ \dots 70^\circ$. Kut prijenosa se

u toku jednog ciklusa mijenja. Između kuta prijenosa β , priklonog kuta tangente na funkciju položaja ϑ i minimalnog radijusa r_{\min} krivuljnog člana (sl. 92) postoji međuzavisnost. Prema sl. 92 a važi jednadžba

$$\tan \beta = \frac{y \frac{d\varphi}{ds} - e \frac{dy}{d\varphi}}{\frac{dy}{d\varphi} - e} = \frac{y}{\frac{M_s}{M_\varphi} \tan \vartheta - e}. \quad (83)$$

U izrazu (83) su $M_s = S/l_0$ i $M = 2\pi/l_0$, mjerila ordinate i apscise grafa funkcije položaja.

Izraz (83) omogućava grafičko određivanje minimalnog radijusa r_{\min} krivuljnog člana.

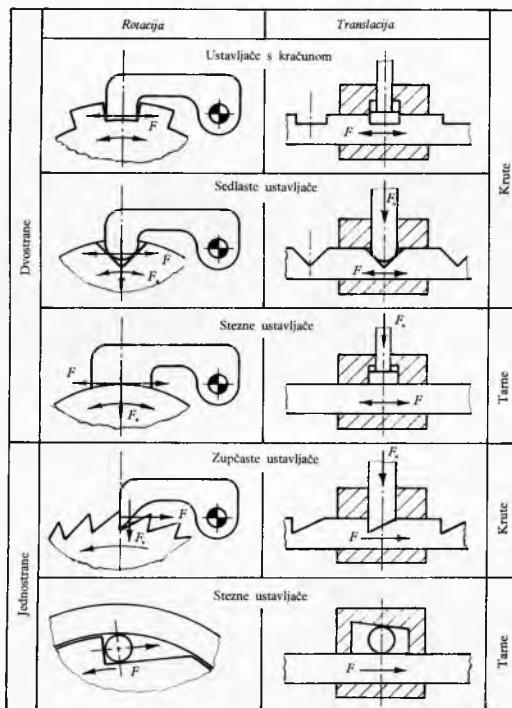
Krivuljni mehanizmi u finoj mehanici često se primjenjuju.

Otpornici

Otpornici su finomehanički funkcionalni elementi koji se ubraju u skupinu elemenata za podešavanje (tabl. 3). Pomoću otpornika spajaju se elementi konstrukcije. Zadatak je otpornika da pruže otpor relativnom pomicanju spojenih dijelova. U otpornike idu: ustavljače, graničnici, odbojnici, kočnice, prigušnice i spojke.

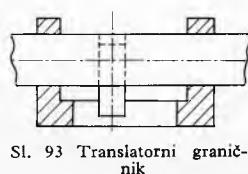
Ustavljače sprečavaju relativno pomicanje dvaju dijelova. Pregled ustavljača dan je u tabl. 10. Razlikuju se ustavljače za rotacijsko i ustavljače za translatorno gibanje, koje mogu biti

Tablica 10
PREGLED USTAVLJAČA



jednostrane i dvostrane. Krute ustavljače pružaju otpor pomicanju dijelova koji je ograničen samo čvrstoćom elementa ustavljače. Tarne ustavljače pružaju ograničen otpor pomicanju dijelova. Za razliku od krutih ustavljača, tarne ustavljače omogućavaju unutar određenih granica fiksiranje bilo kojeg međusobnog položaja dijelova. U tehničkoj praksi primjenjuju se ustavljače s kračunom, sedlaste, zupčaste i stezne ustavljače. Primjena ustavljača u finomehaničkoj praksi vrlo je raširena.

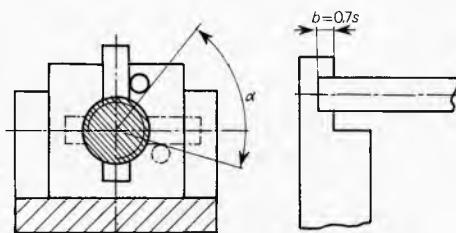
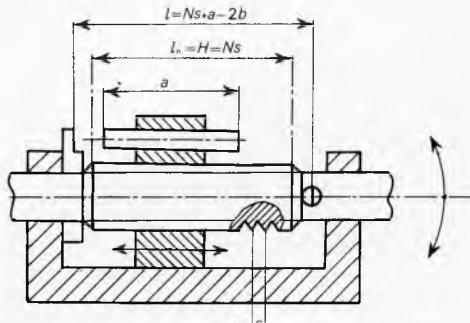
Graničnici (odbojnici) omeđuju područje pomicanja pojedinog dijela u odnosu prema drugima. Razlikuju se translatorni i rotacijski graničnici (sl. 93 i 95). Graničnici mogu biti kruti (graničnici u užem smislu) ili elastični (odbojnici). Konstruktivni oblici translatornih graničnika su vrlo



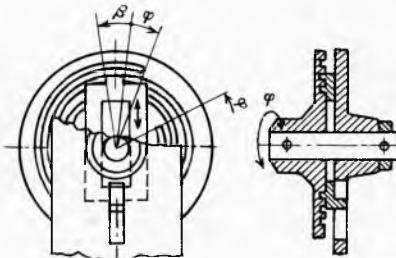
Sl. 93 Translatorni graničnik

raznoliki. Najčešće se izvode pomoću vijaka, zatika i pera. Podvrsta translatornog graničnika je graničnik hoda matice (sl. 94).

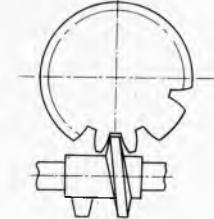
Spiralni graničnik (sl. 95) je tipični graničnik rotacijskog gibanja. Graničnici rotacijskog gibanja često se postavljaju na zupčanike. U tom su slučaju graničnici segmenti koji se pomoću vijaka i zatika učvršćuju na čeone plohe zupčanika. Ukupni broj



Sl. 94. Graničnik hoda matice



Sl. 95. Graničnik sa spiralnom vodilicom i pomicaljkom



Sl. 96. Graničnik pužnog prigona

okretaja zupčanika kojemu se broj okretaja ograničava može iznositi 150...200 okretaja. Na sl. 96 prikazan je graničnik pužnog prigona. Graničnik je u ovom slučaju jedan zub pužnog kola koji ima veću debljinu od debljine potrebne za normalan zahvat s pužnim vijkom. Na tom se principu ponekad grade i zupčanički graničnici.

Kočnice omogućavaju ili prekid gibanja nekog elementa ili ograničavanje brzine gibanja pomoću trenja. Za vrijeme kočenja kinetička se energija pomičnog elementa troši na rad trenja. Rad trenja istovremeno se pretvara u toplinsku energiju. Kočnice se primjenjuju pretežno na dijelovima koji rotiraju. Vrijeme kočenja pri konstantnim momentima je određeno izrazom

$$t = \frac{I \omega_0}{M_k - M}, \quad (84)$$

gdje je I dinamički moment inercije pomičnih dijelova, ω_0 kutna brzina neposredno prije početka kočenja, M_k moment kočenja i M pogonski moment.

Broj okretaja od trenutka kada počinje kočenje pa do zauzimanja dijela koji rotira jest:

$$N = \frac{\varphi}{2\pi} = \frac{\omega_0 t}{4\pi}. \quad (85)$$

Prigušnicama se ili zaustavlja titranje nekog dijela ili sprečava prenošenje titranja na ostale dijelove. Sheme translatornog i rotacijskog titrajnog sustava prikazane su na sl. 97.

