

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo



Katedra za strojne elemente in razvojna vrednotenja

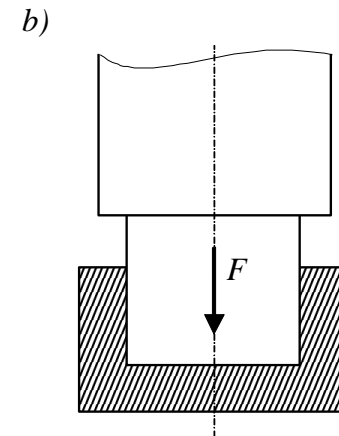
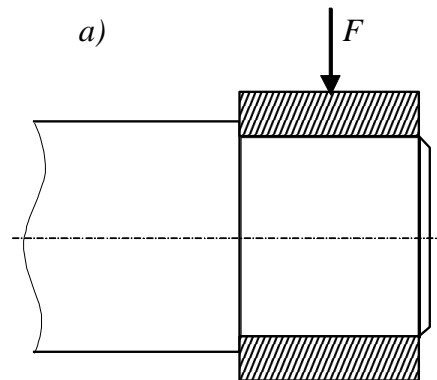
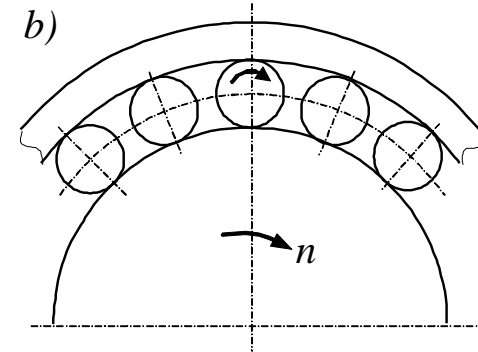
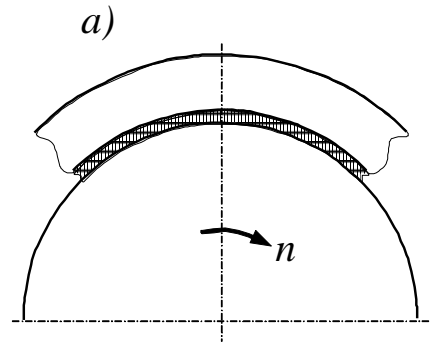


