

stora, a spojka je pri tome isključena. Pri suprotnom smjeru rotacije valjčići se pomaknu prema užem kraju, tako da vrlo brzo između njihovih površina i površina polovića spojke nastaje trenje potrebno za prijenos momenta vrtnje. Da bi to njihovo pomicanje bilo brže, podupiru se oprugama koje tlače valjke u tom smjeru. Jedna od izvedbi ovih spojkâ s izdancima na unutrašnjem dijelu i bez pomoćnih opruga prikazana je na sl. 190.

Radialne slobodnookretljive spojke upotrebljavaju se za prenošenje momenata vrtnje srednje veličine.

E. Oberšmit

LEŽAJI

Ležaji su elementi strojeva u kojima osovine i vratila leže na svojim osnacima. Oni drže osovine i vratila u određenom položaju, omogućavaju njihovo okretanje i prenašaju sile, koje pri tome nastaju, na postolje stroja ili na građevni objekt.

Kako je okretanje osnaca u ležajima neizbježno popraćeno trenjem, što uzrokuje gubitak energije i uslijed toga za ove strojne elemente opasno razvijanje topline, temeljni je zahtjev pri njihovoj konstrukciji da se opseg te pojave svede na što manju mjeru. U slučaju kliznih ležaja normalne konstrukcije, praktički kriterij za njihovo dopušteno ugrijavanje u ustaljenom pogonu jest da je trajan dodir dlana ruke s njihovim obočjem podnošljiv (to približno odgovara temperaturi od 60 °C). Iznad takvih temperatura, pogotovo ako one i dalje stalnu rastu, pogon kliznog ležaja nije više siguran. Naravno, poželjno je da temperatura ležaja bude što niža.

Važnost djelovanja trenja za funkciju ležaja uvjetovala je i njihov konstrukcijski razvoj, već prema tome da li se u njima pojavljuje trenje klizanja ili pak valjanja (kotrljanja), pa se i dijele na *klizne* i *valjne* ležaje. U prvima osnaci leže u blazinicama koje ih obuhvaćaju, pa se pri rotaciji pojavljuje samo klizanje. U drugima se, međutim, između osnaca i nepokretnih dijelova nalazi vijenac čeličnih kuglica, valjaka (ravnih ili bačvastih), krnjih stožaca ili tzv. iglica (tankih cilindara), pa se pri rotaciji pojavljuje uglavnom samo valjanje.

S druge strane, kako jedna tako i druga od tih skupina ležaja mogu se također s obzirom na konstrukciju, zbog smjera djelovanja vanjskih sila na njih, podijeliti na tri podskupine, tj. na *radialne*, *aksijalne* i *radialno-aksijalne ležaje*. Prvi se upotrebljavaju kad sile opterećenja djeluju u smjeru okomitom (radijalnom) na vratila, drugi kad one djeluju uzduž vratila, tj. u aksijalnom smjeru, a treći kad istovremeno djeluju radialne i aksijalne sile. (Zbog toga se radialno-aksijalni ležaji ponekad nazivaju kombiniranim.)

Klizni ležaji

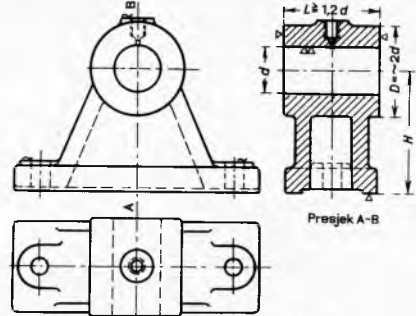
Nekoliko karakterističnih konstrukcija kliznih ležaja prikazano je na sl. 191, 192 i 193. Osim kod najjednostavnijih, jednodijelnih (sl. 191), bitni dijelovi kliznih ležaja jesu dvodijelno obočje (kućište), ležajna salica, blazinica i postolje. Klizni ležaji s dvodijelnim kućištem prikladniji su za montažu jer omogućavaju da se to izvede bez pomicanja vratila. Gornji dio njihovog kućišta (poklopac) spojen je s donjim (tijelom, posteljom) vijcima osiguranim od odvrtanja, koje može nastati kao posljedica vibriranja. Tijelo i postolje izrađuju se u jednom komadu. Obočje treba držati ostale dijelove ležaja i osnac u određenom položaju. Zbog toga se ležaj mora učvrstiti na nekom nepomičnom dijelu stroja ili na temelje, a postolje mora imati rupe za temeljne vijke. Svaki klizni ležaj mora, dakako, biti opskrbljen još i nekim uređajem za podmazivanje.

Trenje u kliznim ležajima. Trenje, s time povezano razvijanje topline i zbog toga ugrijavanje kliznog ležaja i osnaca (kad osnac rotira), nastaje uslijed opterećenja nekom vanjskom silom preko osnaca. Najvažniji činitelj u tom procesu jest koeficijent klizanja. On zavisi od materijala osnaca i blazinice, obradenosti (stupnja zaglađenosti) površina tih dijelova, njihove temperature, relativne brzine njihovog gibanja i od vrste i količine maziva među njima. U kliznim ležajima može postojati suho, polusuho, granično (mješovito) i tekuće trenje.

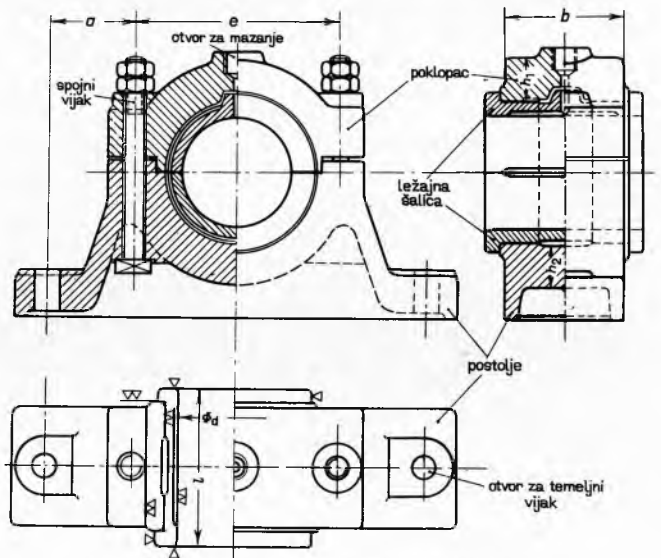
Suho trenje. Pod tim nazivom razumijeva se sasvim suho trenje (idealno suho) među sasvim čistim kliznim površinama, ostvarivo samo u laboratoriju, a koje ima samo teoretsko značenje.

Kako je poznato iz fizike, pri tome su važne pojave koje su uzrokovane adhezijom i hrapavošću.

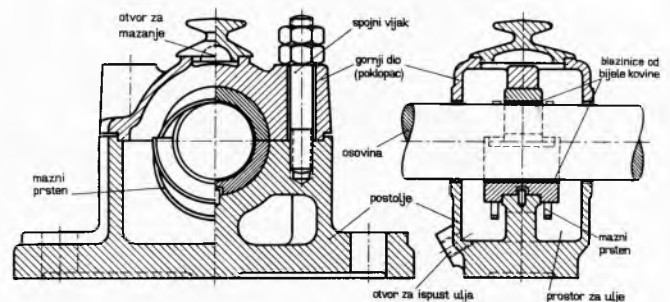
Hrapavost kliznih površina prisutna je u ležajima uvijek u većoj ili manjoj mjeri, jer se njihovi mikroskopski sitni izdanci (grebeni) i uvale ne mogu sasvim ukloniti čak ni najfinijom obradom. Kako se zbog toga dodir kliznih površina ostvaruje uglavnom na plohama grebena, stvarne dodirne površine stotine su i tisuće puta manje od proračunskih (nazivnih), pa lokalno nastaju golemi pritisci i razvijaju se velike količine topline. Naravno,



Sl. 191. Jednodijelni klizni ležaj



Sl. 192. Dvodijelni klizni ležaj normalne konstrukcije



Sl. 193. Dvodijelni klizni ležaj s podmazivanjem prstenovima

djelovanjem tih pritisaka i topline grebeni se postepeno smanjuju, pa pri suhom trenju treba očekivati poboljšavanje dodira kliznih površina s vremenom. Ipak to zaglađivanje ne može preći stanovitu granicu, jer istovremeno dolazi do otkidanja i odrezivanja grebena, što povećava hrapavost. Taj je suprotni efekt to izraziti što su razlike tvrdoće materijala na različitim mjestima kliznih površina veće. Od toga također zavisi da li će deformacije kliznih površina biti više ili manje jednolične. Dakako, što je obrada površina koje klizu uz suho trenje grublja to je i djelovanje tih pojava intenzivnije. Isto vrijedi i za utjecaj adhezije.

Zbog tih pojava koeficijent suhog trenja razmjerno je vrlo velik. U stanovitim slučajevima može čak premašiti jediničnu vrijednost.

Polusuho trenje je trenje koje se pojavljuje tamo gdje se ne podmazuje namjerno, ali su ipak prisutne male količine tvari koje podmazuju. Susreće se u praksi jer se tu čak i na najbrižljivije očišćenim površinama uvijek nalaze tanki slojevi masti, vode i plinova adsorbiranih iz okoline koji podmazuju do stanovite mjere.

Premda debljina tih adsorbiranih slojeva iznosi svega nekoliko desetaka μm , oni smanjuju mogućnost dodirivanja i zahvatanja grebena kliznih površina, pa je koeficijent polusuhog trenja znatno manji od koeficijenta suhog i iznosi oko nekoliko (obično par) desetina.

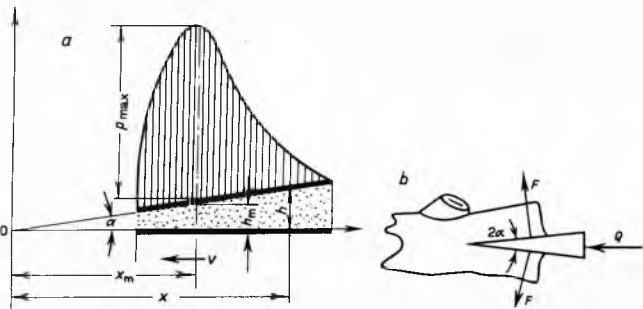
Granično (mješovito) trenje nastupa između površina koje se taru, kad se među njima nalazi sloj nekog maziva debljine $0,1 \dots 0,5 \mu\text{m}$. Granice debljine slojeva koje stvaraju maziva na tarnim površinama jedno su od njihovih za primjenu bitnih svojstava (*v. Maziva*). Ono još uvijek ne može potpuno spriječiti uzajamno dodirivanje grebena tarnih površina. Zbog toga je i pri graničnom trenju, iako je ograničeno na veće grebene, habanje kliznih površina još uvijek neizbježno. Veličine koeficijenta graničnog trenja jesu $0,005 \dots 0,01$.

Tekuće trenje. Pod tim nazivom razumijeva se trenje među kliznim površinama u kojem bitnu ulogu igra unutrašnje trenje maziva. Ta je uloga to važnija što se više povećava debljina sloja maziva među kliznim površinama. Pri tome se površine sve više odmiču jedna od druge i istodobno smanjuje se njihov utjecaj na glavnu masu maziva. U tom procesu konačno nastupa stanje u kojem grebeni (neravnine) više ne zahvaćaju jedni druge, a sloj maziva postaje neprekinut, pa se međusobno klizu samo njegovi slojevi. U tom stanju trenje se svodi uglavnom na silu kojom se mazivo opire međusobnom posmicanju njegovih susjednih slojeva, tj. nastupa proces u kojem presudnu ulogu igraju unutrašnja svojstva mazive tvari, nadasve njen viskozitet.