Stanje titrjnog sustava definira se za translatorni sustav izrazom

$$m\ddot{x} + K\dot{x} + Dx \pm F_T = 0, \quad (86)$$

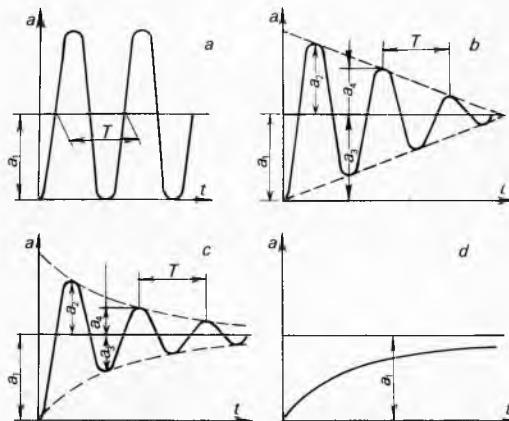
a za rotacijski sustav izrazom

$$I\ddot{\varphi} + K^*\dot{\varphi} + D^*\varphi \pm M_T = 0. \quad (86a)$$

U izrazima (86 i 86a) su: $m\ddot{x}$, $I\ddot{\varphi}$ sila inercije, odnosno moment inercije, Dx , $D\varphi$ povratna sila, odnosno povratni moment, $K\dot{x}$, $K\dot{\varphi}$ sila trenja, odnosno moment trenja (veličine koje su proporcionalne brzini, npr. trenje u tekućini ili plinu), F_T , M_T Coulombova sila trenja, odnosno moment trenja (trenje čvrstih tijela), K i K^* su konstante trenja (prigušivanje).

Jedinična povratna sila D , odnosno jedinični povratni moment D^* za opruge iznosi prema (18) $D = c = F/f$, odnosno $D^* = c^* = M/\varphi$ i jednak je konstanti opruge.

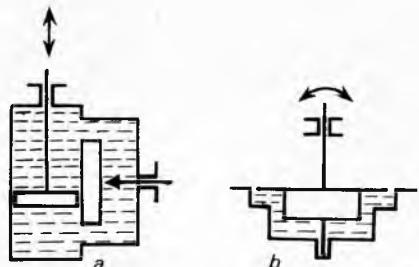
Na sl. 98 a prikazano je slobodno (neprigušeno) titranje bez prigušivanja titranja. Prigušivanje trenjem čvrstih tijela (sl. 98 b) nastaje uslijed trenja u ležajevima. U tom se slučaju amplitude titranja linearno smanjuju. Sustav koji se prigušuje posebnom prigušnicom ima graf amplituda-vrijeme prema sl. 98 c. To je



sustav s relativno manjim trenjem proporcionalnim brzinama. Aperiodečno titranje prikazano je na sl. 98 d. Takvo titranje nastaje ako u sustavu postoji relativno veliko trenje koje je ovisno o brzini. Sa stanovišta prigušivanja taj je slučaj nepovoljan. Amplituda titranja sustava s relativno malim trenjem proporcionalnim brzinama dana je izrazom

$$a = a_0 e^{-\delta t} \cos(\omega t + \psi) \quad (87)$$

pri čemu je a_0 amplituda titranja neprigušenog sustava, $\delta = K/2m$, odnosno $\delta = K^*/2I$ (za rotacijski sustav) (88), gdje su K^* i K konstante trenja,



$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 - \beta^2}, \quad (89)$$

gdje je β konstanta prigušenja koja iznosi

$$\beta = \delta/\omega_0 < 1, \quad (90)$$

$$\omega_0 = \sqrt{D/m}, \text{ odnosno } \omega_0 = \sqrt{D^*/I} \text{ (za rotacijski sustav)}, \quad (91)$$

gdje su D i D^* konstante opruge. ψ je kut faznog pomaka a.

Prigušivanje se primjenjuje osobito za kazaljke i pisala mjernih instrumenata. U tim se slučajevima uzima $\beta \approx 0,8\dots 1$, uz odnos uzastopnih amplituda $\alpha \approx 0,05\dots 0$. On iznosi

$$\alpha = \frac{a_{n+1}}{a_n} = e^{-\delta T/2} \quad (92)$$

U izrazu (92) T je perioda jednog titraja a dan je izrazom:

$$T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (93)$$

Perioda titranja neprigušenog sustava iznosi

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}. \quad (94)$$

Unaprijed odabrani faktor β omogućava i izračunavanje konstante trenja:

$$K = 2\beta \sqrt{mD}, \text{ odnosno } K^* = 2\beta \sqrt{ID^*}. \quad (95)$$

Kao medij za prigušivanje primjenjuje se glicerin, parafinsko ulje ili zrak. Prigušnice mogu biti stupne ili krilne (sl. 99).

• **Spojke** prenose rotacijsko gibanje i moment okretanja s jednog vratila na drugo. Pregled najčešćih vrsta spojaka koje se primjenjuju u finoj mehanici dan je u tabl. 11. Konstrukcija spojaka ovisi o više faktora, i to o relativnom položaju i gibanju vratila

Tablica 11
PREGLED SPOJAKA

<i>Krute spojke</i>	Kolutna spojka	Pandžasta spojka
	Okolna spojka	Tarna spojka
	Spojka s čahurom	Magnetska spojka
	Neposredni spoj	
<i>Akozilne pomicajuće spojke</i>	Kolutna spojka	Tarna spojka
	Spojka Oldham	Centrifugalna spojka
	Kolutna spojka	
<i>Pripajane pomicajuće spojke</i>	Križna spojka	
	Elastična spojka	
<i>Kružno pomicajuće spojke</i>		

u toku rada, što uvjetuje krutu ili pomičnu konstrukciju spojke; o potrebi da se skokovite promjene momenata okretanja priguše, što uvjetuje krutu ili elastičnu konstrukciju; o potrebi da se spojka u toku rada iskopčava i ukopčava, što uvjetuje isključnu konstrukciju; o ograničenju veličine momenta koji spojka smije prenijeti, ili o ograničenju broja okretaja ispod kojeg spojka ne smije prenositi okretanje, što uvjetuje sigurnosnu izvedbu i, konačno, o zahtjevu da se okretanje smije prenositi samo u jednom smjeru okretanja, što uvjetuje jednosmernu konstrukciju spojke. Krute spojke primjenjuju se kad su vratila stroga koaksijalna i kad nema udarnih opterećenja. Između krutih spojkâ u finoj mehanici daje se prednost spojkama s čahurom jer su one vrlo jednostavne.

Pomične spojke izraduju se u mnogobrojnim varijantama. Jednostavnost se odlikuju Oldhamova spojka i elastična spojka (v. tabl. 14). Isključne su spojke pretežno tarne. Ukapčanje pandžastih i tarnih isključnih spojkâ može biti mehaničko, hidrauličko, pneumatičko ili elektromagnetsko. Tarne spojke služe i kao sigurnosne spojke. Za vrijeme preopterećenja na tarnim ploham dolazi do proklizavanja. Centrifugalne tarne spojke omogućavaju postepeno opterećivanje pogonskih motora. I među jednosmernim spojkama pretež tarne spojke. Dvije karakteristične izvedbe jednosmernih tarnih spojkâ predviđene su u tabl. 14. Dimenzioniranje spojkâ provodi se na isti način kao i u strojogradnji, naročito ako se radi o većem zakretnom momentu.

Uklopnići

Skupni naziv uklopnići obuhvaća finomehaničke elemente za podešavanje, i to prekidače, koji se još mogu nazvati taktnim prigonima, zapinjače, prekretne zapinjače, uskočnice i prekretne uskočnice. Sheme glavnih vrsta uklopnika dane su u tabl. 12.