Strojni elementi 1

Ležaji

Gorazd Fajdiga, Marko Nagode

Vrste ležajev

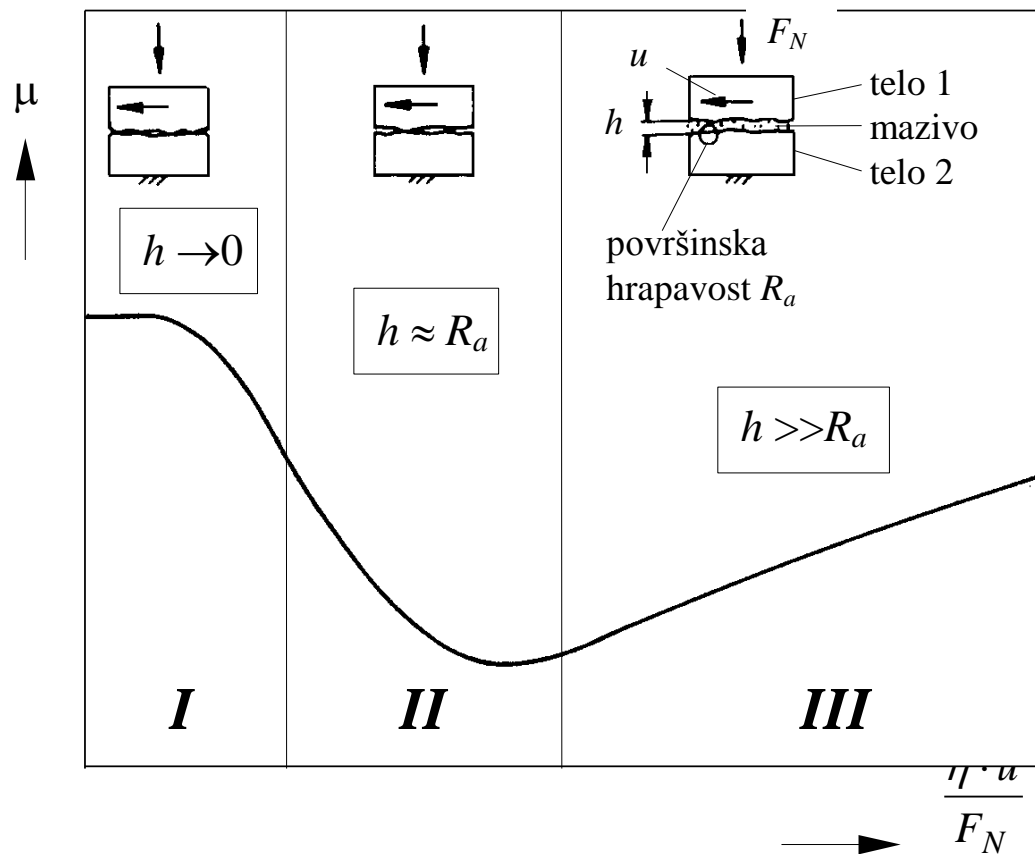


Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo



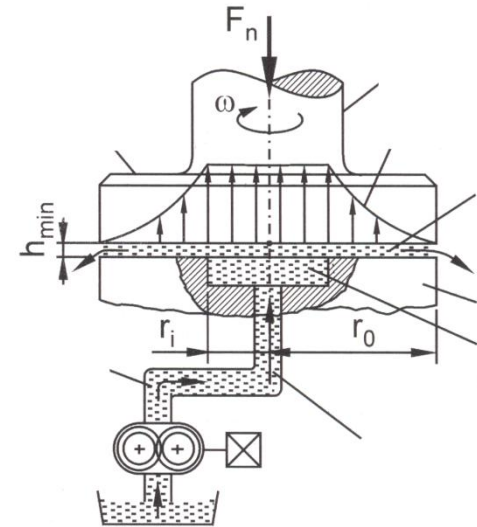
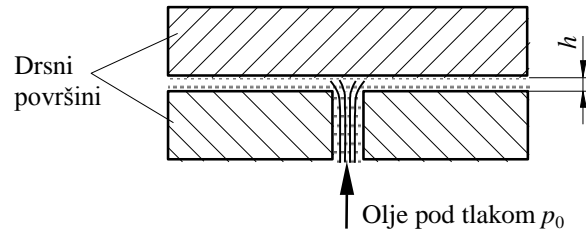
Katedra za strojne elemente
in razvojna vrednotenja

Princip delovanja in mazanje drsnih ležajev

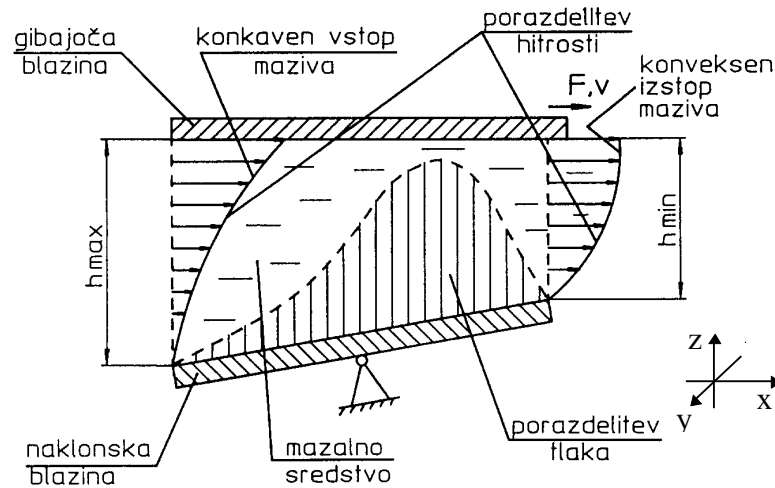


Princip mazanja

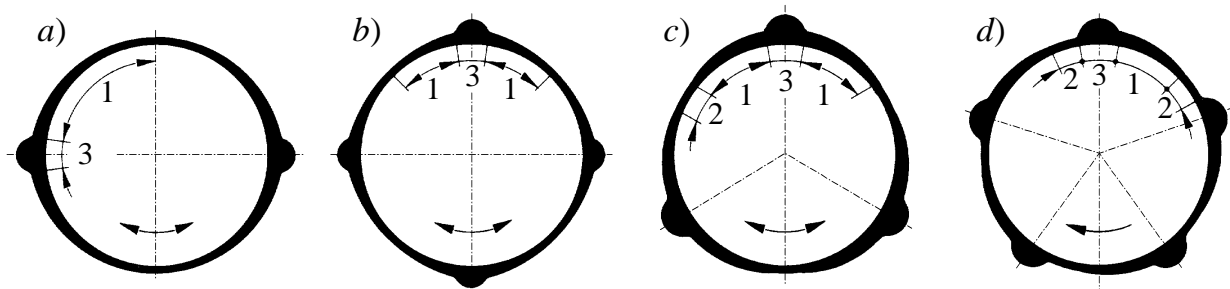
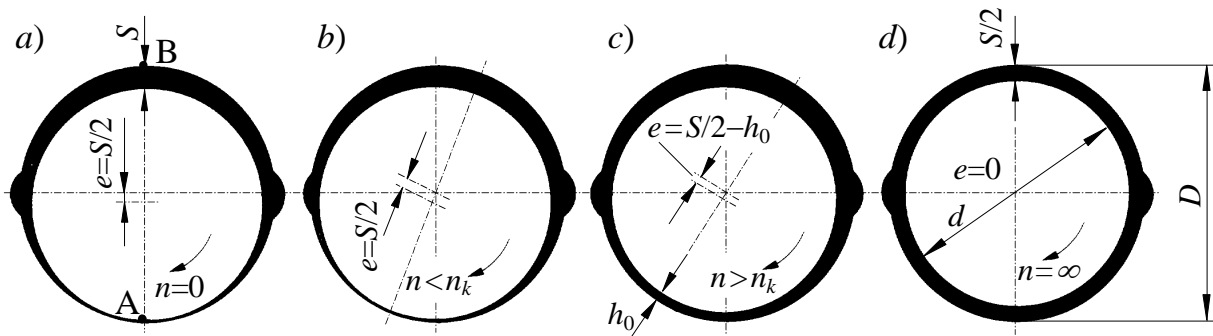
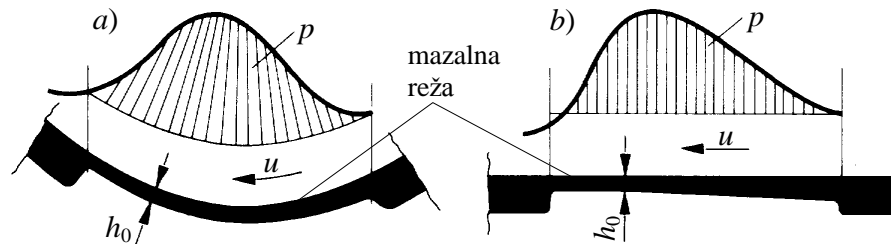
- hidrostatsično