Pri tome treba razlikovati pojam stvarnog od idealnog tekućeg trenja, koje je neostvarivo. Naravno, za rad kliznih ležaja poželjno je što veće približenje idealnom tekućem trenju, jer je tim sigurnije isključenje dodira osnaca i blazinice za vrijeme punog pogona, a time štetno zagrijavanje i trošenje tih dijelova.

Održavanje maziva u prostoru između kliznih površina ležaja može se osigurati, ako se ono dovodi pod tlakom dovoljno visokim da se njime uravnoteži vanjsko opterećenje, ili stvaranjem određenih uvjeta unutar mazivog sloja koji uzrokuju jednako djelovanje. Prva od tih metoda zahtijeva upotrebu snažnih dodatnih uređaja (npr. crpke za ulje) i prikladnih vodova, čija je primjena u praksi često teško ostvariva, a povezana je i sa stanovitim potroškom energije.

Druga metoda je jednostavnija i zbog toga se češće primjenjuje. Princip, na kojemu se ova metoda zasniva, prikazan je na sl. 194 a.



Sl. 194. Princip ostvarivanja uvjeta za tekuće trenje bez vanjskih uređaja

Dvije debelo izvučene linije predstavljaju neke klizne površine. Pri tome se pretpostavlja da je širina tih površina u smjeru okomitom na ravninu slike beskonačno velika, da one međusobno zatvaraju neki kut α , i da se donja giba ulijevo brzinom v , a gornja miruje. Najuži presjek prostora klinastog oblika između tih površina neka bude dovoljan da se u njemu može nalaziti sloj maziva. Zbog gibanja donje površine, ulje će tada ulaziti s desne strane

kroz široki, a izlaziti s lijeve kroz uski presjek tog prostora. Kako je ulje nestišljivo pri kontinuiranom protjecanju, koje se na taj način uspostavlja, količina ulja koja tada ulazi u prostor između kliznih površina mora biti jednaka onoj koja iz njega izlazi. Nužna je posljedica toga da su tada pritisci u užim dijelovima tog prostora veći od onih u širim, pa će u njemu nastati hidrodinamički pritisak koji djeluje na obje površine poput klina nastojeći da ih odmakne. Konačni rezultat takvog procesa jest da gornja površina na neki način »pliva« na sloju ulja. Bočna komponenta F sile koja se ovdje pojavljuje jest jednaka kao i u slučaju krutog klina (sl. 194 b), gdje namjesto brzine djeluje sila Q .

Hidrodinamički tlak u ulju na tom putu mijenja se od multih vrijednosti koje vladaju na njegovom ulazu i izlazu kao funkcija udaljenosti od ulaza, dostižući pri tome na nekom mjestu, gdje je visina presjeka između kliznih površina h_m , maksimum p_{max} , kako je to shematski prikazano krivuljom iznad mirujuće površine (sl. 194 a). Uz učinjenu pretpostavku o neizmjenitosti širine sloja maziva, za ovu funkciju može se izvesti izraz,

$$\frac{dp}{dx} = 6\eta v \frac{h - h_m}{h^3},$$

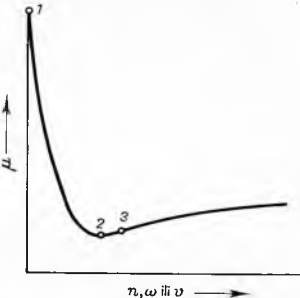
gdje je η dinamički viskozitet maziva, a h visina presjeka prostora između površina koje se klizu na udaljenosti x od ishodišta koordinatnog sustava.

Da bi se ovim načinom postiglo približno idealno tekuće trenje u kliznim ležajima, bitno je da klizne površine budu međusobno pod određenim kutom. Ukoliko su, naime, te površine paralelne, ne može se u mazivu uspostaviti hidrostatski tlak potreban za protudjelovanje vanjskom opterećenju, koje nastoji uspostaviti dodir kliznih površina istiskivanjem ulja koje se nalazi među njima. Međutim, kako je (prema malo prije navedenoj formuli) za postizanje potrebne veličine hidrodinamskog tlaka nužna stanovita brzina klizanja, ono se ne može ostvariti u svim fazama rada kliznih ležaja, tj. ni na početku, ni pri zaustavljanju, već samo u ustaljenom pogonu, kad je dostignut stanoviti broj okretaja vratila. Zbog toga se u svakom kliznom ležaju na početku rada pojavljuje najprije polusuho trenje koje postepeno prelazi u granično i konačno u tekuće, dok pri zaustavljanju te promjene teku obrnutim redom. Pri tome se, naravno, mijenja i koeficijent trenja.

Koeficijent tekućeg trenja za određeni broj okretaja osnaca može se računski odrediti iz momenta potrebnog da se to okretanje stvori, odnosno održava, što je zapravo moment trenja određen izrazom

$$M = \mu F \frac{d}{2},$$

gdje je F radijalna sila koja djeluje na ležaj, a d promjer osnaca. Promjene koeficijenta trenja u zavisnosti od broja okretaja n , ili pak kutne ω ili obodne v brzine osnaca prikazuje se krivuljama koje imaju oblik prikazan na sl. 195. Tu točka 1 prikazuje stanje pri mirovanju ležaja. Tada se klizne plohe osnaca i blazinice dodiruju, pa koeficijent trenja ima najveću vrijednost. Na početku pogona, kad brzina klizanja polako raste, u ležaju se pojavljuje polusuho trenje s razmjerno velikim koeficijentom trenja. Pri daljem porastu brzine klizanja, polusuho trenje postepeno prelazi u područje graničnog trenja, koje završava u stanju 2 i zbog toga se naziva *kritičnom točkom*. U tom stanju počinje odvajanje osnaca od blazinice, tj. nastajanje uvjeta za trenje. U njemu, također, koeficijent trenja doseže svoju minimalnu vrijednost. Područje prijelaza graničnog u tekuće trenje proteže se između kritične točke i stanja 3 u kojem sloj maziva između kliznih površina doseže debljinu dovoljnu za potpuno odvajanje osnaca od blazinice. Počevši od stanja 3, koeficijent trenja opet raste s brojem okretaja (kutnom brzinom, obodnom brzinom) osnaca, što je

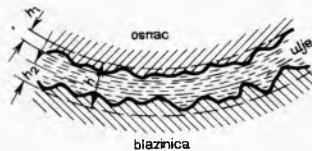


Sl. 195. Shematski prikaz zavisnosti koeficijenta trenja u podmazivanim kliznim ležajima od brzine rotacije

koeficijent trenja doseže svoju minimalnu vrijednost. Područje prijelaza graničnog u tekuće trenje proteže se između kritične točke i stanja 3 u kojem sloj maziva između kliznih površina doseže debljinu dovoljnu za potpuno odvajanje osnaca od blazinice. Počevši od stanja 3, koeficijent trenja opet raste s brojem okretaja (kutnom brzinom, obodnom brzinom) osnaca, što je

sasvim u skladu sa zakonima hidrodinamike. Zbog toga koeficijent trenja može ponekad u »tekućem« području poprimiti vrijednosti jednake njegovim vrijednostima u graničnom. Poblži podaci o promjenama s brzinom rotacije osnaca mogu se naći u priručnicima u obliku dijagrama s familijama ovakvih (tzv. Stribeckovih) krivulja za različita opterećenja.

Podmazivanjem je tekuće trenje to teže ostvarivo što je broj okretaja osovine (vratila) manji i što je radijalno opterećenje ležaja veće. Međutim, uz ova dva činioca na uspostavljanje tekućeg trenja utječe i hrapavost kliznih površina osnaca i blazinica, jer međusobno zahvatanje njihovih grebena i uvala otežava njihovo razdvajanje. Uvjeti potrebni za ostvarenje tekućeg trenja u kliznom ležaju, s obzirom na hrapavost kliznih površina, shematski su prikazani na sl. 196. Kad su osnaci od čelika, može se, bez



Sl. 196. Uvjeti potrebni za ostvarenje tekućeg trenja s obzirom na hrapavost kliznih površina

obzira na materijal blazinice, smatrati da je srednja visina grebena računata od dna uvala $h_1 = h_2 = 5 \mu\text{m}$. Ako se, dakle, želi postići temeljni uvjet za tekuće trenje da grebeni osnaca i blazinice nisu u dodiru, što zahtijeva da bude

$$h > h_1 + h_2,$$

mora se za srednju vrijednost h_1 i h_2 od $0,5 \mu\text{m}$ ostvariti

$$h_{\text{min}} > 2 \times 5 \mu\text{m} = 10 \mu\text{m}.$$

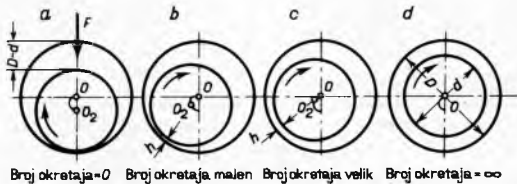
Da bi u ležaju mogao nastati sloj ulja, blazinica mora, naravno, imati provrt D nešto veći od promjera d osnaca. Ta potrebna zračnost koja se prikazuje tzv. relativnom zračnošću

$$\psi = \frac{D - d}{d}$$

ovisi o srednjem specifičnom pritisku, broju okretaja i materijalu blazinice.

Hidrodinamička teorija podmazivanja. Ovu teoriju postavili su E. Falz i A. Klemenčić nezavisno jedan od drugoga. Međusobni položaj osnaca i blazinice u glavnim fazama procesa podmazivanja, od kojih ova teorija polazi, shematski su prikazani na sl. 196.

Položaj je osnaca i blazinice u shemi na sl. 197 a takav kad ležaj miruje i u času kad se pokreće, odnosno kad se zaustavlja.



Sl. 197. Promjene položaja osnaca u kliznom ležaju u ovisnosti o broju okretaja

Pri tome je, kako je već opisano, trenje polusuho. Pri malom broju okretaja (sl. 197 b) ulje se počinje podvlačiti pod osnac, ali ga uslijed još odviše niskih vrijednosti hidrodinamičkog tlaka nije u stanju dovoljno odignuti. To je stanje koje odgovara prijelazu polusuhog u granično trenje klizanja. Kad u normalnom radu stroja broj okretaja vratila postane dovoljno velik, osnac zahvata ulje i tlači ga u srpoliko svijeni prostor između kliznih površina koji se u smjeru kretanja sužava poput klina (sl. 197 c). Na taj način osnac djeluje kao crpka koja stvara potrebni tlak. Uslijed toga osnac se zanosi malo u stranu (pri smjeru okretanja prikazanom na slici ulijevo) i istovremeno se odize sve do uspostavljanja ravnoteže između opterećenja F i hidrodinamičkog tlaka koji nastaje u uljnom klinu. Za ispravan rad ležaja u tom stanju mora biti ostvareno tekuće trenje. Pri tome se još uvijek položaj osi osnaca, koja prolazi kroz točku O_2 ne podudara s položajem osi

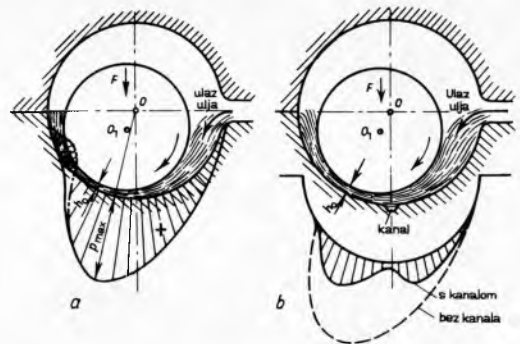
provrt ležaja koja prolazi kroz točku O . Podudaranje tih dvaju položaja nastupilo bi samo u slučaju kad bi bio ostvaren (nepostizivi) uvjet $n = \infty$ (sl. 197 d). U tom teoretskom slučaju nastupilo bi onda i stanje u kojem bi vladalo idealno tekuće trenje klizanja. Geometrijska mjesta točke O_2 za vrijeme procesa prijelaza trenja od polusuhog do idealnog tekućeg, dok ne dospije u O čine krivulju (Gumbelova krivulja) čiji se oblik približava kružnom luku.