Taktni prigoni ili prekidači sastoje se od pogonskog člana, gonjenog člana i graničnika. Periodično gibanje pogonskog člana pretvara se u isprekidano, kočno gibanje gonjenog člana. Graničnik onemogućava povratno gibanje gonjenog člana. Stupanj ukopčanosti u gonjenog člana iznosi

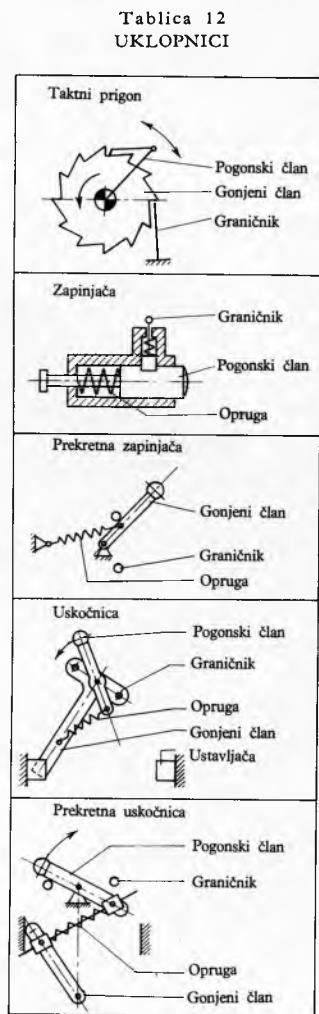
$$u = \frac{t_k}{t_k - t_m}. \quad (96)$$

U izrazu (96) je t_k vrijeme gibanja gonjenog člana, t_m vrijeme mirovanja gonjenog člana.

Konstruktivne izvedbe prekidača vrlo su raznolike. Primjenjuju se zupčasti, zvezdasti i magnetski prekidači, kao i prekidači s malteškim križem.

Zapinjače se sastoje od opruge, pomičnog člana i graničnika. Pomični član ima dva stabilna položaja: napeti i odapeti. Prijelaz iz napetog u odapeti položaj je skokovit, a odvija se uslijed djelovanja opruge. Povratak u napeti položaj moguće je uz upotrebu vanjske sile. Pomični član može služiti kao upravljavni graničnik, kao nosilac signala (tastature) i slično.

Prekretne zapinjače razlikuju se od običnih zapinjača po tome što je opruga u oba stabilna položaja najmanje napeta. Opruga je najnapetija kad se gonjeni član nalazi u labilnom stanju. Gonjeni član može se prevesti iz jednog stabilnog stanja u drugo samo uz upotrebu vanjske sile.



Uskočnica (v. tabl. 15) sastoji se od pogonskog člana, gonjenog člana, opruge, graničnika i ustavljača. Uskočnice karakterizira skokovito gibanje gonjenog člana, koje započinje tek što je pogonski član prešao određeni put.

Prekretna uskočnica (v. tabl. 15) ima također dva stabilna položaja gonjenog člana. Ono što karakterizira prekretne uskočnice jest mogućnost da se opruga napre ili opusti u svakom od stabilnih položaja. Gibanje gonjenog člana za vrijeme odapinjanja je skokovito.

Regulatori

Razvoj tehnike upravljanja i regulacije tehničkih procesa izdvajao je regulator u posebnu skupinu tehničkih uredaja koji se ne tretiraju više kao finomehanički elementi. To je i sa stanicama fine mehanike u užem smislu prihvativljivo, jer se regulatori sve više grade pomoću elektroničkih, pneumatičkih i drugih nemehaničkih dijelova. Stoga se u okviru ovog pregleda regulatori ne razmatraju (v. *Regulacija*).

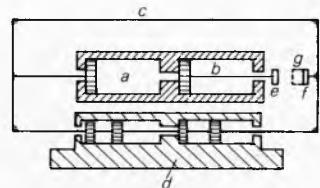
FINOMEHANIČKA TEHNOLOGIJA

Tehnologija izrade i proizvodnje finomehaničkih dijelova i proizvoda u znatnoj je mjeri jednaka ili slična tehnologiji koja se primjenjuje u strojogradnji. Međutim, vrlo jak razvoj finomehaničke tehnike sve više nameće uvođenje novih tehničkih postupaka. Tome osobito pridonosi primjena materijala koji se moraju odlikovati ne samo mehaničkim već i magnetskim, električnim i ostalim svojstvima. Ti su materijali često osjetljivi na naprezanja koja nastaju pri klasičnim postupcima obrade, pa se nužno moraju primjenjivati novi podobniji postupci obrade. U finoj mehanici primjenjuju se često i minijaturni elementi koji se ne mogu izraditi bez lupe i mikroskopa te posebnih alata, naprava i strojeva, a i velikoserijska proizvodnja traži ekonomičnije tehnološke postupke.

U idućem izlaganju bit će opisano nekoliko novijih tehničkih postupaka koji se sada češće primjenjuju u finomehaničkoj proizvodnji. To su: plastično oblikovanje metala primjenom udarne ekspanzije zraka; obrade metala primjenom udarnih valova; plastično oblikovanje metala primjenom jakog magnetskog polja; obrade primjenom ekstremno gustih tokova energije; obrade s pomoću ultrazvuka; kemijske i elektrokemijske obrade; obrade u vakuumu i izrada poluvodičkih integriranih sklopova.

Plastične deformacije primjenom udarne ekspanzije zraka. Na prešama lim se plastično oblikuje žigom. Kinetička energija žiga, $W_k = \frac{1}{2} m v^2$, mora biti jednak radu deformacije. Povećanje kinetičke energije može se ostvariti bilo povećanjem mase m bilo povećanjem brzine v . U finomehaničkoj praksi dana je prednost većim brzinama jer se kinetička energija povećava s kvadratom brzine.

Na sl. 100 prikazana je shema preše s udarnom ekspanzijom zraka (Dynapak). Nacrtan je položaj neposredno prije početka radnog taktu. U komori a radnog cilindra vlada visoki tlak, a u komori b nizak tlak. Klip u komori b brtvi spojni kanal između komora a i b . Poveća li se makar neznatno tlak u komori a , naruši se ravnoteža i klip u komori b odmiče se od čeone plohe pa visoki tlak komore a počinje istog trena djelovati na čitavu površinu klipa. To narušavanje ravnoteže klipa u komori b odigrava se u vremenu reda veličine ~ 1 ms. Tlak komore a , dakle, prenosi se na klip u obliku udara, koji je praćen velikim ubrzanjem, pa se može postići konačna brzina klipa od 135 m/s. Istovremeno dok se klip komore b giba unesno, radni cilindar s komorama a i b , kao i okvir c , gibaju se ulijevo nošeni nepomičnim postoljem d . Izrada g oblikuje se sudarom sa žigom e . Sila se sudara preko matrice f , prenosi na okvir c , pa se ovaj počinje gibati unesno. To se gibanje koči pomoću klipa u komori a . Po završenom se radnom taktu pomoću hidrauličkih cilindara u postolju d vraća okvir c u početni položaj. I radni cilindar dovodi se u početni



Sl. 100. Preša s udarnom ekspanzijom zraka (Dynapak). a Komora za kočenje, b radna komora, c okvir, d postolje, e žig, f matrica, g izrada

položaj. Time se ujedno i komprimira zrak u komori *a*, pa je preša ponovo spremna za novi radni takt. Osobito se dobri učinci postižu plastičnim oblikovanjem u vrućem stanju. Tako se mogu oblikovati dijelovi vrlo složenog oblika, kao što su npr. rotori malih turbin i slično.

Obrade metala primjenom udarnih valova. Postupak obrade metala primjenom udarnih valova zasniva se na naglom oslobođenju energije, koja se posredstvom nekog medija (tekućine ili plina) u obliku udarnog vala prenosi do izratka koji treba obraditi (sl. 101). Kao izvor energije primjenjuju se smjesa kisika i vodika, barut, različiti drugi brizantni (razorni) eksplozivi ili plazma što je stvara visokonaponsko električno pražnjenje. Između klasične mehaničke obrade i obrade udarnim valovima postoje suštinske razlike i to u brzinama, tlakovima, snagama i načinu odvijanja obrade. Početne su brzine udarnih valova reda veličine do $9\,000 \text{ m/s}$, a tlakovi iznose i do $5 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$. Dok

su snage većih preša reda veličine 10^5 N m/s , već ostvarene snage udarnih valova (s pomoću brizantnih eksploziva) reda su veličine 10^{12} N m/s . Pri mehaničkom oblikovanju prenosi se sila postepeno od sredine izratka prema rubovima (sl. 102 a), a pri oblikovanju udarnim valovima sila se prenosi odjednom po cijeloj površini, pa se sve zone izratka istovremeno deformiraju (sl. 102 b). Zato je kvalitet površine bolji, a debljina stijenki jednoličnija.