- hidrodinamično



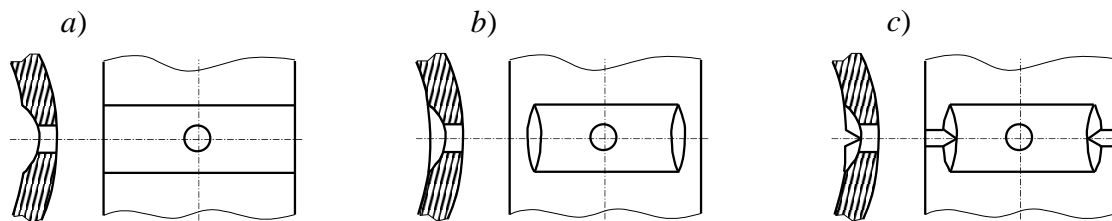
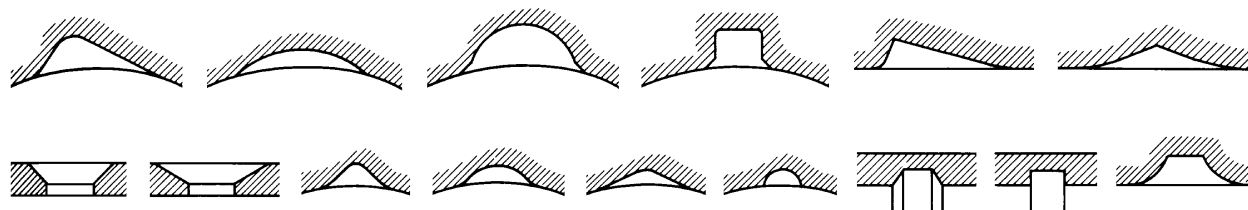
Hidrodinamično mazanje drsnih ležajev