Uz već izložene zahtjeve čije je zadovoljenje nužno da bi se mogli ostvariti uvjeti za tekuće trenje u kliznim ležajima (dovoljno veliki broj okretaja osnaca, glatko i točno obrađene klizne površine), iz hidrodinamičke teorije podmazivanja proizlazi da je za to potrebno još i privođenje dovoljne količine maziva prikladnog viskoziteta i održavanje osi provrta blazinice i osnaca u međusobno paralelnom položaju.

Maziva za klizne ležaje. Osim dovoljne brzine klizanja za nastajanje uvjeta tekućeg trenja potrebno je, dakako, da i mazivo bude tekuće. Zbog toga se za podmazivanje kliznih ležaja najviše upotrebljavaju uljevita maziva. Među njima najvažniji su preparati na bazi mineralnih i sintetskih ulja. Za podmazivanje kliznih ležaja u kojima osnaci rotiraju odviše sporo, da bi se mogli ostvariti opisani hidrodinamički uvjeti, postižu se bolji rezultati upotrebom masti.

Nedostatak je podmazivanja mastima u tome što se masti mogu upotrijebiti samo jednom, pa je i to razlog što se preferira podmazivanje kliznih ležaja, posebno kad su veliki, uljevitim mazivima koja se daju regenerirati. Osim klasičnih uljevitih maziva i masti, danas se za podmazivanje općenito, pa i za podmazivanje kliznih ležaja, sve više upotrebljava mnoštvo specijalnih sredstava koje stavlja na raspolaganje suvremena industrija maziva (v. *Maziva*).

Sustavi podmazivanja kliznih ležaja. Mazivo se obično privodi ležaju s mjesta koje se nalazi na njegovoj najvišoj točki. Odatle se ono mora ravnomjerno rasporediti na dodirne površine blazinice i osnaca. Za to služe u površinu blazinice urezani kanali. Iz Klemenčićevog dijagrama na sl. 198 može se zaključiti

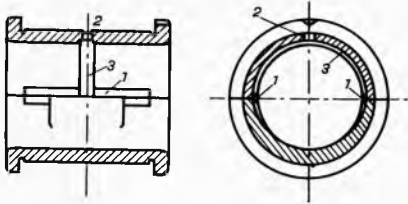


Sl. 198. Klemenčićev dijagram: a) bez uzdužnih kanala u opterećenoj zoni blazinice, b) s uzdužnim kanalima

da se ti dovodi ne smiju nalaziti na mjestu gdje je blazinica opterećena. Ovaj dijagram zapravo je već opisani dijagram hidrodinamičkog tlaka (sl. 194 a) prilagođen srpolikom prostoru (kao polarni dijagram) između površina osnaca i blazinice. Pri tome kad na opterećenoj površini blazinice nema kanala (sl. 198 a), maksimalni tlak p_{max} nastaje u smjeru vrtnje, malo ispred najužeg mjesta na kojemu je debljina sloja maziva h_0 . Iza tog mjesta može, što više, nastati i tlak u suprotnom smjeru (negativni) prikazan u dijagramu granom krivulje (izvučenom crtom i točkom). Uzdužni dovodni kanal za ulje u toj zoni (sl. 198 b), međutim, povećava presjek prostora između kliznih površina zbog čega na tom mjestu tlak u mazivu naglo opada. Iako tlak poslije toga ponovno raste, ne može doseći raniju vrijednost p_{max} , a to, dakako, znatno smanjuje nosivost ležaja.

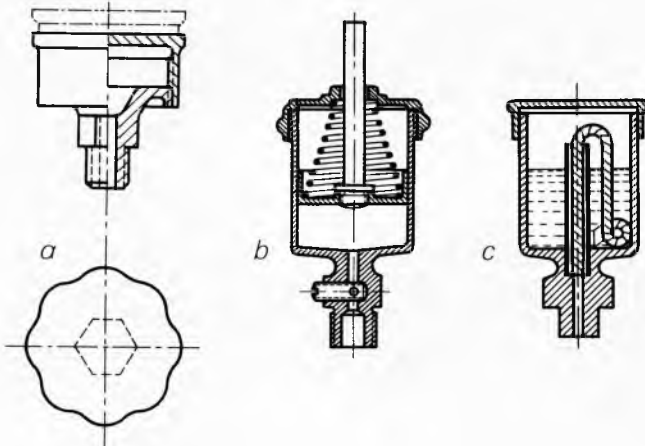
Poprečni i dijagonalni kanali u opterećenom dijelu površine blazinice također djeluju štetno, jer spajaju mjesta s višim tlakom uljnog klina s mjestima na kojima je on niži, a to uzrokuje ujednačavanje tlakova u uljnom klinu i time također smanjivanje veličine p_{max} .

Ispravno izrađena dvodijelna blazinica predviđena za obo-
smjerno okretanje osnaca prikazana je na sl. 199.

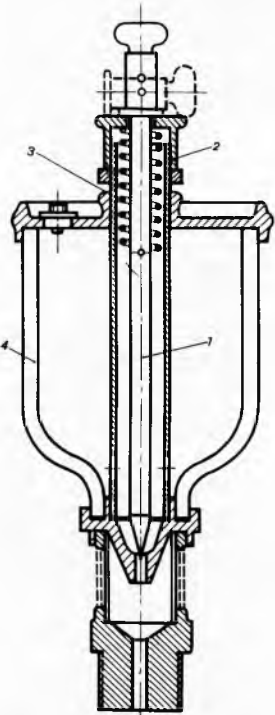


Sl. 199. Blazinica kliznog ležaja s ispravno obli-
kovanim dovodima maziva. 1 Akumulacijski
kanal, 2, 3 dovodi ulja

Klizni ležaji mogu se podmazivati različitim uređajima. Pri
podmazivanju mašču mogu se upotrijebiti tzv. *Staufferove maza-
lice* (sl. 200 a). Mast, s kojom su te mazalice ispunjene, istiskuje se
povremeno iz njih u ležaj ručno, zakretanjem poklopca posude
za mast.



Sl. 200. Mazalice. a Staufferova mazalica, b mazalica sa stožastom spiralnom
oprugom, c mazalica sa stijenjem



Sl. 201. Kapalica za regulirano
podmazivanje. 1 Iгла, 2 ma-
tica, 3 opruga, 4 posuda za
mazivo

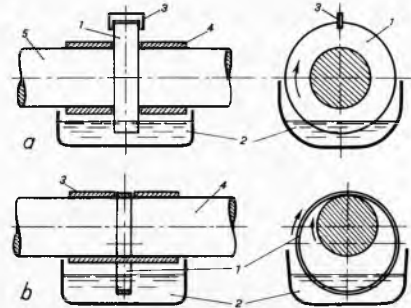
Jače opterećeni ležaji mogu se
podmazivati mašču s pomoću *auto-
matskih mazalica* (sl. 200 b) iz
kojih mazivo istiskuje jedan čep
aktiviran stožastom spiralnom opru-
gom. Osim tih postoje i drugi
uređaji za podmazivanje kliznih
ležaja mašču.

Najjednostavniji uređaji za pod-
mazivanje kliznih ležaja *uljevitim
mazivima* jesu *mazalice sa stije-
njem* (sl. 200 c) i tzv. *kapalice*
(sl. 201). Kapalice omogućavaju
regulaciju količine maziva koja
se privodi kliznim površinama s
pomoću sustava od jedne igle,
opruge i matice.

Osnovni je nedostatak sviju
spomenutih uređaja za podma-
zivanje u tome što sadrže malu
zalihi maziva, pa treba stalno
nadzirati da se zalihe ne iscrpe,
što bi uzrokovalo prestanak teku-
ćeg trenja i oštećenje ležaja.

Mnogo savršenije i sigurnije je
podmazivanje zalijevanjem kliz-
nih površina uljem (kad se radi o
vodoravnim osovinama). Takvo
podmazivanje, koje se postiže *prste-
novima* za mazanje, ujedno je eko-
nomično, jednostavno i automat-

sko. S obzirom na vrstu prstenova razlikuju se dva tipa kliznih le-
žaja: s tzv. *čvrstim* i sa *slobodnim* prstenom za mazanje. U unutraš-
njosti postolja ležaja s prstenovima za mazanje nalazi se prostor
koji služi kao spremnik ulja. Prstenovi za mazanje učvršćeni su na
osnacima (čvrsti prstenovi, sl. 202 a) ili su na njima samo zavješeni
(slobodni ili pomični prstenovi, sl. 202 b), pri čemu moraju imati
znatno veći promjer od osovine. Oni su svojim donjim krajem uro-
njeni u ulje, pa, kako se pri vrtnji osnaca okreću i oni sami, oni ne-
prekidno zahvataju ulje i zalijevaju klizne površine. Kako se pri-
silno okreću zajedno s osnacima, čvrsti prstenovi za mazanje ne
mogu zapeti, pa su sigurniji u pogonu. Međutim, s njih se ulje mora
na neki način skidati, pa imaju strugač smješten u gornjem dijelu



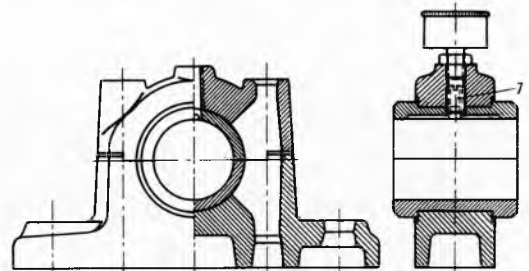
Sl. 202. Uređaji za podmazivanje kliznog ležaja:
a prstenom učvršćenim na osnacu; 1 prsten, 2
mazivo, 3 strugač, 4 blazinica, 5 osnac; b
pomičnim prstenom, 1 prsten, 2 mazivo, 3
blazinica, 4 osnac

ležaja. Slobodni prstenovi za mazanje okreću se u ležaju zbog
trenja o površinu osnaca. Do njihovog zapanjanja, uslijed čega su
manje sigurni, može doći zbog naginjanja u stranu.

Podmazivanje prstenovima je obilno, a potrošak maziva pri
tome ipak malen, jer se ulje koje napušta klizne površine vraća
u spremnik i na taj način stalno cirkulira.

Osim opisanih sustava podmazivanja kojima je zajednička
karakteristika nezavisnost od uređaja izvan ležaja, često se pri-
mjenjuje i *centralno podmazivanje*. Pri tome se ulje dovodi svim
ležajima stroja u kojem su ugrađeni iz nekog središnjeg uređaja
pod tlakom. To može biti rezervoar smješten na prikladnoj vi-
sini, pri čemu ulje dotječe u ležaje kroz cijevi pod utjecajem gravi-
tacije. Za centralno podmazivanje ležaja pod većim tlakom (npr.
ležaja velikih pogonskih ili finih alatnih strojeva) za cirkulaciju
ulja potrebne su crpke. Za tu svrhu obično se upotrebljavaju
male stapne ili zupčaste crpke.

Izvedbe kliznih ležaja. Među mnoštvom vrsta kliznih le-
žaja najčešći su oni koji služe za nošenje transmisija (transmisij-
ski). Oni se dijele na normalne uspravne ležaje, ležaje s pribun-
cima, zidne, konzolne i viseće ležaje. Drugu skupinu kliznih le-
žaja čine specijalni ležaji. To su ležaji čije je kućište izravno spojeno
s nekim dijelom stroja ili je sastavni dio njegove cjeline, kao što
su ležaji osnog koljena ili koljenaste osovine, ili koljenastog vratila
stapnih strojeva, turbinski ležaji, ležaji vretena alatnih strojeva,
ležaji na spojnim polugama, ležaji križnih glava itd.