Postupak s udarnim valovima primjenjuje se za plastično oblikovanje, prešanje praškova, površinsko kaljenje, platiranje, rezanje i probijanje (v. poglavlje Neke specijalne primjene eksploziva u članku *Eksplozivi*, TE 3, str. 536).

Tim postupkom mogu se plastično oblikovati dijelovi s tankim stijenkama vrlo složenih oblika. Prešanjem prašaka izrađuju se pločice, diskovi, svornjaci, prstenovi, cijevi, cilindri i šupljii dijelovi složenijih oblika. Prešati se mogu metalni praškovi od titana, niobijuma, željeza, nikla, bakra i drugi, kao i keramički i ne-metalni praškovi, pa i smjese jednih i drugih. Rezanje i probijanje obično se ostvaruje u pogodnim kalupima istovremeno s plastičnim oblikovanjem.

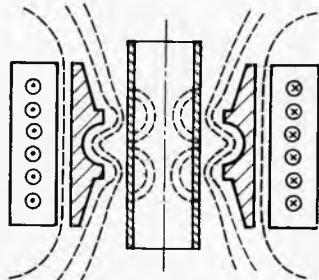
Fizikalna suština površinskog kaljenja s pomoću udarnih valova još nije razjašnjena. Činjenica je, međutim, da se površinskim kaljenjem neumirenih austenitnih čelika postiže struktura slična martenzitnoj, s tvrdocom koja je i do tri puta veća od početne. Velika prednost površinskog kaljenja je mogućnost da se kale samo određena mjesta izratka, da nastaje opće poboljšanje strukture materijala, a da pri tome izostaju negativne popratne pojave termičkog kaljenja.

Platiranje (oblaganje) je postupak spajanja dvaju ili više tanjih limova od različitih materijala u jedan deblji lim. Mehanički se platira valjanjem, izvlačenjem ili prešanjem. Prema tome mehanički se mogu platirati materijali kojima se temperature plastične obrade bitno ne razlikuju. Čelik i bakar se mehanički dobro platiraju za razliku, npr., od čelika i tantala, kojima je razlika temperatura taljenja velika. Postupak s udarnim valovima omogućava platiranje i takvih materijala koji se ne mogu mehanički platirati. Prilikom platiranja udarnim valovima čestice se materijala na dodirnim površinama sudaraju velikom brzinom. Usljed trenja raste temperatura graničnog sloja pa se materijali koji se platiraju uz popratno djelovanje visokog tlaka jedan s drugim zavare.

Obrada udarnim valovima odlikuje se malim kapitalnim ulaganjem, jeftinocom alata, smanjenjem broja operacija obrade, točnošću dimenzija i oblika izratka i mogućnošću obrade materijala velike čvrstoće i visoke temperature taljenja. Upravljanje

procesom je, međutim, složeno. Osim toga, upotreba eksploziva zahtijeva posebne mjere sigurnosti.

Plastično oblikovanje metala primjenom jakog magnetskog polja. Plastično oblikovanje metala primjenom jakog magnetskog polja zasniva se na elektromagnetskoj indukciji. Izradak se nalazi unutar svitka. Promjena struje u svitku prouzrokuje u izratku suprotnu struju i suprotno magnetsko polje. Nastale magnetske sile deformiraju izradak. Magnetsko polje može se posebno profiliranim dijelom oblikovati tako da se postigne željena plastična deformacija izratka (sl. 103). Obradivati se mogu samo materijali koji su dobri vodiči elektriciteta, kao bakar, aluminijum i, donekle, čelik. Kako je snaga uredaja ograničena, mogu se obradivati limovi samo do 2 mm debljine, ovisno o njihovim karakteristikama.



Sl. 103. Plastično oblikovanje primjenom magnetskog polja

Obrane primjenom ekstremno gustih tokova energije. Ekstremno gusti tokovi energije primjenjuju se za rezanje, bušenje, profiliranje površina, zavarivanje, navarivanje i kaljenje. U ove se postupke ubrajuju: elektroimpulsne obrade, obrade elektroerozijom, obrade plazmenim plamenom, obrade mlazom elektrona i obrade laserskim zrakama.

Elektroimpulsne obrade su toplinske operacije koje se primjenjuju za lokalno površinsko kaljenje i za zavarivanje. Za zagrijavanje mjesta obrade služe strujni impulsi.

Elektroimpulsno kaljenje. Izradak se umeće u pogodno oblikovani svitak što ga jakim strujnim impulsima napaja generator visoke frekvencije (v. tabl. 3 u članku Elektrotermija, str. 189). Naponi što se induciraju u izratku uzrokuju vrtložne struje koje zbog skin-efekta (v. Električni vodovi, TE 4, str. 227) teku samo u njegovom površinskom sloju i time ga ugriju na temperaturu potrebnu za kaljenje. Po završenom impulsu slijedi prirodno hlađenje. Postupak se može i automatizirati.

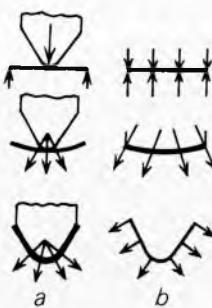
Ponekad se strujni impuls prenosi i izravno na izradak, u tom slučaju struja teče između dviju elektroda koje se stave na izradak.

Toplina koja se prolaskom struje stvara na određenim mjestima površine izratka jest mala, ali se koncentriра na mali dio izratka. Stoga ostali dijelovi izratka ostaju hladni, pa je prirodno hlađenje dovoljno da se zagrijane zone zakale. Impulsno površinsko kaljenje je naročito podobno za kaljenje reznih alata.

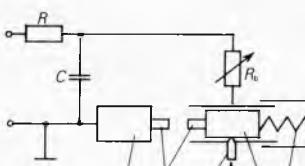
Elektroimpulsno zavarivanje. Pri tom načinu zavarivanja služi nabijeni kondenzator kao izvor električne energije. Iskrama koje se stvaraju prilikom izbijanja kondenzatora zagrije se mjesto koje se želi zavariti. Izraci *b* koje treba zavariti učvrste se na elektrodomu *a* (sl. 104). Pošto se preko otpornika *R* kondenzator *C* nabije električnom energijom, otponcem *d* oslobada se pomicna elektroda, pa se ona uslijed djelovanja opruge *c* pomiče prema nepomičnoj elektrodi. Kad se izraci dovoljno približe, dolazi do izbijanja kondenzatora iskrama.

Ove toliko zagriju spoje površine da se one u trenutku dodira zavare uz pritisak. Energija potrebna za zavarivanje može se mijenjati promjenljivim balastnim otpornikom *R*. Vrijeme zavarivanja traje $\sim 1 \text{ ms}$. Debljina zavarenog sloja iznosi $\sim 0,2 \dots 0,3 \text{ mm}$, pa je tim postupkom moguće zavarivati limove do 0,5 mm bez vidljivih tragova na naličju.