1- klinasta reža, 2- vzporedna reža, 3- mazalni utor

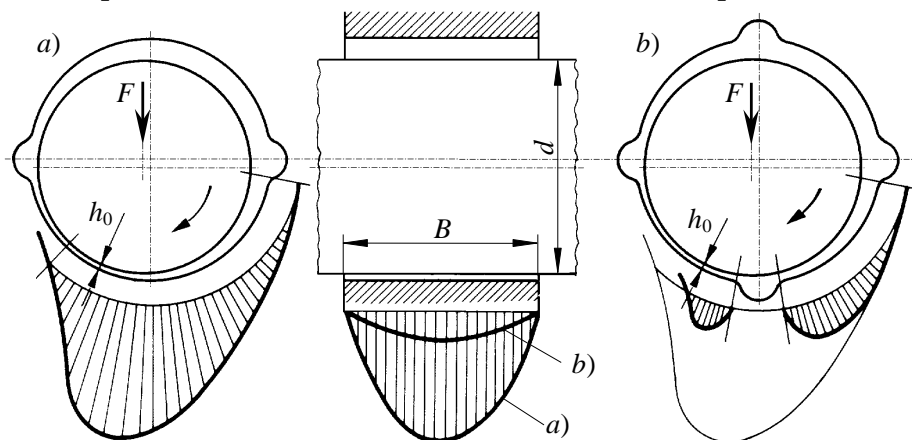


Izvedbe, dolžine in položaji mazalnih utorov



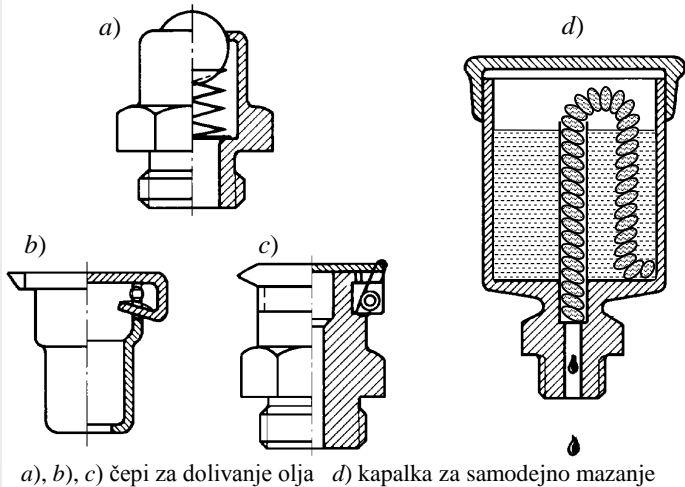
pravilno

nepravilno

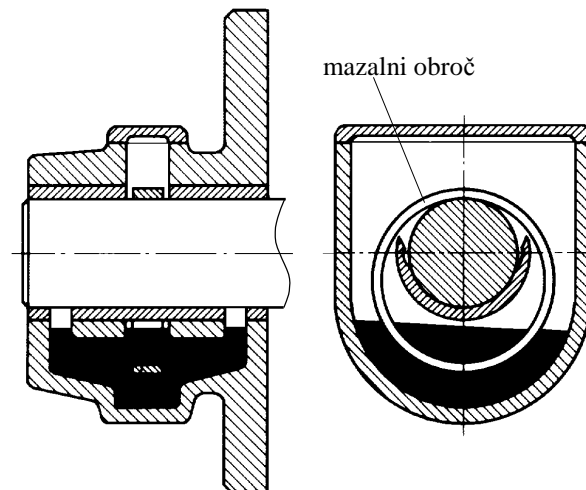


Mazanje drsnih ležajev z oljem

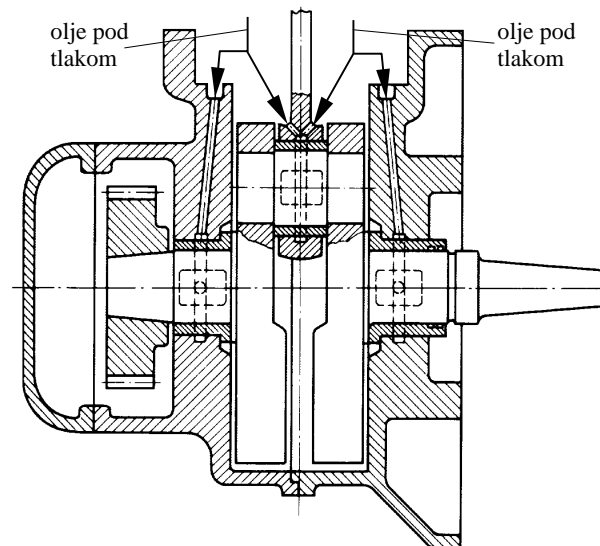
Ročno mazanje



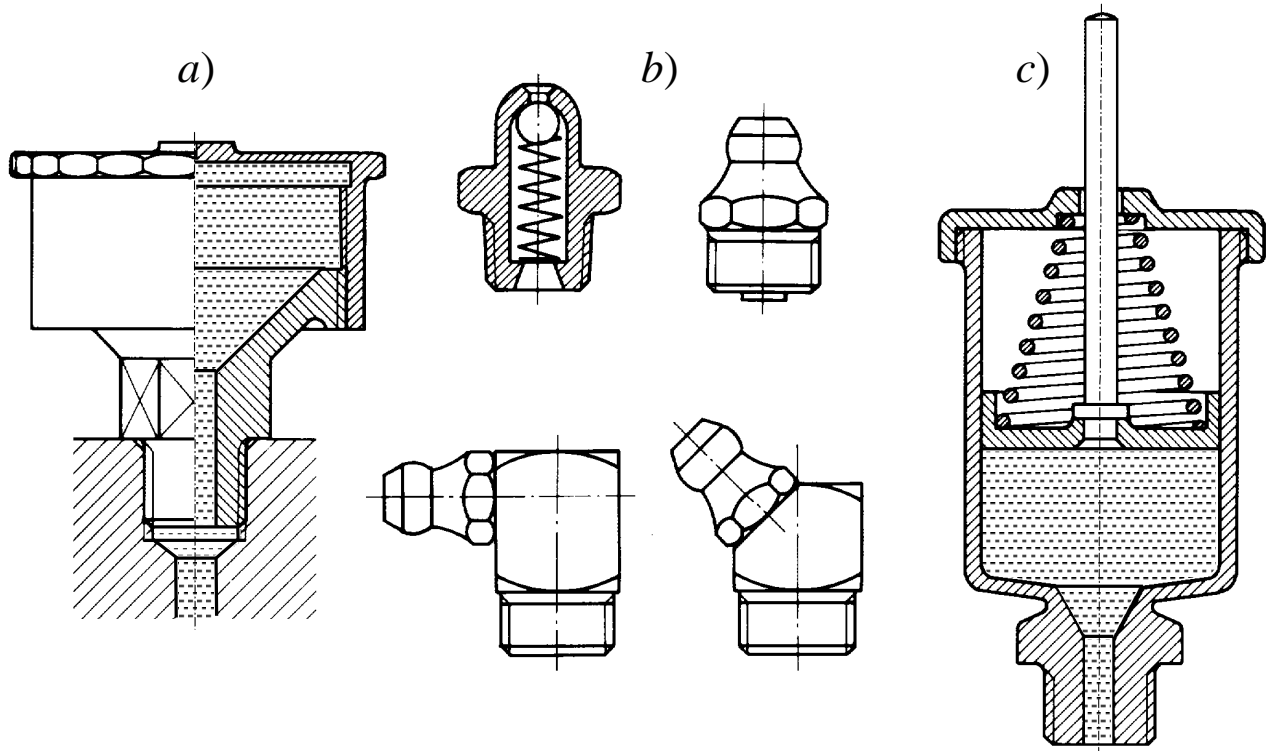
Potapljalno mazanje



Obtočno mazanje