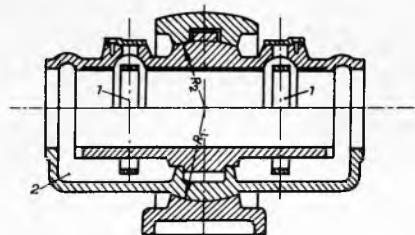


Sl. 203. Normalni uspravni klizni ležaj podmazivan mašču.
1 Provrt za dovod maziva

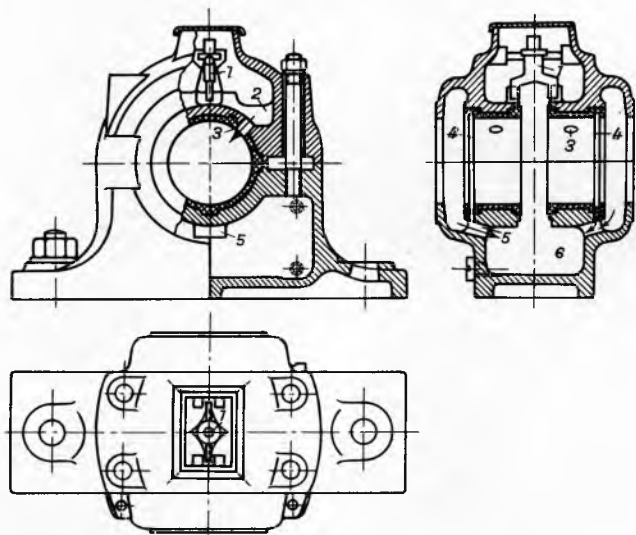
Normalni, *uspravni ležaj* podmazivan mašču s izmjenljivom
dvodijelnom šalicom osiguranom protiv okretanja zatikom s na-
vojem, koji ima provrt za dovod maziva, prikazan je na sl. 203.

Dvodijelni samopodesivi ležaj s blazinicom od lijevanog željeza podmazivan pomoću dva slobodna prstena prikazan je na sl. 204. Takvi ležaji služe za držanje dugih vratila, kao što su npr. transmisijaska koja u pogonu dobivaju progibe ili kod kojih se mora unaprijed računati s malim netočnostima pri montaži. Pri tome takvi ležaji sami eliminiraju time izazvane ekscentricitete. Mogućnost samopodešavanja položaja ovih ležaja u svim smjerovima osigurana je s pomoću kuglastih izbočina blazinice s polumjerima R_1 i R_2 , koje sjede u odgovarajućim im udubinama kućišta. Da bi se čitava blazinica mogla okretati u kućištu, središta kuglastih površina tih izbočina moraju ležati na uzdužnoj simetrali ležaja. Pri tome izdanak gornje kuglaste izbočine ograničava pomicanje blazinice i sprečava njeno okretanje zajedno s vratilom i time njeno ispadanje iz kućišta.

Ležaj s ulivenom blazinicom od bijele kovine i uređajem za podmazivanje učvršćenim prstenom prikazan je na sl. 205.



Sl. 204. Dvodijelni, samopodesivi transmisijски ležaj s prstenovima za podmazivanje. 1 Slobodni prsten, 2 spremnik za ulje



Sl. 206. Kratki klizni ležaj. 1 Strugač, 2 komore za prihvatanje ulja, 3 otvori za dovod ulja, 4 kružni kanali za slijevanje ulja koje napušta klizne površine, 5 otvori za povrat ulja u spremnik, 6 spremnik ulja

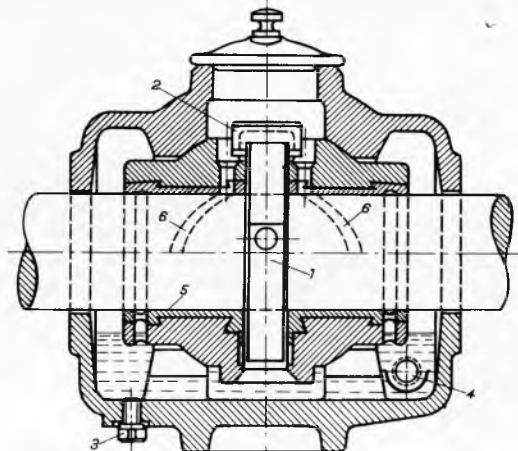
Na sl. 206 prikazana je konstrukcija tzv. *kratkog ležaja*. S ovom konstrukcijom ostvaruje se štednja materijala, smanjuje težina uređaja i prostor potreban za smještaj. U unutrašnjosti ležaja nalaze se dvije kratke međusobno razdvojene klizne površine između kojih čvrsti prsten dovodi ulje do strugača. Ulje koje odatle otječe skuplja se u komorama u unutrašnjosti poklopca i kroz provrte na njihovom dnu dospijeva među klizne površine. Ulje koje napušta klizne površine otječe kroz kružne otvore urezane u površine blazinice i kroz otvore pod njima slijeva se natrag u spremnik. Takvi ležaji mogu služiti i kao transmisijски. Štednja materijalom i smanjenje težine postižu se i zavarenom konstrukcijom kućišta ležaja (sl. 207).

Konstrukcijski materijali za klizne ležaje. Kućišta kliznih ležaja obično se grade od lijevanog željeza, a za vrlo velika opterećenja i od čeličnog lijeva.

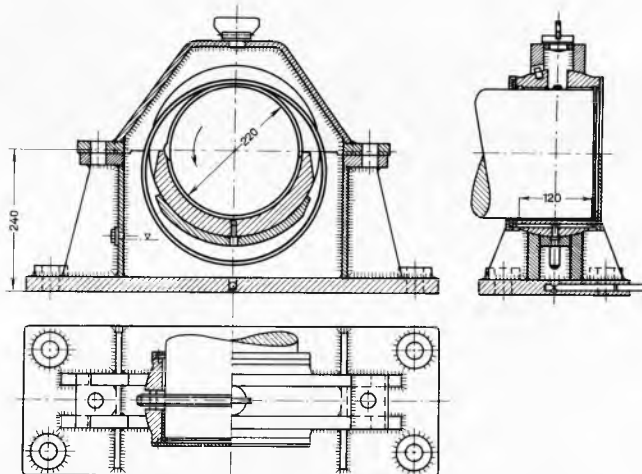
Za šalice i blazinice kliznih ležaja služe različiti materijali; za tu svrhu najprikladniji su oni koji imaju antifriksijska svojstva. S obzirom na to, među tim materijalima na prvom mjestu nalazi

se *bijela kovina*. To je slitina kositra, bakra, olova i antimona. Njena su svojstva za primjenu u tu svrhu to bolja što ima više kositra. Zbog toga se za glavne ležaje upotrebljava bijela kovina sa 80% kositra, a za ležaje za sporedne svrhe bijela kovina sa 5...10% kositra.

Ti dijelovi kliznih ležaja kad rade pod manjim opterećenjima, ili na mjestima nepristupačnim za podmazivanje (ili u prehrambenoj i farmaceutskoj industriji, i u kućanskim strojevima gdje se zahtijeva čistoća), često se izrađuju od *sinterovanih* (metalke-ramičkih) materijala. To su sinterovano željezo (s malim dodatkom grafita), sinterovana bronca i drugi materijali od željeza, bakra, kositra, cinka, olova s poroziteta 30...35%. Glavno njihovo



Sl. 205. Ležaj s čvrstim prstenom za podmazivanje. 1 Prsten, 2 strugač, 3 vijak za ispuštanje ulja, 4 vijak za kontrolu razine ulja, 5 blazinica, 6 dovodi maziva



Sl. 207. Kratki klizni ležaj zavarene izvedbe sa slobodnim prstenom za podmazivanje

svojstvo koje se koristi za takve slučajeve jest upijanje ulja u hladnom stanju i njegovo ispuštanje iz pora pri zagrijavanju ležaja uslijed toplinskog istezanja, čime se ostvaruje automatsko podmazivanje i smanjuje mogućnost da se klizne površine blazinice i osnaca međusobno zapeku.

Pri manjim brzinama i opterećenjima kliznih ležaja (npr. kod transmisijских) šalice se grade i od visokovrijednog (perlitnog) *sirovog lijeva*. Ako ti ležaji nemaju oblogu od bijele kovine, osnaci koji se u njima okreću moraju biti zakaljeni ili cementirani zbog postizavanja otpornosti na habanje.

Čelik i čelični lijev služe za izradu tih dijelova za jače opterećene ležaje. Međutim, ležaji građeni od ovih materijala moraju imati oblogu od kakve antifriksijske kovine.

Kao materijal za blazinice upotrebljavaju se različite *bronce*: fosforne (oko 1% P), različite olovne (za jako opterećene ležaje parnih turbina, lokomotiva, velikih motora), prema koroziji vrlo otporne aluminijumske (4...13% Al) i manganske (do 20% Mn)

koje imaju tražena svojstva i kod visokih temperatura. Mjed se za tu svrhu manje upotrebljava jer uzrokuje jače trošenje osnaca.

Za blazinice ležaja jako opterećenih motora s unutarnjim izgaranjem, i općenito u proizvodnji vozila, dobro služe slitine kadmijuma.

Za ležaje strojeva koji rade pod malim opterećenjem i za ležaje osovina brodskih propelera upotrebljavaju se i stanoviti *umjetni materijali na bazi drva*, npr. Lignofol i Lignoston, poznati još i kao tvrdo drvo. Oni se sastoje od unakrsnih slojeva furnira natopljenih bakelitom, samo što je Lignoston još i prešan pod visokim tlakom i pri višoj temperaturi. Dozvoljena je temperatura ugrijavanja ležaja s blazinicama od Lignofola i Lignostona oko 70 °C.

U strojarstvu u posljednje vrijeme za izradu kliznih ležaja, naročito ležaja transportera, dizalica, poljoprivrednih i nekih vrsta valjaoničkih strojeva, kad se radi o malim opterećenjima i malim brzinama rotacije, sve se češće i uspješnije upotrebljavaju *plastične mase*. One često mogu zamijeniti bronce, pa i bijele kovine kao konstrukcijske materijale blazinica. Najpoznatiji materijali takve vrste jesu tzv. tekstoliti (na povišenim temperaturama prešani pamučni i slični materijali natopljeni umjetnim, najčešće fenolformaldehidnim smolama), kao što su Novotext, Resitex. Iako mogu podnijeti kratkotrajno zagrijavanje i do 110 °C, ovi ležaji ne mogu odoljeti djelovanju trajne radne temperature iznad 90 °C. Ako se te granične temperature prekorače, nastupa karbonizacija materijala ležaja. Toplinska vodljivost tih materijala je neznatna, pa se od njih napravljeni ležaji moraju hladiti vodom. Ako su osnaci zakaljeni, ležaji od tih materijala malo se troše radom.

Proračun kliznih ležaja. Nakon izbora tipa ležaja pristupa se proračunu njegovog provrta, odnosno promjera i dužine blazinice prema dimenzijama osnaca.

Dužina l blazinice određuje se iz konstruktivne karakteristike φ ležaja, kao kod proračuna osnaca, pa se kontrolira srednji površinski pritisak na vodoravnu projekciju površine blazinice

$$p = \frac{F}{l \cdot d} \leq p_{\text{dop}},$$

gdje je F opterećenje ležaja, a p_{dop} specifični pritisak dozvoljen za materijal blazinice.

Čvrstoća kućišta ležaja kontrolira se određivanjem stvarnih naprezanja u opasnim presjecima postolja i poklopca. Ona ne smiju prekoračiti dozvoljene vrijednosti.