Elektroerozija iskrrom češće se primjenjuje u finoj mehaničkoj. To je elektrotermički proces pri kojem se čestice materijala odvajaju s izratka nemehaničkim putem s pomoću električnog iz-



Sl. 102. Usporedba postupaka plastičnog oblikovanja. a) Mekaničko oblikovanje, b) oblikovanje udarnim valovima

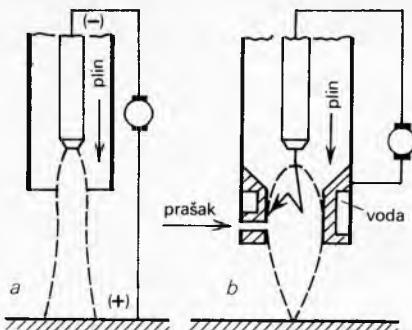


Sl. 104. Shema impulsnog zavarivanja izbijanjem kondenzatora. a) Elektrode, b) izrada, c) opruga, d) otponac

bijanja iskrama. Do pražnjenja dolazi između dviju suprotno nabijenih elektroda koje sačinjavaju izradak *I* i alat *E*, i koje su uronjene u neku nevodljivu tekućinu velike dielektričnosti *D* (sl. 105). Izradak i alat moraju biti od električki vodljivog materijala. Toplina se prenosi na izradak isijavanjem s usijane plazme u kanalu izbijanja. Električna energija dovodi se elektrodama slijedom kratkih električnih impulsa. Napon, polaritet i impulsna frekvencija biraju se prema obrađivanom materijalu i odabranom postupku.

Cestice nečistoće u dielektriku stvaraju na najužim mjestima neke vrste most, pa tu dolazi do proboga koji traje svega $\sim 10^{-9}$ s. Na mjestu proboga nastaju temperature od 6 000...9 000 K, uslijed čega se materijal izratka na tom mjestu rastali, a dijelom i ispari. Sličan proces odvija se na elektrodi—alatu. Trošenjem se smanjuje geometrijska točnost elektrode—alata. Ponekad se primjenjuje elektroda—alat u obliku žice koja se odmotava. Trošenje te elektrode ovisi o materijalu alata i izratka. Što je toplinska i električka vodljivost elektrode—alata veća to je njeno trošenje manje. Površina obrade izratka sastoji se od niza malih kratera. Osnovna razlika između mehaničkog i elektroerozijskog skidanja strugotine je u tome što pri elektroeroziji između izratka i alata ne postoji neposredan dodir. Elektroerozijom mogu se obradivati vrlo tvrdi i žilavi materijali. Geometrijski oblik izratka nije uvjetovan relativnim gibanjem izratka i alata, već ga određuje oblik alata. Zato se elektroiskrenjem mogu izradavati vrlo složeni oblici, kao što su npr. različiti kalupi, žigovi, matrice i slično. (V. *Elektroerozijska obrada*, TE 4, str. 355.)

Obrada plazmenim plamenom je termički postupak. Plazma je smjesa elektrona, iona i neutralnih atoma plina. Ona nastaje samo na visokim temperaturama koje uzrokuju raspadanje molekula plina i odvajanje elektrona od atoma. Plazma se stvara npr. i pri elektrolučnom zavarivanju u atmosferi argona (sl. 106 a), ali se taj postupak ne ubraja u postupke obrade s plazmenim plamenom. Za stvaranje plazmenih plamena služe posebni plazmeni gorionici (sl. 106 b). U njima se dovedeni plazmeni plin pomoću električnog luka pretvara u plazmu koja zatim velikom brzinom struji kroz otvor negativne elektrode gorionika. Bitna je



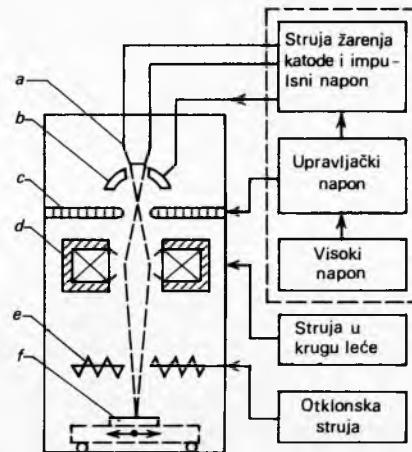
Sl. 106. Plazmeni plamenik. *a* Elektrolučno zavarivanje u atmosferi argona, *b* plazmeni plamenik

odlika plazmenog plamena da se njegov mlaz može na podoban način suziti i usmjeriti i time postići velika koncentracija toplotnog toka na maloj površini. Time se u jezgri plamena postižu temperature do $\sim 24\,000$ K. Za stvaranje plazme upotrebljavaju se argon, helijum, zrak, dušik i vodik. Specifična snaga iznosi u plazmenom plamenu $10^9\ldots 10^{10}$ W/m², dok se acetilenskim plamenikom može postići svega $10^7\ldots 10^8$ W/m². Zato je plazmenim plamenum moguće rezati nerđajuće čelike, aluminijum, bakar i njihove legure, što normalnim acetilenskim plamenom nije moguće. Osim za rezanje, plazmeni se plamen primjenjuje za izradu fazonskih dijelova od teško topljivih tvrdih metala koji se inače mogu izradavati još samo prešanjem i sraščivanjem. U tu svrhu plazmenim plamenum se rastali i rasprši metal i nanosi

na kalup. Kalup se naknadno odstranjuje. Na taj se način npr. izrađuju sapnice od volframa. (V. *Elektrotermija*, str. 195, *Plazma i Metalizacija*.)

Obrada mlazom ubrzanih elektrona je elektrotermički postupak koji se primjenjuje za zavarivanje toplinski osjetljivih materijala kao što su cirkon, titan, volfram i sl., za zavarivanje bez popratnih deformacija dijelova koji su već prošli završnu strojnu obradu i za rezanje, bušenje i točkasto zavarivanje u finoj mehanici i mikroelektronici.

Takov je uređaj detaljno opisan u čl. *Elektrotermija*, str. 196. Shematski je takav uređaj prikazan na sl. 107. Snop elektrona što se stvara i formira u elektronskom topu (*a, b i c*) usmjerava se prema uzemljenoj anodi koju sačinjava izradak. Uredaji s elektronskim mlazom rade s naponom 10...150 kV stalno ili impulsno (za veće snage). Mlaz elektrona pomoći sustava magnetskih leća *d* skuplja se i zatim pomoći otklonskog svitka *e* usmjerava na određeno mjesto izratka *f*. U žarištu, koje se nalazi na izratku,



Sl. 107. Strukturalna shema generatora elektronskog mlaza. *a* Užarena katoda, *b* upravljački cilindar, *c* anoda, *d* magnetska leća, *e* otklionski svitak, *f* izradak

specifična snaga elektronskog snopa doseže do 10^{13} W/m². Pri naponu katode od -150 kV, prema izratku koji je na potencijalu zemlje, brzina elektrona iznosi pri udaru na izradak $2/3$ brzine svjetlosti. Elektroni prodiru u izradak do dubine $\sim 0,01$ mm i pri tome predaju svoju kinetičku energiju materijalu izratka, pri čemu se ona pretvara u toplinu. Zbog velike gustoće energije materijal izratka gotovo trenutno se isparava i time je omogućeno da mlaz elektrona djeluje na slijedeći sloj materijala. Tako npr. elektronski snop specifične snage 10^{13} W/m², ubrzan naponom od 100 kV, ispari sloj volframa debljine $8 \mu\text{m}$ u roku od $\sim 10^{-8}$ s. Obrada elektronskim zrakama obavlja se u vakuumu reda veličine 10^{-4} mmHg. Taj se vakuum održava automatski reguliranim ispumpavanjem zraka. Obrada elektronskim mlazom osobito je korisna u mikroelektronici. Pomoći mlaza ubrzanih elektrona moguće je, npr., bušiti prvrte promjera $2 \mu\text{m}$, žlijebiti površinu na dubinu od $3 \mu\text{m}$ i sl.