Mazanje drsnih ležajev z mastjo



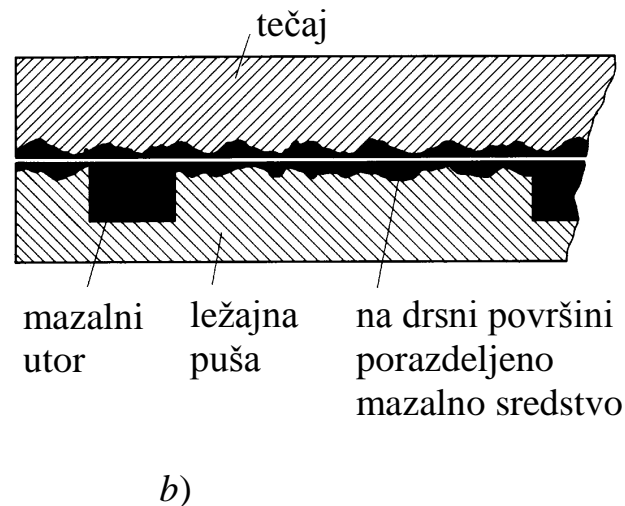
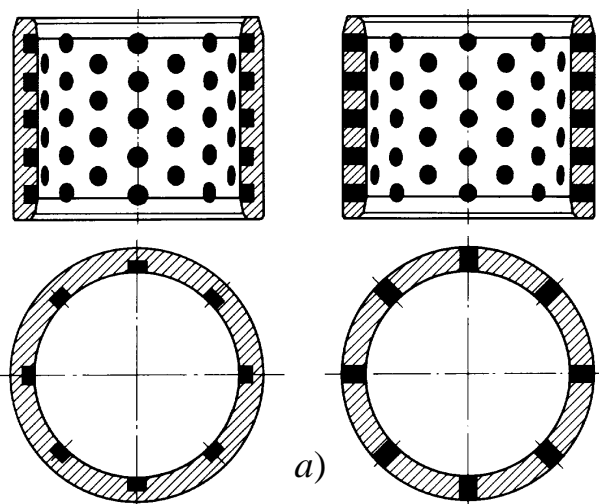
Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo



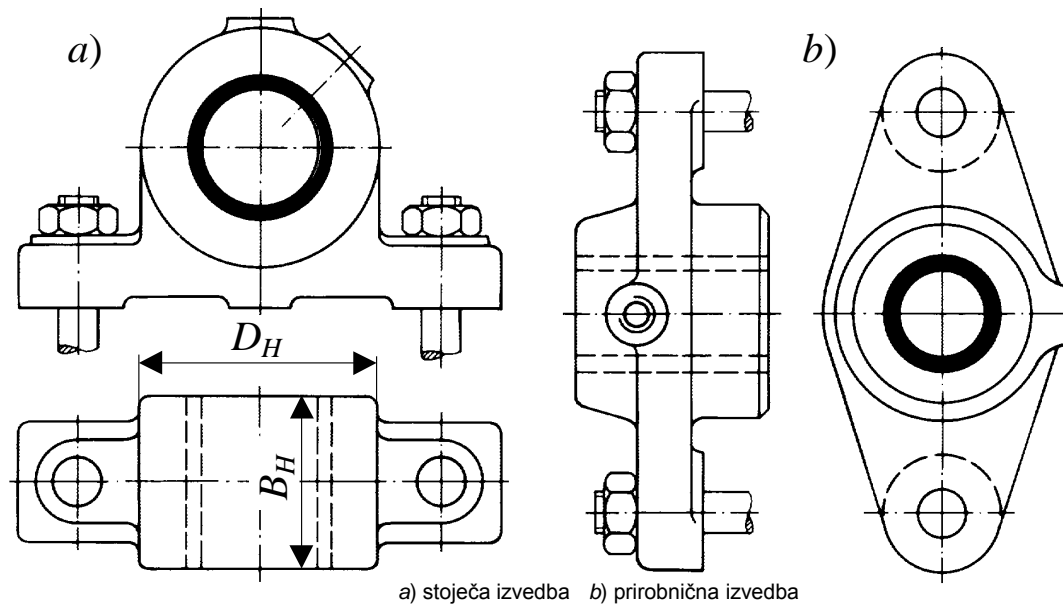
Katedra za strojne elemente
in razvojna vrednotenja

Mazanje drsnih ležajev s trdimi mazivi

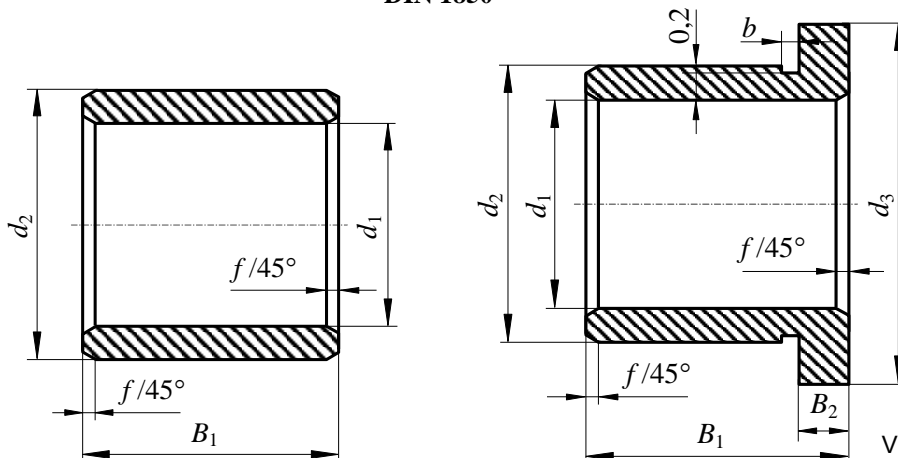
- svinec (Pb), grafit, molibdenov disulfid (MoS₂), volframov disulfid (WS₂) in drugo.