Kontrola zagrijavanja obavlja se na jednaki način kao i kod osnaca. Međutim, kako su umnošci $(p \cdot v)_{\text{dop}}$ empirijske vrijednosti i ne pružaju potpunu sigurnost za rad ležaja, potrebno je još odrediti njegovu temperaturu s pomoću jednog od za to postojećih izraza, npr. iz empirijske formule

$$t_e (t_e - t_z) = \frac{7200 v}{c \pi},$$

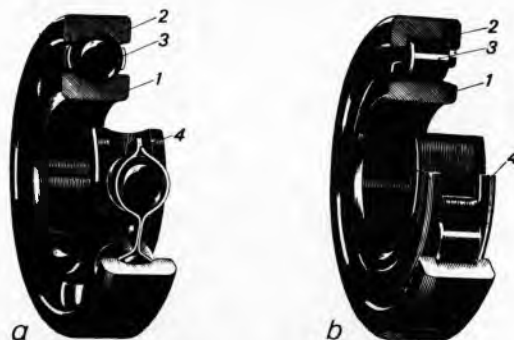
gdje su t_e i t_z temperature ležaja, odnosno zraka u °C, v obodna brzina osnaca, a c tzv. faktor radijacije (količina topline koja isijava sa 1 cm² površine ležaja pri razlici $t_e - t_z = 1$ °C za 1 sat,

izražena u $\frac{\text{kcal}}{\text{cm}^2 \cdot \text{°C} \cdot \text{h}}$). Pri tome treba imati na umu da se s pomoću ove jednadžbe dobivaju ipak samo približne vrijednosti. Ako se kontrolom temperature ležaja po ovoj formuli dobiju vrijednosti t_e veće od 70–75 °C, mora se ležaj prisilno hladiti vodom, uljem ili strujom zraka.

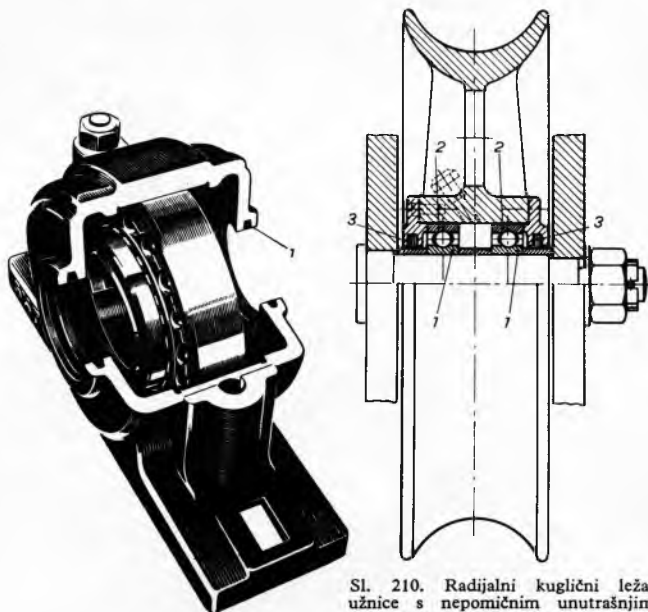
Nedostaci kliznih ležaja. Upotreba je kliznih ležaja, uslijed trenja klizanja, povezana s razmjerno velikim gubicima mehaničke energije (2–5%), posebno za vrijeme pokretanja i zaustavljanja vratila, kad se u njima, uslijed polusuhog ili mješovitog trenja, pojavljuju veliki otpori. Nedostatak kliznih ležaja je i njihova glomaznost uzrokovana razmjerno velikom dužinom blazinice. Osim toga je i potrošak maziva u kliznim ležajima razmjerno velik. Krupan nedostatak kliznih ležaja je i u tome što, izuzevši nekoliko temeljnih tipova u razvijenim zemljama, nisu standardizirani.

Valjni (kontroljajući) ležaji

Glavni dijelovi valjnih ležaja prikazani su na sl. 208. Oni se sastoje od jednog unutrašnjeg i jednog vanjskog prstena, valjnih elemenata (kuglica, valjaka) te kaveza koji drži elemente na stanovitom razmaku da se ne bi međusobno dodirivali i sprečava njihovo ispadanje iz sklopa. Da bi mogli djelovati kao vodilice elemenata, prstenovi valjnih ležaja imaju prikladna udubljenja. Da bi kaveži mogli obavljati svoju funkciju, njihov oblik prilagođuje se obliku valjnih elemenata.



Sl. 208. Glavni dijelovi ležaja: a kuglični, b valjkasti; 1 unutrašnji prsten, 2 vanjski prsten, 3 valjni elementi—kuglice, odnosno valjci, 4 kavez



Sl. 209. Valjni ležaj s obočjem

Sl. 210. Radijalni kuglični ležaj užiće s nepomičnim unutrašnjim prstenovima ugrađen bez kućišta na nepomičnu osovinu. 1 Unutrašnji prsten, 2 vanjski prsten, 3 brtveni prsten

Valjni se ležaji ugrađuju u kućišta (sl. 209), ili u za njih određeni prostor na stroju (sl. 210). Na kućištu na sl. 209 vide se utori I trapeznog oblika za postavu zaštitnih brtvi.

Valjni ležaji mogu raditi tako da se njihov unutrašnji prsten okreće zajedno s vratilom dok je vanjski nepomičan, ili tako da se okreće vanjski, a nepomičan je unutrašnji prsten.

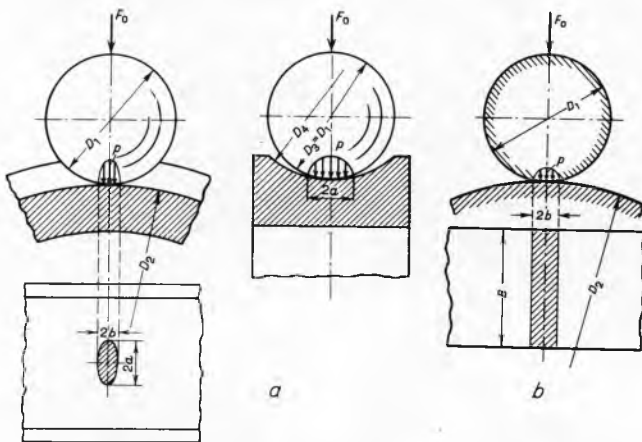
Trenje u valjnim ležajima. Otpori koji se pojavljuju pri trenju valjanja znatno su manji od onih pri trenju klizanja, jer se pri tome teorijski dodir površina u međusobnom relativnom kretanju svodi na točke, kad su valjni elementi kuglice, odnosno na izvodnice kad su to valjci, iglice, stošci ili bačvoliki elementi.

Ta predodžba vrijedi u potpunosti, naravno, samo za idealno kruta tijela bez elasticiteta. Međutim, kako svaka tvar posjeduje to svojstvo u većoj ili manjoj mjeri, pri valjanju tijela jednih po drugima njihov međusobni dodir ipak se uspostavlja na stanovitim površinama, a na njima se neizbježno ipak pojavljuje trenje klizanja, iako u valjnom ležaju kao cjelini mnogo manje nego u kliznim ležajima.

Prema istraživanjima H. R. Hertza te dodirne plohe eliptičnog su oblika, kad su valjni elementi kuglice (sl. 211 a), a pravokutnog, kad su to valjci (sl. 211 b). U prvom slučaju njihova površina je $f = \pi ab$, gdje su a i b poluosi elipse, a u drugom $f = 2bB$, gdje je $2b$ širina pravokutnika, a B njegova dužina, ujedno i dužina valjka. Respektivni srednji tlakovi na tim površinama su

$$p_s = \frac{F_0}{\pi ab}; \quad p_s = \frac{F_0}{2bB},$$

gdje je F_0 opterećenje po jednom valnom elementu.



Sl. 211. Dodirne površine valjnih elemenata u valjnim ležajima: a u kugličnim ležajima, b u valjkastim ležajima

Kako je poznato iz fizike, odnos između tih tlakova i Hertzo-vih tlakova s kojima treba računati određen je empirijskim formulama

$$p = 1,5 p_s \sqrt[3]{\frac{KE^2}{4,28}}; \quad p = 1,27 p_s \sqrt[2]{\frac{KE}{2,86}},$$

gdje je E modul elastičnosti konstrukcijskog materijala, a K valjni tlak po R. Stribecku. Pri tome je, kad su valjni elementi i prstenovi od različitog materijala,

$$E = \frac{2E_1E_2}{E_1 + E_2},$$

gdje su E_1 i E_2 njihovi moduli elastičnosti. Valjni tlak po R. Stribecku određen je izrazima

$$K = \frac{F_0}{D_1^2} \quad (\text{za slučaj sl. 211 a}); \quad K = \frac{F_0}{D_1 B} \quad (\text{za slučaj sl. 211 b}),$$

respektivno, gdje je D_1 promjer valjnog elementa, a φ tzv. faktor priljublivanja po Hertz. Pri dodiru na eliptičnoj površini taj je faktor funkcija niza koeficijenata, koji se mogu naći u tablicama priručnika u zavisnosti od stanovitih odnosa među promjerima zakrivljenosti površina na kojima se odvija kotrljanje. Za pravokutne dodirne površine za faktor priljublivanja upotrebljava se jednostavniji izraz

$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{D_1}{D_2}},$$

gdje D_1 i D_2 imaju značenje prema sl. 211 b.

Klizanje na tim dodirnim površinama također uzrokuje stanovite gubitke energije, te ugrijavanje i postepeno trošenje valjnih površina.

Osim tih, u valjnim ležajima pojavljuju se i drugi otpori trenja manjeg značenja, koji su uzrokovani netočnošću izrade dijelova, trenjem valjnih elemenata o kavez i o bokove prstena. U svim tim procesima trenje klizanja također je dominirajući činilac. Ipak svi ti nabrojani činioci zajedno ne mogu uzrokovati trenje klizanja u mjeri u kojoj se ono pojavljuje u kliznim ležajima. Zbog toga su otpori trenja u ustaljenom radu valjnih ležaja razmjerno maleni i gotovo nezavisni od broja okretaja i opterećenja. Na početku njihovog rada i pri zaustavljanju trenje je u njima, naravno, nešto veće.

Vrste valjnih ležaja. Uz već navedenu opću podjelu ležaja s obzirom na smjer djelovanja vanjskih sila (na radijalne, aksijalne i kombinirane), valjni ležaji se dijele još i prema obliku i broju paralelnih redova njihovih valjnih elemenata, prema odnosu njihove širine i promjeru njihovog vanjskog prstena, i prema sposobnosti prilagođavanja položaju osovine (vrtila) za vrijeme rada.



Sl. 212. Valjni elementi valjnih ležaja. 1 Kuglica, 2 valjak, 3 iglica, 4 krnji stožac, 5 simetrična bačvica, 6 asimetrična bačvica

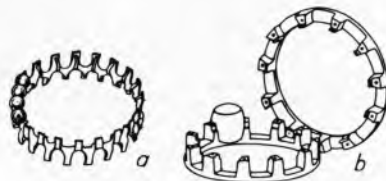
Prema obliku njihovih valjnih elemenata (sl. 212) među valjnim ležajima razlikuju se *kuglični* i *valjkasti* ležaji. Sve ostale vrste valjnih ležaja, tj. oni u kojima su valjni elementi iglice (igličasti), stošci (stožasti), bačvoliki elementi, tj. valjci i krnji stošci sa zaobljenim izvodnicama (bačvasti), smatraju se podvrstama valjkastih.

Prema broju redova njihovih valjnih elemenata valjni ležaji se dijele na *jednoredne* i *dvoredne*.