Obrada laserskim zrakama. Lasera ima nekoliko vrsta (v. čl. *Laseri*). Oni su izvori intenzivnog koherentnog vidljivog ili infracrvenog svjetla koje zrači u vrlo uskom snopu (do 1°). Zračena je svjetlost praktički monokromatska. Na osvijetljenoj površini može se postići znatna specifična snaga (do 10^{11} W/m²) što je dovoljno za topljenje svih metala. Za rad nije potreban vakuum. Najmanja površina koja se može tim postupkom obraditi iznosi $\sim 10^{-7}$ cm². Taj način obrade još nije našao široku primjenu, ali se mogu naslutiti znatne mogućnosti. Za sada se laseri primjenjuju uglavnom za bušenje minijaturnih prvrta, zavarivanje minijaturnih dijelova i justiranje elemenata integriranih sklopova (v. *Elektronika, Sastavni dijelovi*, TE 4, str. 487), a u poluvodičkoj tehnici za lokalno legiranje i dotiranje (dopiranje).

Obrada pomoći ultrazvukom. Ultrazvučna obrada skup je mehaničkih postupaka pri kojima alat izvodi mehaničke titrage frekvencijom većom od 20 kHz. Za stvaranje mehaničkih ultra-

zvučnih titraja služe posebni pretvornici koji se uzbudjuju na elastično titranje pomoću električnih titraja. Takvi pretvornici rade na magnetostriktivnom ili piezoelektričnom principu. Rad magnetostriktivnih pretvornika zasniva se na svojstvu nekih (feromagnetskih) materijala (npr. nikla, kobalta i dr.; v. *Elektrotehnički materijali*, TE 5, str. 53) da pod utjecajem magnetskog polja mijenjaju svoje dimenzije, tj. da se stežu i rastežu. Piezoelektrični pretvornici, pak, zasnivaju se na svojstvu nekih materijala (kvarca, barijum-titanata, barijum-cirkonata i dr.), da se stežu i rastežu u promjenljivom električnom polju. Magnetostriktivni pretvornici na koje se preko odgovarajućeg držača učvršćuju alati služe pretežno za obrade s odvajanjem čestica izratka (bušenje, upuštanje, glodanje, brušenje i tokarenje) i za zavarivanje, a piezoelektrični pretvornici primjenjuju se češće za intenzifikaciju procesa u tekućinama (npr. čišćenje dijelova) time što ultrazvuk prenose na tekućine.

Shema uredaja za obradu s odvajanjem čestica izratka prikazana je na sl. 108 (v. *Akustika*, TE 1, str. 67). Magnetski pretvornik pobuduje se izvorom električnih titraja. Amplituda titranja pretvornika, koja je reda veličine $10 \mu\text{m}$, povećava se prikladno oblikovanim koncentratorom na potrebnih $30\text{--}80 \mu\text{m}$. Na kraju koncentratora učvršćen je alat, koji ima profil potrebnog površta. Između alata i izratka nalazi se abrazivna tekućina. Čestice se izratka odvajaju u ravni okomitoj na pravac titranja.

Pri čišćenju dijelova jedan ili više izradaka uranjuju se u tekućinu, koja može biti kemijski aktivna ili neutralna. Titranje ultrazvučnog pretvornika prenosi se na kupku i dalje kroz tekućinu do izratka. Čišćenje izratka nastupa kao rezultat kavitacije na njegovim stijenkama. Kavitacija je pojava stvaranja u tekućinama šupljine u kojima vlada nizak tlak (što pogoduje odvajaju nečistoća).

Ultrazvučno zavarivanje omogućava spajanje tankih limova (do 2 mm) bez zagrijavanja uz relativno male pritiske. Alat spojen na pretvornik i pritisnut na spojno mjesto izaziva na površinama koje se zavaruju poprečno titranje (u smjeru dvostrukih strelica) s amplitudama od nekoliko μm (sl. 109). Titranjem odstranjuje se oksidni pokrov, pa uz vrlo male plastične deformacije dolazi do difuzije i stvaranja zajedničkih kristala koji povezuju zavarene dijelove. Ultrazvučno zavarivanje može biti točkasto ili šavno (v. članak *Ultrazvuk*).

Kemijske i elektrokemijske obrade su jednim dijelom zamjena za neke klasične oblike obrade, a drugim dijelom posve novi postupci koji omogućavaju obrade kakve se klasičnim postupcima ne mogu ostvariti. U tu se skupinu obrada ubraja: anodnomehanička obrada, električno bojenje i plastificiranje, fotokemijska izrada tiskanih shema i konturno jetkanje.

Anodnomehanička obrada (eliziranje) je postupak u kome se materijal skida s metalnog izratka (anode) elektrolitskim otapanjem bez katodnog taloženja. Te se operacije obavljaju uz relativno posmak alata (katode) prema metalnom izratku (anodi), a uz primjenu velike gustoće struje, koju daje neki vanjski izvor, i velike brzine strujanja elektrolita između objiju elektroda. Metalni ioni koji nastaju otapanjem s izratka izbijaju se na katodi, ali se ne talože, već ih struja elektrolita odnosi u obliku praška. Cijeli postupak eliziranja vrlo je detaljno opisan u članku *Elektrokemijska obrada*, TE 4, str. 393.

Osnovna odlika anodne obrade jest u tome što se elektrode izratka i alata ne dodiruju neposredno. Na sl. 110 prikazan je shematski uredaj za anodnomehaničko dubljenje. Između

alata (elektrode) *a* i izratka *b* protječe elektrolit. Alat se pomiče u smjeru izratka. Elektrolit struji od rezervoara *d* kroz pumpu *e*, filter *f*, između izratka i alata natrag u rezervoar *d*. Izradak je spojen na plus-pol, a alat na minus-pol izvora struje. Anodnomehaničkom obradom može se bušiti, dubiti, tokariti, glodati, rezati, brusiti, polirati i skidati srh. Kvalitet obrađenih površina vrlo je visok. Neravnost površina i pri najvećim učincima odvajanja materijala izratka ne prelazi $0,5\text{--}5 \mu\text{m}$. Mehanička svojstva materijala, npr. velika tvrdoća ili krtost, ne ograničavaju mogućnosti obrade jer između izratka i alata nema neposrednog kontakta. Geometrijski oblik izratka nije uvjetovan relativnim gibanjem alata i izratka, pa je moguće obrađivati izratke vrlo složenih oblika, kao npr. lopatice minijaturnih turbin. Uz tlak elektrolita od $15\text{--}10^5 \text{ N/m}^2$ mogu se postići učinci $10 \text{ cm}^3/\text{min}$ skinutog materijala. Osnovni nedostatak anodnomehaničke obrade je potreba da se dimenzije i oblik alata utvrde ispitivanjem.

Električno ličenje i plastificiranje površina izradaka primjenjuje se radi zaštite površina od korozije, radi izolacije ili radi lijepog izgleda. Osim poznatih mehaničkih postupaka (razbrizgavanja pokrovног materijala ili uranjanja izratka u pokrovni materijal) u novije vrijeme sve više ove postupke nadomještaju elektrostaticke ili elektrokinetičke metode (v. *Elektrokinetičke operacije*, TE 4, str. 397 i *Elektrostaticke operacije*, str. 43).

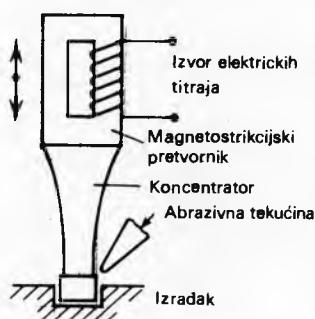
Fotokemijska izrada tiskanih krugova. Tiskani krugovi služe kao zamjena za nekadašnje šasije i spojne žice u električnim uredajima. Oni se sastoje od izolacijske ploče na kojoj se nalazi više bakrenih ili srebrnih pruga debljine nekoliko stotinki milimetara, kojima se medju sobom električno povezuju na ploču montirani minijaturni sastavni dijelovi, a eventualno i integrirani sklopovi u elektroničkim uredajima.