Konstruktivske izvedbe radialnih drsnih ležajev



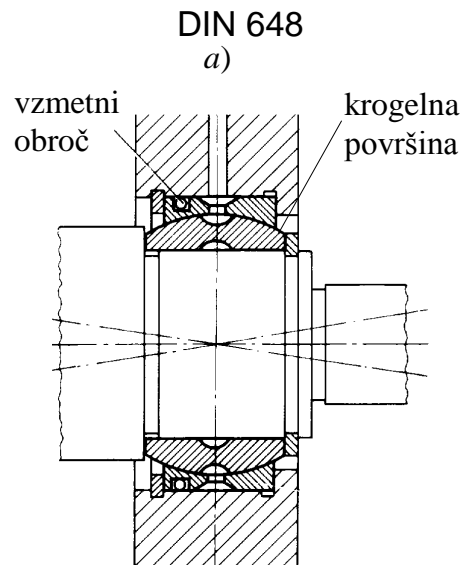
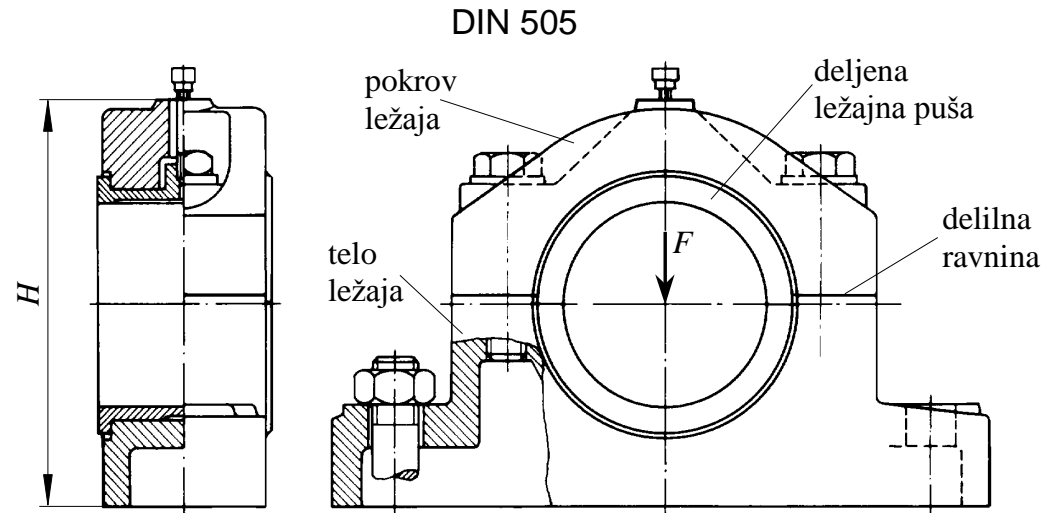
DIN 1850