Prema odnosu njihove širine i promjeru njihovog vanjskog prstena valjni se ležaji dijele u serije: *naročito lake*, *lake*, *srednjo-teške* i *teške* izvedbe.

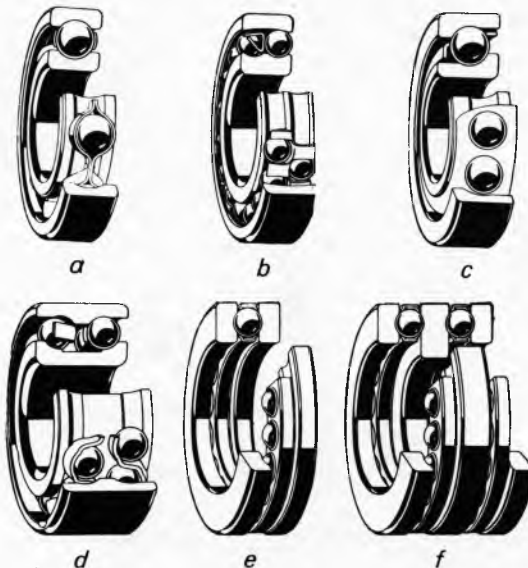
Slično kao i kod kliznih ležaja, i među valjnim ležajima razlikuju se *samopodesivi* (iskretljivi) ležaji koji mogu prilagođavati svoj položaj položaju vrtila za vrijeme rada i *kruti* ležaji koji to ne mogu.

Svi su tipovi valjnih ležaja standardizirani. Također su standardizirani i oblici njihovih valjnih elemenata i dimenzije njihovih kućišta, kavez, čiji su tipični oblici prikazani na sl. 213.



Sl. 213. Kavez valjnih ležaja, a Prešan kavez dvorednog kugličnog ležaja, b kavez jednorednog bačvastog ležaja

Kuglični ležaji. U *normalnoj* izvedbi (sl. 214 a) oba prstena ovih ležaja imaju žljebove (utore) s polumjerom zakrivljenja samo



Sl. 214. Najvažnije vrste kugličnih ležaja: a normalni jednoredni, b dvoredni samopodesivi, c jednoredni za radijalna opterećenja, d dvoredni za radijalno-aksijalna opterećenja, e potporni za jednosmjerna aksijalna opterećenja, f dvoredni za veća aksijalna opterećenja

nešto većim od polumjera kuglice, pa je priljublivanje njihovih valjnih površina dosta tijesno. Zbog toga je radijalna nosivost ovih ležaja velika čak i pri velikom broju okretaja, a mogu podnositi i manja aksijalna opterećenja.

Na sl. 214 b prikazan je dvoredni *samopodesivi* kuglični ležaj. Unutrašnja površina njegovog vanjskog prstena jest kuglin pojas. Gornja površina unutrašnjeg prstena ima, međutim, dva paralelna žlijeba (po jedan za svaki red kuglica) i čini s kavezom cjelinu koja je, kad je vanjski prsten učvršćen u kućištu, iskretljiva zajedno s vratilom. Takvi kuglični ležaji često se upotrebljavaju za nošenje transmisijskih osovina. Prikladni su za radijalna i manja aksijalna opterećenja.

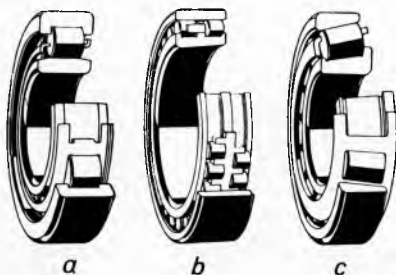
Na sl. 214 c i 214 d prikazani su jednoredni i dvoredni kuglični ležaji prikladni za preuzimanje ne samo *radijalnih* već i većih *aksijalnih* opterećenja. To omogućava oblik valjnih površina njihovih prstenova. Optimalni uvjeti za rad tih ležaja vladaju u režimu u kojem obje vrste opterećenja djeluju istovremeno.

Na sl. 214 e prikazan je potporni, jednoredni kuglični ležaj, koji služi za preuzimanje *aksijalnih* sila samo u jednom smjeru, tj. za nošenje okomitih vratila pri manjim brojevima okretaja. Takvi ležaji ne podnose radijalne sile. Dvoredni kuglični ležaj za preuzimanje većih aksijalnih opterećenja prikazan je na sl. 214 f.

Samopodesivi aksijalni kuglični ležaj za preuzimanje sila samo u jednom smjeru prikazan je na sl. 215. Prilagodavanje ovog ležaja položaju osovine (vratila) osigurano je kuglastom izvedbom donje površine nepokretnog prstena s polumjerom zakrivljenosti r , koja se naslanja na podložni prsten sa sukladnim udubljenjem. Središta obje ove kuglaste površine moraju pri tome ležati na simetrali vratila. Gornji prsten ovog ležaja učvršćen je na vratilu i okreće se zajedno s njim. Postoje i slične konstrukcije kugličnih ležaja za preuzimanje dvosmjernih opterećenja.

Valjkasti ležaji. Zbog većih dodirnih površina tarnih elemenata, u usporedbi s kugličnim ležajima, ovi ležaji mogu podnijeti skoro dvostruko veća opterećenja. Opterećenja, koja mogu podnijeti valjkasti ležaji, pogotovo su veća od podnosivih za kuglične ležaje, ako prstenovi obuhvaćaju valjke i na dijelu njihovih čelnih površina. Valjci ovih ležaja mogu biti kratki (npr. s promjerom jednakim njihovoj dužini) ili dugi. Kratki valjci bolji su od dugih jer se dađu točnije izraditi. Valjkasti ležaji dopuštaju, u određenim granicama, pomicanje vratila koje nose u aksijalnom smjeru bez znatnog povećanja otpora. Prikladni su za visoke brojeve okretaja, podnose jaka opterećenja i udarce u pogonu.

Jedna od najjednostavnijih izvedbi *radijalnih* valjkastih ležaja prikazana je na sl. 216 a, gdje samo vanjski prsten obuhvaća čelne površine valjaka. U dvorednom valjkastom ležaju, koji služi za *veća opterećenja* (sl. 216 b), to čini samo unutrašnji prsten.

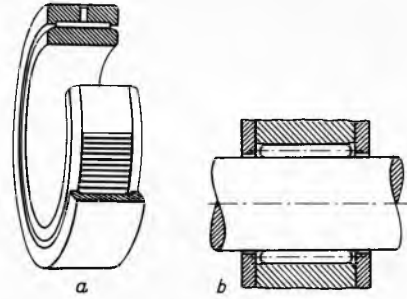


Sl. 216. Najvažnije vrste valjkastih ležaja: a jednoredni, b dvoredni, c stožasti

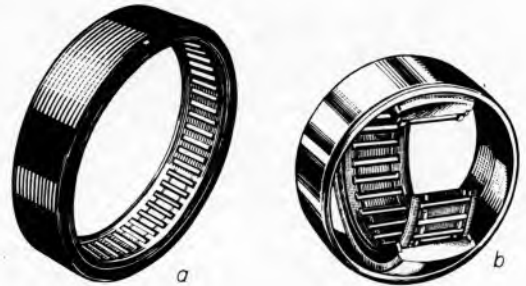
Stožasti radijalno-aksijalni ležaj, koji služi za preuzimanje jakih kombiniranih radijalnih i jednosmjernih aksijalnih opterećenja, prikazan je na sl. 216 c. Njegovi valjni elementi, krnji stožci,

položeni su pod stanovitim kutom prema osovini. Velika je prednost takvih ležaja u tome što im se vanjski i unutrašnji prsten mogu montirati odvojeno.

Igličasti ležaji. Na sl. 217 i 218 prikazane su krute izvedbe, a na sl. 218 b iskretljiva izvedba igličastih ležaja. Njihovi valjni elementi (v. sl. 212 3), tzv. *iglice*, zapravo su tanki valjci sa zaobljenim rubovima, s promjerom 1,5...5 mm i dužinom 5...10 mm.



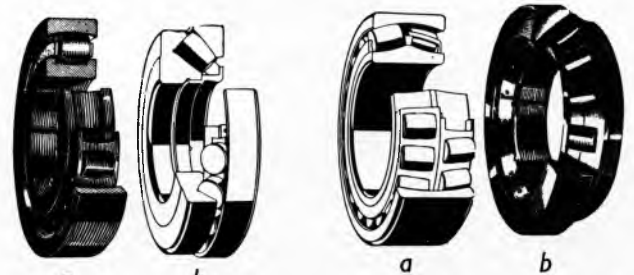
Sl. 217. Kruti igličasti ležaj bez kaveza: a s vanjskim i unutrašnjim prstenom, b bez prstena



Sl. 218. Igličasti ležaj: a kruti ležaj bez unutrašnjeg prstena, b samopodesivi igličasti ležaj s kavezom bez unutrašnjeg prstena

Igličasti se ležaji izrađuju s oba ili samo s vanjskim prstenom, s kavezom ili bez njega. Kavezne izvedbe igličastih ležaja omogućavaju rad pri višim brojevima okretaja u usporedbi s beskavezanim. (Kod posljednjih može doći do okretanja iglica u suprotnim smjerovima.) Zbog toga se danas pretežno proizvode kavezni igličasti ležaji. Iglice igličastih ležaja bez unutrašnjeg prstena valjaju se izravno po površini osovine. Njihova glavna prednost jest mala debljina, zbog čega zauzimaju malo prostora, pa se upotrebljavaju tamo gdje je to važno. Ti ležaji služe isključivo kao radijalni. Prikladni su za rad pri visokim brojevima okretaja, imaju veliku nosivost i dobro podnose udarce u pogonu. Postoje i njihove dvoredne izvedbe koje mogu podnositi još veća radijalna opterećenja. Općenito se igličasti ležaji smatraju najsuavremenijim od svih vrsta ležaja, pa se sve više primjenjuju u strojogradnji. Naročito su se pokazali prikladnim u zrakoplovstvu.

Bačvasti ležaji. Na sl. 219 prikazane su neke od izvedbi radijalnih bačvastih ležaja. Valjne površine prstenova ovih ležaja imaju polumjer zakrivljenosti kakav odgovara zakrivljenosti pla-



Sl. 219. Radijalni bačvasti ležaj: a s asimetričnim bačvicama, b sa simetričnim bačvicama

števa valjnih elemenata. To i okolnost da vanjski prsten ne obuhvaća čelne površine valjnih elemenata čini ove ležaje samopodesivim. Unutrašnji prsten dvorednih radijalnih bačvastih ležaja

ima, naravno, dva posebna žlijeba koji služe kao vodilice međusobno nezavisnih redova valjnih elemenata. Jednoredni radijalni bačvasti ležaji slabo podnose aksijalna opterećenja, ali ih dvoredni mogu prenositi.

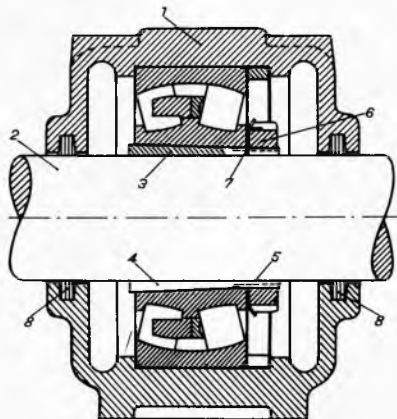
Od svih bačvastih ležaja najveću nosivost imaju *aksijalni samopodesivi* ležaji prikazani na sl. 220. Istovremeno oni podnose i znatna radijalna opterećenja i razmjerno više okretaja. Njihovi valjni elementi obično stoje pod kutom od 45° prema vratilu. Osim samopodesivosti sferno zakrivljenje valjnih površina njihovih prstenova osigurava i jednoličnu raspodjelu opterećenja na sve valjne elemente. Pri njihovoj upotrebi ipak treba imati na umu da oni mogu preuzeti velika aksijalna opterećenja samo u jednom smjeru.