Primjena tiskanih krugova, a naročito integriranih sklopova (o kojima se govori kasnije) mnogo je pridonijela brzom razvoju suvremenih elektroničkih uredaja.

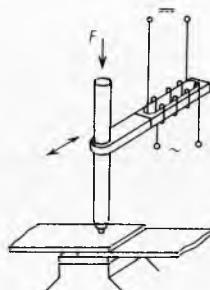
Tiskani se krugovi izrađuju na ploči od izolacijskog papira, keramike ili epoksidne smole ojačane staklenim vlaknima. Za izradu spojnih pruga na tim izolacijskim podlogama primjenjuju se različiti postupci. Neki se sastoje u tome da se te pruge nekim postupkom (galvanskim, elektrolitičkim, prešanjem ili štrcanjem) izravno izrade na podlozi. Kod drugih se postupaka s izolacijske ploče, koja je s jedne strane u cijelosti pobakrena, skine npr. jetkanjem, štancanjem itd. bakarni sloj na mjestima gdje je suvišan tako da preostaju samo spojne pruge (vodovi).

Najčešće se primjenjuje fotokemijski postupak jetkanjem. Taj se postupak zasniva na svojstvu kromovih soli da pomiješane s pogodnom vrstom laka čine taj lak osjetljivim na svjetlo. Osvijetljena mjesta tankog sloja takvog laka postaju netopljiva u otapalu. Osvijetli li se lakirana površina kroz negativ sheme, dijelovi lakirane površine ispod linija sheme postaju netopljni. Otapanjem u otapalu odstranjuju se neosvijetljeni slojevi laka. Površine bakra koje nisu prekrivene lakovom odstranjuju se zatim (jetkanjem, nagrizanjem) pomoću bakar-klorida ili drugog prikladnog sredstva. Postupak izrade štampanih krugova završava se pranjem i neutralizacijom.

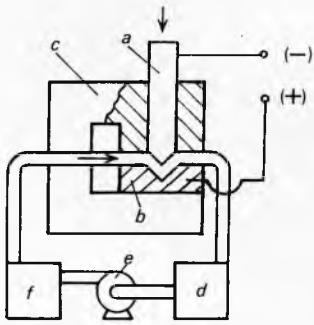
Prije lakiranja površina bakra mora biti pažljivo dekapirana, očišćena i odmašćena. Dekapiranjem se odstranjuje oksidna kožica na površini metala. Za lakiranje se najviše upotrebljava laka od sintetske smole koji je kemijski otporan prema sredstvima za jetkanje. Debljina sloja laka treba da je jednolična. Zato se laka nanosi na sredinu ploče koja rotira. Centrifugalna sila zatim raznese laku po cijeloj površini. Debljina sloja laka je reda veličine nekoliko tisućinki milimetra. Laka se suši infracrvenim zrakama prema kojima je laka neosjetljiv. Negativ sheme mora dobro nalijegati na lakiranu površinu. Zato se ploča s negativom ulaze



Sl. 108. Ultrazvučno odvajanje čestica



Sl. 109. Ultrazvučno zavarivanje



Sl. 110. Shema uredaja za dubljenje anodnomehaničkom obradom (eliziranjem). *a* Elektroda, *b* izradak, *c* postolje, *d* rezervoar, *e* pumpa, *f* filter

u okvir s prozirnim ploham. Nakon što se iz okvira isiše zrak, negativ dobro nalegne na ploču. Eksponiranje (osvjetljavanje) provodi se izvorom svjetlosti koji zrači svjetlo na valnoj duljini prema kojoj je lak osjetljiv. Razvijač (otapalo) se bira prema vrsti laka. Jetkanje uskih i tankih konfiguracija je to uspješnije što se brže sprovodi. Zato se otapalo najčešće raspršava i štrca s određene udaljenosti na ploču. (Slika i neki podaci o tiskanim krugovima mogu se naći u članku *Elektronika, Sastavni dijelovi*, TE 4, str. 485).

Konturno jetkanje (izrezivanje jetkanjem). U finoj mehanici i elektronici stalno se teži smanjivanju konstrukcionih elemenata. Sve veća je primjena dijelova koji se izraduju od lima debljine $0,05\text{--}0,2$ mm. Zato je tehnika mehaničkog oblikovanja (štancanje) tih dijelova sve manje prikladna. To naročito vrijedi za male i srednje serije i za eksperimentalnu proizvodnju. U navedenim slučajevima troškovi alata za mehaničku obradu postaju nepodnošljivo veliki. Zato se za takvu proizvodnju sve više primjenjuje obrada konturnim jetkanjem.

Postupak konturnog jetkanja u osnovi je identičan postupku fotokemijske izrade tiskanih krugova. Razlika je u tome što se lim potpuno izjetka i što se jetkaju različiti materijali. Brzina jetkanja nije jednaka u svim smjerovima grananja kristala. Ovo se to više očituje što jetkanje dulje traje. Stoga se nastoji da jetkanje traje što kraće. Materijali sa sitnozrnatom strukturom bolje se jetkaju. Najbolje se jetka bakar. Legura željeza s niklom, kobaltom i germanijumom jetkaju se srednje dobro. Silicijum smanjuje jetkavost čelika. Legura se aluminijuma najlošije jetka. Mehanička svojstva ne utječu na jetkanje; jednako se mogu jetkati i meki i tvrdi materijali. Konturnim jetkanjem općenito se postižu veće točnosti nego štancanjem. Točnost je to veća, što je debljina lima manja.

Obrade u vakuumu. U suvremenoj tehnologiji sve više se primjenjuju prerađe materijala i obrade dijelova koje se odvijaju u vakuumu. Opseg postupka kreće se od otpolinjanja transformatorskog ulja i izrade električnih cijevi do pokrivanja površina jednog materijala tankim slojem drugog materijala. Pokrivanje površina od posebnog je značenja u finomehaničkoj i električkoj tehnici.

Proces pokrivanja u vakuumu može se razložiti u tri faze: isparavanje, prijenos i kondenzacija pokrovnega materijala na površini koja se pokriva. Isparavanjem se pokrovni materijal razlaže na molekule, odnosno atome. Uzme li se u obzir da je red veličine srednje molekule $4 \cdot 10^{-10}$ nm, izlazi da je za debljinu pokrovneho sloja od $1 \mu\text{m}$ potrebno 2 500 slojeva molekula. Iz navedenog je očito da se pokrivanjem u vakuumu mogu postići vrlo tanki pokrovni slojevi. Prema veličini vakuma razlikuju se postrojenja sa srednjim vakuumom ($10^{-1}\text{--}10^{-3}$ mmHg), visokim vakuumom ($10^{-3}\text{--}10^{-6}$ mmHg), i ultravisokim vakuumom ($10^{-6}\text{--}10^{-9}$ mmHg). Ta podjela ima orijentacijski karakter, jer već postoje postrojenja s vakuumom većim od 10^{-9} mmHg. Za pokrivanje površina pokrovnim slojem veličina vakuma ima bitan utjecaj, jer utječe kako na isparavanje tako i na prijenos i kondenzaciju pokrovneho materijala. Što je niži tlak niža je i temperatura isparavanja. Pri tlakovima nižim od 10^{-4} mmHg, broj molekula zraka je tako malen da se čestice isparenu pokrovnu materijalu gibaju pravocrtno (jer se ne sudaraju sa česticama zraka). Pri tlaku od 10^{-5} mmHg u 1 cm^3 vakuumske komore nalazi se još uvijek 10^{11} molekula zraka. Dio tog zraka taloži se zajedno s pokrovnim materijalom na površinu izratka i tu dijelom keminski reagira s parama pokrovneho materijala, a dijelom biva apsorbiran. Zato tlak u vakuumskoj komori pada. Broj molekula zraka u pokrovnom sloju proporcionalan je broju molekula u vakuumskoj komori i obrnuto proporcionalan vremenu pokrivanja. Tako je npr. broj molekula u pokrovnom sloju isti pri tlaku od 10^{-8} mmHg i trajanju pokrivanja od 1 000 s, kao pri tlaku od 10^{-5} mmHg i trajanju pokrivanja od 1 s. Kako je zrak u pokrovnom sloju nepoželjan, očita je prednost majnijih tlakova. Ispareni pokrovni materijal samo se dijelom kondenzira na površini izratka, a preostali dio, kako se smatra, trenutno se ponovno ispari. Kako bi se izbjegle neželjene ili postigle željene reakcije, atmosfera u vakuumskoj komori može se obogatiti određenim plinovima. Pokrovni materijal se isparava različitim postupcima grijanja.