Vir: Ren / Glodež Strojni elementi 1. del

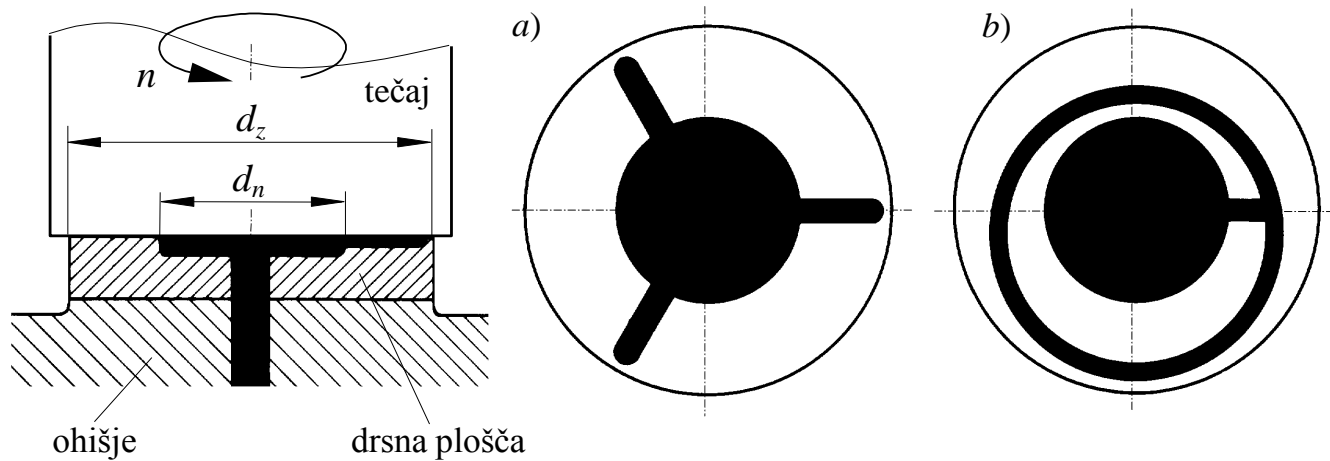


Konstruktivske izvedbe radialnih drsnih ležajev



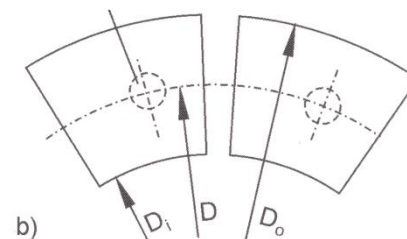
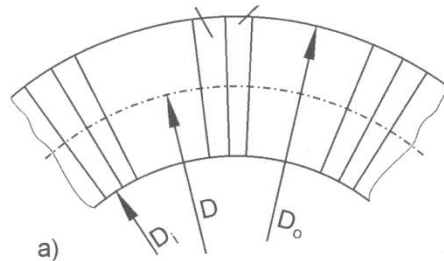
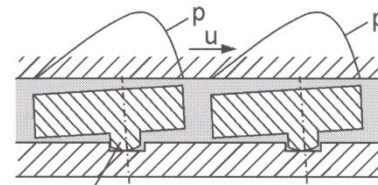
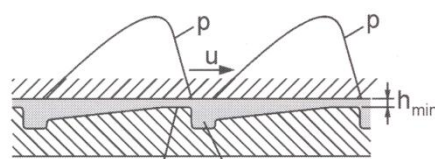
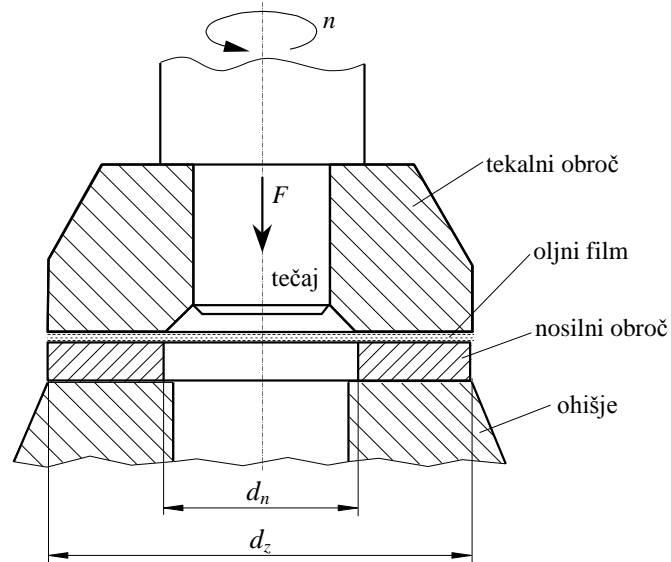
Konstruktivske izvedbe aksialnih drsnih ležajev

Enostavni aksialni drsni ležaj – mešano mazanje

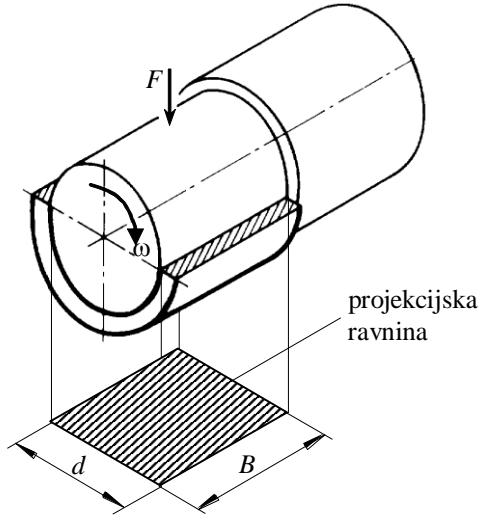


Konstruktivske izvedbe aksialnih drsnih ležajev

Hidrodinamično mazanje

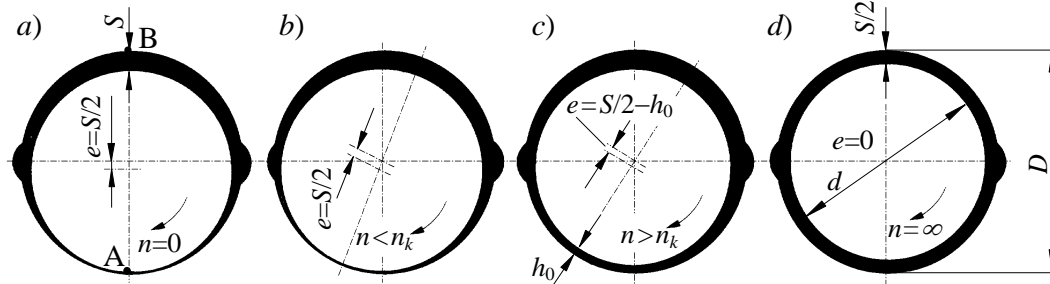


Preračun radialnih drsnih ležajev



Koraki pri dimenzioniranju

- poznamo: F , ω , d , B
- izberemo kombinacijo materialov
- določimo absolutno (S), relativno (ψ) zračnost, ekscentričnost e ter relativno ekscentričnost ε
- kontroliramo tlak ($p \leq p_{dop}$)
- najmanjša debelina oljnega filma h_0
- toplotna bilanca ležaja ($P_{tr} \rightarrow Q$)



$$\psi = S/d$$

$$\varepsilon = \frac{e}{S/2}$$

Relativna zračnost ψ

- **kovinski** radialni drsni ležaji s hidrodinamičnim mazanjem
- iz **sintranih kovin**
- iz **umetnih snovi**

$$\psi \approx 0,001 \dots 0,002$$

$$\psi \approx 0,0015 \dots 0,0025$$

$$\psi \approx 0,003 \dots 0,0045$$

DIN 31652

$$\psi \approx 8 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt[4]{u}$$

Najmanjša debelina oljnega filma h_0

$$h_0 = 0,5 \cdot D \cdot \psi \cdot (1 - \varepsilon) \geq h_{0\text{mej}} ; h_{0\text{mej}} = f(d, u)$$



Preračun radialnih drsnih ležajev

Sommerfeldovo število S_o

$$S_o = \frac{30 \cdot 10^6 \cdot p \cdot \psi^2}{\pi \cdot n \cdot \eta}$$

| | | |
|--------|----------------------|---|
| p | [N/mm ²] | površinski tlak |
| ψ | | relativna zračnost ležaja, |
| n | [min ⁻¹] | vrtlina hitrost tečaja osi ali gredi |
| η | [Pa·s] | dinamična viskoznost olja pri obratovalni temperaturi |

| | |
|------------------|--|
| $S_o \leq 1$ | velika drsna hitrost, majhna obremenitev |
| $1 < S_o \leq 3$ | srednja drsna hitrost, srednja obremenitev |
| $S_o > 3$ | majhna drsna hitrost, velika obremenitev |