Općenito se smatra da bačvasti ležaji imaju najveću nosivost od svih valjnih ležaja jednakih dimenzija. Oni također dobro podnose udarce i potrese. Zbog tih svojstava primjenjuju se u mnogim područjima teške strojogradnje (npr. u valjaoničkim strojevima, željezničkim vozilima, mostogradnji, dizalicama, strojevima za lomljenje kamena, teškim pužnim prijenosima, za nošenje koljenastih vratila, vratila brodskih propelera, kormila).

Konstruktivski materijali valjnih ležaja. Kućišta valjnih ležaja izrađuju se obično od sivog lijevanog željeza dobre kakvoće. Kućišta velikih i teško opterećenih ležaja grade se od čeličnog lijeva, a malih i laganih, i od lakih metala (npr. od duraluminijuma). Valjni dijelovi ležaja najčešće se izrađuju od krom-čelika s ~ 1,5% Cr, a često i od krom-nikal-čelika. Konstruktivski materijal valjnih ležaja vrlo velikih dimenzija jest i silicijum-manganski čelik, a u posebnim slučajevima upotrebljavaju se i nerđajući čelici i antimagnetske bronce. Za potrebe kemijske industrije proizvode se u posljednje vrijeme i valjni ležaji od keramičkih materijala velike čvrstoće (npr. s lomnim opterećenjem kuglica promjera 20 mm od 3000 kp). Čelik za izradu valjnih elemenata mora biti homogen i vrlo čist. Nakon oblikovanja ti se dijelovi obrađuju kaljenjem, brušenjem i finim poliranjem. Kaljenjem se mora postići tvrdoća $HR_c = 62 \dots 65$. Nakon toga kontroliraju se njihove dimenzije. Dozvoljena međusobna odstupanja promjera valjnih elemenata u jednom ležaju ne prelaze 0,001 mm.

Kavezi valjnih ležaja izrađuju se od materijala koji moraju biti mekši od materijala valjnih elemenata. To su štancani čelični lim, bronca, slitine aluminijuma (za lijevane kaveze) i plastične mase (uglavnom armirani tekstoliti).

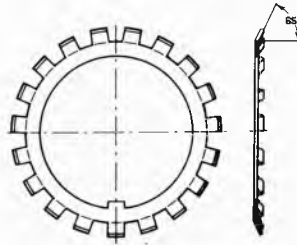
Montaža i ugradnja valjnih ležaja. Slično kao i kod kliznih ležaja, kućišta valjnih ležaja također se uglavnom izrađuju u dvodijelnoj izvedbi. Međutim, valjni se ležaji ne mogu izraditi u dva dijela. Kako unutrašnji prstenovi valjnih ležaja moraju čvrsto nasjedati na vratila, oni se, pogotovo kad su vratila duga, dosta teško montiraju.



Sl. 221. Spoj valjnog ležaja s vratilom s pomoću stezne ljuske. 1 Dvodijelno kućište, 2 vratilo, 3 stezna ljuska, 4 uzdužni preoz ljuske, 5 navoj ljuske, 6 matica, 7 osigurač, 8 brtveni prsten

Montaža valjnih ležaja lakše se izvodi steznim spajanjem uz oprezno zagrijavanje na 70...90 °C, uljnom kupkom ili s pomoću visokofrekventne struje. Osim toga, naročito kad su osovine duge, kao što je npr. slučaj kod transmisijских osovina, ili, kad se montaža

i demontaža ležaja obavlja često, pribjegava se radi olakšanja i primjeni valjnih ležaja sa steznom ljuskom (sl. 221). To je šuplji krnji stožac s preozom uzduž



Sl. 222. Zvezdasti osigurač matice stezne ljuske valjnog ležaja

jedne izvodnice s narezom na užem kraju koji se lako navuče na vratilo, pa se na njega natisne ležaj s pomoću matice. Zato su otvori unutrašnjih prstenova takvih ležaja također konični. Položaj stezne matice fiksira se zvjezdastim osiguračem (sl. 222).

Kako se valjni ležaji primjenjuju u čitavom području strojogradnje, postoji mnoštvo načina njihove montaže i ugradnje.

Nekoliko takvih tipičnih primjera prikazano je na sl. 223...228.

Podmazivanje valjnih ležaja. Iako je trenje u njima znatno manje nego u kliznim, ovi se ležaji moraju također podmazivati. Time se smanjuje ne samo trenje valjnih površina, već i trenje između valjnih elemenata i kaveza. Mazivo u valjnim ležajima je vrlo važno za njihovo brtvljenje, a osim toga štiti ih od korozije. Pri normalnim temperaturama njihovog pogona, tj. između 40 i 50 °C (često one nisu više od temperature okolišnog zraka), valjni se ležaji obično podmazuju specijalnim gustim mastima. Kad su njihove temperature iznad 70 °C (nije preporučljivo prekoračenje temperature od 80 °C), kao i pri više okretaja, prikladnije je uljevito mazivo. U svakom slučaju, mazivo za valjne ležaje mora odgovarati stanovitim zahtjevima kakvoće, sličnim onima koji se postavljaju i na maziva za klizne ležaje. Naročito je važno da maziva za valjne ležaje ne sadržavaju vodu, niti korodivne tvari, posebno kiseline i soli. Potrošnja je maziva u valjnim ležajima u usporedbi s kliznim mala, ako su ispravno zabrtvljeni. Na to je potrebno posebno obratiti pažnju kad se ti ležaji podmazuju uljem, i to ne samo da bi se spriječilo istjecanje ulja već i prodiranje škodljivih tvari (vode, prašine, kiseline, sitne strugotine itd.) u ležaj.

Nosivost i trajnost valjnih ležaja. Nosivost valjnih ležaja ovisna je o svojstvima materijala od kojih su građeni, broju i obliku njihovih valjnih elemenata, priljubljuvanju valjnih površina i o broju valjanja izvršenih preko neke točke na putanji (preko prstena). Osim toga nosivost valjnih ležaja u radu (dinamička nosivost) razlikuje se od njihove nosivosti kad oni miruju (statička nosivost). Dinamička je nosivost, naravno, od većeg značenja.

Statička nosivost valjnih ležaja. I kad miruje, a i pri vrlo malom broju okretaja valjni ležaj može biti opterećen tako da uslijed pritiska njegovih valjnih elemenata nastaju deformacije u njegovim prstenovima. Ležaj ostaje dalje sposoban za rad samo ako se te deformacije zadržavaju ispod stanovite granice. Zbog toga se pod statičkom nosivošću valjnog ležaja C_0 razumijeva njegovo opterećenje u mirujućem stanju, pri kojem nastupaju trajne deformacije stanovite veličine. Za dopuštenu granicu veličine tih deformacija uzima se 0,0001 od promjera valjnog elementa na najviše nepregnutom mjestu. Dozvoljeno statičko opterećenje valjnih ležaja F_0 izračunava se s pomoću faktora sigurnosti S_0 iz jednadžbe

$$F_0 = \frac{C_0}{S_0}$$

Vrijednosti C_0 navedene su u svakom katalogu valjnih ležaja, a faktor sigurnosti uzima se iz slijedeće tablice:

| Vrst pogona | Faktor sigurnosti S_0 |
|--------------------------------|-------------------------|
| miran, bez potresa i vibracija | 1,5 ... 1 |
| normalan | 1 ... 2 |
| s čestim udarcima | 2 ... 4 |

Maksimalno dozvoljeno opterećenje valjnih ležaja jednako je njihovoj statičkoj nosivosti.

Dinamička nosivost valjnih ležaja. Besprijeckorno ugrađeni, podmazani i zabrtvljeni valjni ležaj može pod stanovitim opterećenjem i brojem okretaja raditi dotle, dok uslijed promjenljivih opterećenja na nekom njegovom dijelu ne nastupi zamor materijala. Zbog toga je njegova trajnost određena brojem okretaja koje može napraviti za vrijeme od ugradnje do nastupa te pojave.

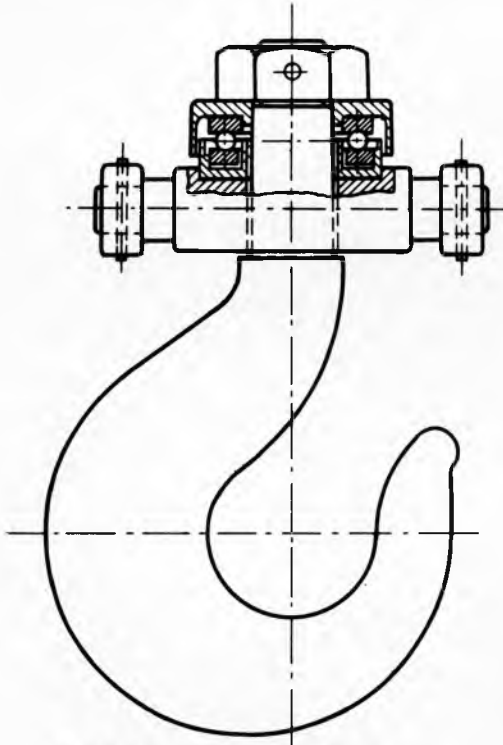
Taj broj ovisan je o odviše velikom broju činilaca da bi mogao biti općenito egzaktan određen. To se očituje i u različitoj trajnosti inače sasvim jednakih ležaja koji rade pod sasvim jednakim uvjetima, što praktički znači da je trajnost valjnih ležaja promjenljiva veličina. Da bi se ipak moglo računati s nekom stalnom (s tehničkog i ekonomskog stanovišta) trajnošću, uveden je pojam nominalne trajnosti L valjnih ležaja. To je broj okretaja kojega 90% od stanovitog, većeg broja potpuno jednakih valjnih ležaja

moгу pod jednakim uvjetima napraviti ili prekoračiti, prije nego što na nekom njihovom dijelu nastupe pojave zamora materijala. (Pri tome se dopušta u preostalim 10% od te količine ležaja da pojave zamora materijala nastupe i ranije.)