Primjenjuju se ovi postupci: katodno isparavanje (katodno raspršivanje), grijanje volframovom spiralom, i to neposrednim kontaktom spirale i pokrovnog materijala ili zračenjem. Dobri efekti se postižu grijanjem pomoću elektronskih zraka. Indukcijsko zagrijavanje se u tehniči pokrivanja ne primjenjuje.

Posebna pažnja mora se posvetiti čišćenju kako izratka tako i vakuumske komore. Izradak se čisti u dvije etape. U prvoj etapi mogu se primijeniti uobičajene metode, npr. čišćenje ultrazvukom. Druga etapa odvija se u vakuumskoj komori. Nakon što se postigne vakuum reda veličine 1 mmHg , propuhava se komora nekim očišćenim plinom, npr. dušikom. Umjesto propuhavanja plinom može se izradak bombardirati ionima pri vakuumu od $10^{-1}\text{--}10^{-2}$ mmHg. Postoje i drugi postupci čišćenja u vakuumskoj komori. Po svakom završenom procesu čisti se i vakuumska komora.

Izrada integriranih sklopova. Široku primjenu elektronike omogućili su novi postupci izrade električnih elemenata i sklopova. Umjesto sastavljanja električnih sklopova iz pojedinačnih elemenata, novi su tehnički postupci omogućili izradu tzv. integriranih sklopova, kod kojih se svih ili samo neki sastavnih elemenata zajedno sa spojnim vodovima izrađuju u toku jedinstvenog proizvodnog procesa. Tim je postupcima moguće izraditi veći broj sklopova na površini od nekoliko četvornih milimetara. S obzirom na proizvodni postupak postoji više vrsta integriranih sklopova. Poluvodički integrirani sklopovi izrađuju se najčešće u epitaksijalno-planarnoj tehnici s dvostrukom difuzijom, slično kao tranzistori. Integrirani sklopovi s tankim filmom proizvode se naparivanjem tankih slojeva metala i izolacijskih materijala uz naknadno jetkanje suvišnih slojeva. Integrirani sklopovi s debelim filmom izrađuju se pomoću foto-maski sa sitom na principu sitotiska. Proizvodni postupci za sve vrste integriranih sklopova opisani su u članku *Elektronika, Sastavni dijelovi*, TE 4, str. 485.

LIT.: J. A. Hromes, G. L. Nelson, Analysis of the four-bar linkage, New York 1951. — K. Hain, Die Feinwerktechnik, Giessen 1953. — O. Kraemer, Getriebelehre, Karlsruhe 1959. — O. Richter, v. Voss, Kozer, Bauelemente der Feinmechanik, Berlin 1959. — Hütte, Ingenieurs Taschenbuch, IIIB Feinmechanik, Berlin 1960. — K. Hain, Angewandte Getriebelehre, Düsseldorf 1961. — J. Hirschhorn, Kinematics and dynamics of plane mechanisms, New York 1962. — H. Mabic, Mechanisms and dynamics of machinery, New York 1963. — I. Lévin, Справочник конструктора точных приборов, Москва 1964. — G. Niemann, Maschinenelemente I i 2, Berlin 1965. — N. Chironis, Mechanisms, linkages and mechanical controls, New York 1965. — S. Hildebrand, Feinmechanische Bauelemente, Berlin 1967. — Isti, Einführung in die feinmechanischen Konstruktionen, München 1969. — R. Sewig, Neuartige Fertigungsverfahren, in der Feinwerktechnik, München 1969. — Grupa autora, Taschenbuch Feingerätetechnik I i 2, Berlin 1971. — A. Kuhlenkamp, Konstruktionslehre der Feinwerktechnik, München 1971. — Priručnik: Praktičar I, 2 i 3, Zagreb 1973. — Н. Д. Ачкасов, В. С. Терган, Технология точного приборостроения, Москва 1973.

I. Ruševljani

FISIJA ATOMSKOG JEZGRA, nuklearna fisija, deoba, cepanje ili rascep atomskog jezgra, nuklearni proces u kome se teže atomsko jezgro deli na dva dela, odnosno na dva lakša jezgra. Fisija predstavlja danas daleko najznačajniji nuklearni proces za primenu nuklearnih pojava u praktične svrhe. Na procesu fisije zasnovane su direktno ili posredno sve oblasti nuklearne tehnike, od primene radioaktivnih izotopa u raznim oblastima istraživanja i prakse pa do iskorijenja energije oslobođene u nuklearnim procesima za proizvodnju električne, toplotne ili mehaničke energije, ili za stvaranje nuklearnih eksplozija.

Fisija atomskog jezgra je otkrivena u toku izučavanja nastajanja transuranskih elemenata (v. *Aktinijun i aktinidi*, TE 1, str. 46) pri bombardovanju teških atomskih jezgara, prvenstveno urana, neutronima. Ova izučavanja su započela još 1934, posle otkrića neutrona, a sastojala su se u hemijskoj analizi mikro-količina novih elemenata koji se nalaze u uranu prethodno ozračenom neutronima. Otkriće procesa fisije započelo je time što se medju hemijskim elementima nastali u uranu posle bombardovanja neutronima nadeni uz elemente čije su atomske težine bliske atomskoj težini urana, elementi sa atomskim težinama znatno manjim od atomske težine urana. Prvih laki element, lantan, uočili su na ovaj način I. Curie i P. Savić 1938, a O. Hahn i F. Strassmann su 1939 potvrdili pojavu lantanta, a zatim utvrdili i pojavu barijuma i cerijuma. Hahn i Strassmann su na osnovu ovih rezultata oprezno ukazali na mogućnost nastajanja procesa deobe jezgra urana na dva dela, a ubrizgo su L. Maitner i O. Frisch dali objašnjenje ovog procesa. Iste 1939 godine fisiju atomskog jezgra teorijski su obradili N. Bohr i J. Wheeler u svom nuklearnom modelu zasnovanom na analogiji sa kapljicom tečnosti (v. *Atomska jezgra* TE 1, str. 488), kojim su objasnili izvesne pojave kod težih atomskih jezgara, a posebno fisiju. Otkriće procesa fisije atomskog jezgra pobudilo je veliko interesovanje, te se već u toku 1939 saznalo za sve bitnije osobine procesa fisije.

Pokazalo se da su procesu nuklearne fisije podložni osim urana i drugi teški elementi, kao što je npr. torijum, a isto tako da se proces fisije može izazvati ne samo neutronima, već i drugim nuklearnim česticama kao što su deuteroni, protoni i alfa-čestice, pa i gama-kvantima. Pokazano je takođe da se proces fisije može dogoditi i spontano, bez spoljnog uticaja na jezgro (spontana fisija). Kako su proučavanja procesa fisije odmicala tako je postjalo sve jasnije da je konačno dobijen proces koji otvara već od ranije naslućivane mogućnosti da se energija koja se osloboda u nuklearnim procesima, nuklearna energija, koristi u razne praktične svrhe.