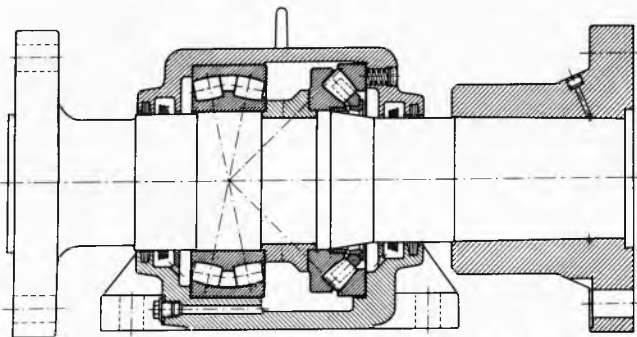
Nominalna trajnost valjnih ležaja, naravno, ovisi o njihovom opterećenju. Kad opterećenje djeluje na obodnu površinu unutrašnjeg prstena, ta zavisnost određuje se izrazima

$$L = \left(\frac{C}{F}\right)^3; \quad L = \left(\frac{C}{F}\right)^{\frac{10}{3}}$$

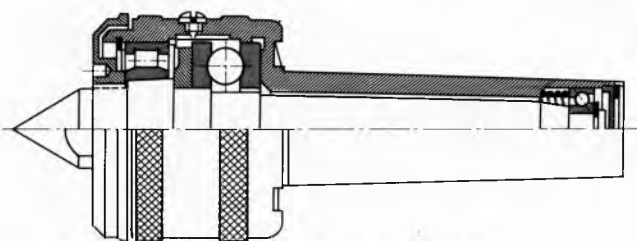
respektivno za kuglične i valjkaste ležaje, gdje je C njihova dinamička nosivost, a F njihovo idealno ili ekvivalentno opterećenje, tj. ono za koje se pretpostavlja da djeluje jednolično za čitavo vrijeme trajanja njihovog rada. Dinamička je nosivost valj-



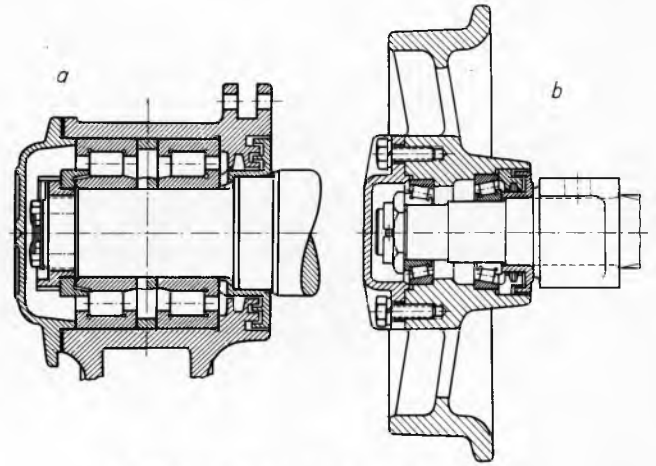
Sl. 223. Ležaj okretljive kuke za dizanje tereta



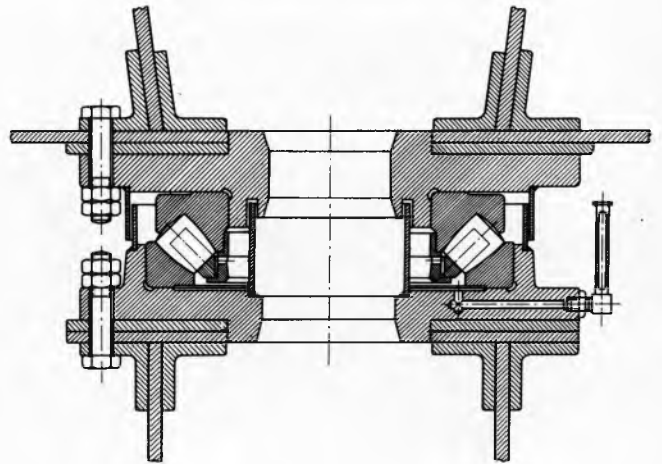
Sl. 225. Tlačni ležaj vratila brodskog propelera



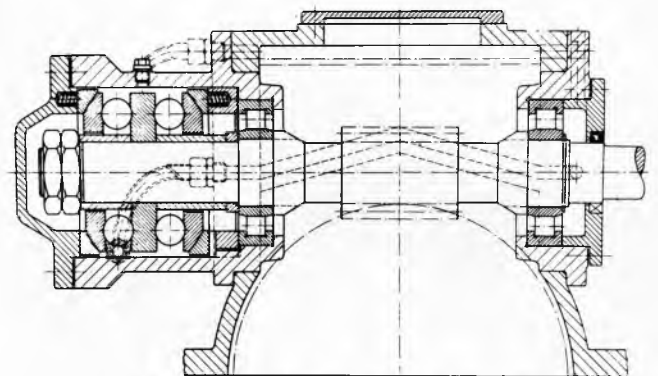
Sl. 227. Ležaji šiljka jahača tokarske klupe



Sl. 224. Ležaj osovine: a tramvaja, b vagoneta



Sl. 226. Potporni ležaj okretljivog stupa dizalice



Sl. 228. Ležaji pužnog vijka pužnog reduktora

nih ležaja ovdje njihova karakteristika koja odgovara opterećenju, pri kojem je njihova nominalna trajnost milijun okretaja, ili 500 efektivnih radnih sati uz broj okretaja od $33,3 \text{ min}^{-1}$. Kao i statička, tako je i dinamička nosivost svakog valjnog ležaja navedena u svakom katalogu ležaja.

Za primjenu malo prije navedenih izraza važno je ispravno određivanje ekvivalentnog opterećenja. Pri tome se moraju uzeti u obzir sva moguća djelovanja vanjskih sila na ležaj, njihova eventualna nejednoličnost, odnos između radijalnih i aksijalnih sila itd., a također i traženi broj okretaja, tvrdoća elemenata valjanja (ako je $HR_c < 60$) itd., za što služe faktori koji se također navode u katalogima proizvođača (faktor broja okretaja f_n , trajanja f_t , tvrdoće materijala f_H). Osim toga u novije se vrijeme za određivanje trajnosti valjnih ležaja uzima u obzir i njihova radna temperatura. U tablicama kataloga proizvođača navedene nosivosti vrijede do 100°C . Kod prekoračenja te temperature treba već računati sa smanjivanjem tvrdoće valjnih elemenata i time njihove nosivosti, koju treba tada pomnožiti s faktorom temperature f_t uzetim iz dijagrama na sl. 229.

Sl. 229. Korekcijski faktor nosivosti valjnih ležaja za temperature iznad 100°C

efektivnim radnim satima. Tako izražene vrijednosti ove karakteristike dobivaju se iz nominalnih s pomoću formule

$$L_h = \frac{10^6 L}{60n}$$

Izbor valjnih ležaja. Izbor valjnih ležaja na temelju njihove trajnosti obavlja se prema određenom roku trajanja uređaja ili stroja u koji ih treba ugraditi. Normalna trajnost valjnih ležaja izražena efektivnim radnim satima u zavisnosti od primjene prikazana je u tablici:

| Uvjeti rada | Trajnost (10^3 efektivnih sati) |
|--|---------------------------------------|
| rijetka upotreba ležaja | 0,5 |
| avionski motori | 0,5...1,7 |
| kratkovremeni ili povremeni rad | 4...8 |
| rad s prekidima | 8...13 |
| 8-satni pogon uz nepotpuno iskorištenje ležaja | 13...20 |
| 8-satni pogon uz potpuno iskorištenje ležaja | 20...30 |
| neprekidni pogon | 45...60 |
| neprekidni pogon i velika sigurnost | 100...200 |

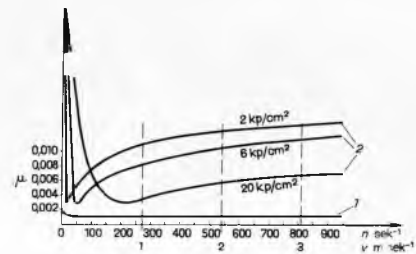
Kako su svi valjni ležaji standardizirani, ne treba ih proračunavati. Dovoljno je samo s pomoću tablica i kratkog računa navedenog u svakom katalogu proizvođača (npr. SKF, INA, FAG itd.) odabrati tip i veličinu ležaja prema uvjetima njegovog rada.

Pri tome u praksi mogu nastati dva slučaja. U prvom od tih treba provjeriti da li trajnost odabranog ležaja zadovoljava zadane uvjete pogona, tj. koliki broj radnih sati on može izdržati. Tada se iz kataloga proizvođača očita vrijednost njegove nosivosti za uvjete o kojima se radi, izračuna njegovo opterećenje (ako nije već poznato), pa se već prema slučaju s pomoću navedenih formula izračuna njegova nominalna i odatle njegova trajnost u efektivnim radnim satima. Ležaj zadovoljava uvjete primjene ako trajnost u efektivnim radnim satima odgovara zahtjevima rada stroja prema smjernicama iz prikazane tablice.

U drugom slučaju moraju se tip i dimenzije ležaja odabrati tako da ležaj ima unaprijed određenu trajnost. Tada se računa obrnutim putem. (Najprije se izračuna nominalna trajnost ležaja i odatle njegova dinamička nosivost, prema kojoj se iz tablica u katalogu proizvođača odaberu tip i veličina ležaja koja joj odgovara.)

Prednosti i nedostaci valjnih ležaja. Valjni ležaji nemaju već navedene nedostatke kliznih ležaja. Manji otpori trenja u valjnim ležajima čine da su gubici energije u njima približno samo polovica gubitaka u kliznim ležajima ($1 \dots 2\%$). Zbog toga su zamjenom kliznih ležaja valjnim ostvarive znatne uštede energije. S druge strane, zbog njihovih malih tarnih površina promjene su koeficijenta trenja u ovim ležajima u zavisnosti od broja okretaja ili relativne brzine valjnih elemenata neznatne, pa su veličine tog koeficijenta pri pokretanju i zaustavljanju skoro jednake onima u ustaljenom pogonu. Usporedba promjena koeficijenta trenja pri valjanju s promjenama koeficijenta trenja pri klizanju prikazana je dijagramom na sl. 230.

Tim prednostima valjnih ležaja pridružuju se još i već spomenuta ekonomičnost potrošnje maziva, jednostavnost u usporedbi s kliznim ležajima, manje dimenzije i lakoća konstrukcije. Velika prednost valjnih ležaja je i u tome što, za razliku od kliznih ležaja, njihova standardizacija omogućava brzu zamjenu.



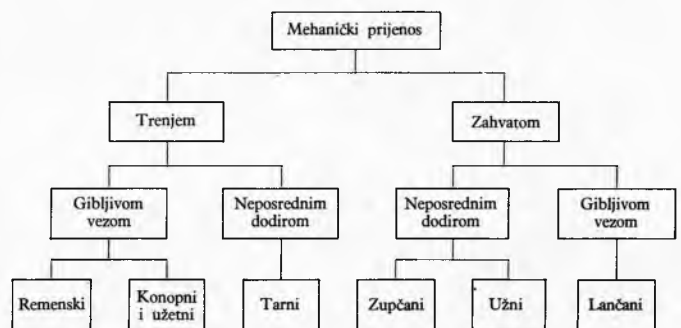
Sl. 230. Usporedba promjena koeficijenta trenja u valjnim i kliznim ležajima prema brzini rotacije. 1 Krivulja promjene u valjnim ležajima, 2 Stribeckove krivulje za klizne ležaje

Jedan od najvećih nedostataka valjnih ležaja u usporedbi s kliznim jest teža montaža i u vezi s time potreba uvježbane radne snage. Dalji nedostaci valjnih ležaja jesu njihova osjetljivost prema udarcima, posebno u aksijalnom smjeru, neugodan šum u pogonu pri velikim brzinama rotacije, naročito kod kugličnih ležaja, i u usporedbi s kliznim ležajima manja trajnost u jednakim uvjetima pogona. Osim toga, za razliku od kliznih ležaja, trajnost valjnih ležaja opada s povećanjem pogonskog broja okretaja.

Ipak su prednosti valjnih ležaja tolike, da su oni od pronalaska (1794 u Velikoj Britaniji, a nešto kasnije i u Njemačkoj) do suvremenog doba uvelike potisnuli upotrebu kliznih ležaja, pa se danas upotrebljavaju u svim područjima strojogradnje i u svim dimenzijama $1,5 \dots 2700 \text{ mm}$ vanjskog promjera, s težinama od $0,5 \text{ g}$ do $3,5 \text{ t}$. Rjeđe se događa da nedostaci valjnih ležaja učine prikladnijom primjenu kliznih ležaja.

ELEMENTI ZA MEHANIČKI PRIJENOS SNAGE

Elementi za mehanički prijenos snage dijelovi su sklopova koji rotacijom prenose mehaničku energiju s vodećih na vodene



Sl. 231. Klasifikacija mehaničkih prijenosa snage

strojeve i uređaje. Pri tome je prenošenje obično u vezi s promjenama djelujućih sila, broja okretaja i momenata vrtnje, odnosno torzije

$$M_t = \frac{N}{2\pi n} = \frac{N}{\omega} = Fr,$$