Približni izračun koeficienta trenja μ pri tekočinskem trenju

$$\mu = \frac{3 \cdot \psi}{S_o} \quad \text{za } S_o < 1$$

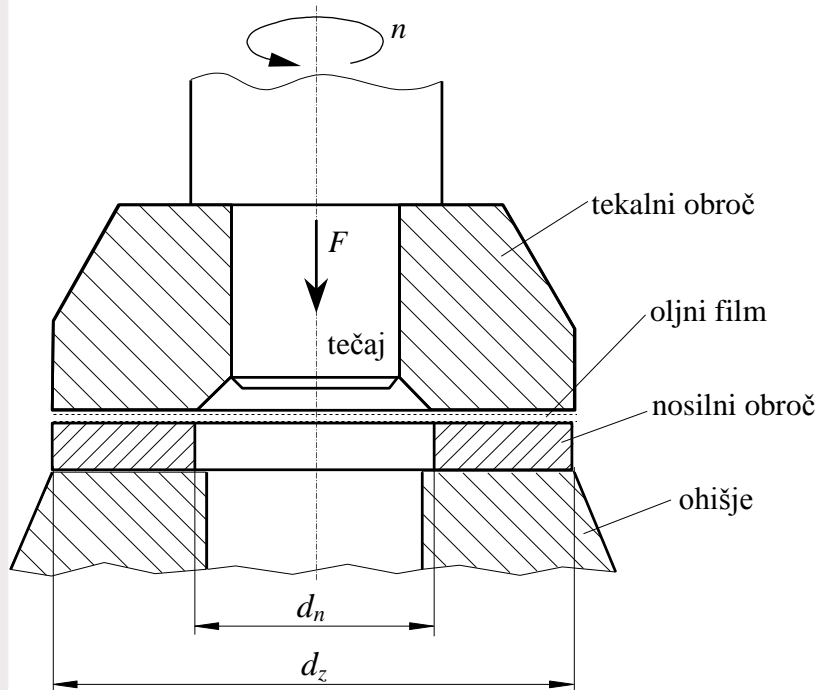
$$\mu = \frac{3 \cdot \psi}{\sqrt{S_o}} \quad \text{za } S_o > 1$$

Orientacijske vrednosti koeficienta trenja radialnih drsnih ležajev

| Vrsta maziva | Gradivo ležajne puše | Koeficient trenja μ | | |
|--------------|-------------------------------|-------------------------|---------------|-------------------|
| | | Pri zagonu | Mešano trenje | Tekočinsko trenje |
| Mast | Siva litina, broni | 0,12 | 0,05 ... 0,1 | – |
| Olje | Siva litina, broni | 0,14 | 0,02 ... 0,1 | 0,003 ... 0,008 |
| | Svinčene in kositrove zlitine | 0,24 | – | 0,002 ... 0,003 |
| | Sintrane kovine | 0,17 | 0,05 ... 0,1 | 0,002 ... 0,014 |



Preračun aksialnih drsnih ležajev



Površinski tlak na drsnih ravninah p

$$p \leq p_{dop}$$

Moment trenja M_{tr}

$$M_{tr} = \frac{2F\mu_g}{(r_z^2 - r_n^2)} \cdot \frac{r_z^3 - r_n^3}{3}$$

Srednji torni polmer r_t

$$r_t = \frac{2}{3} \cdot \left[\frac{r_z^3 - r_n^3}{r_z^2 - r_n^2} \right]$$

Srednja torna hitrost $v_{sr,t}$

$$v_{sr,t} = \omega \cdot r_t$$



Preračun aksialnih drsnih ležajev

Nosilno število S_{ax}

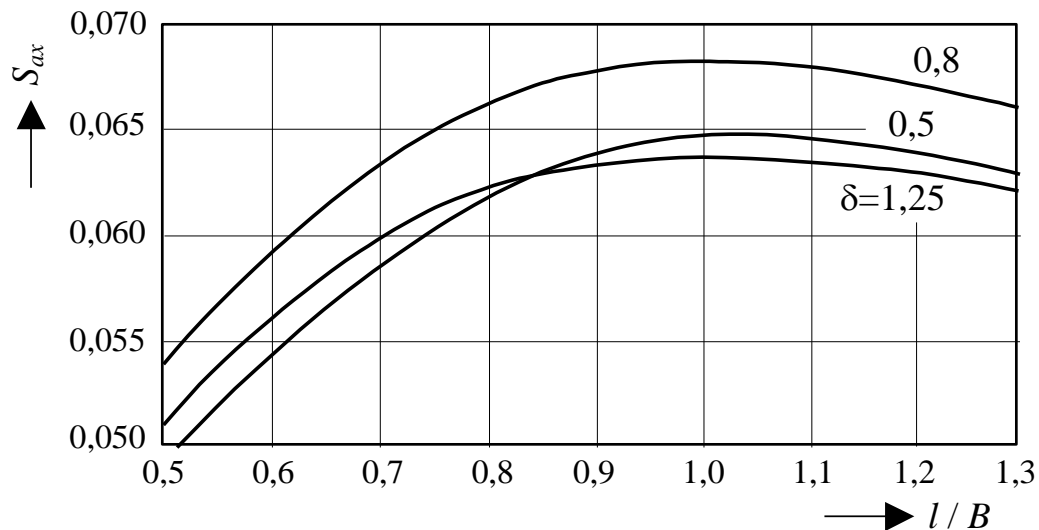
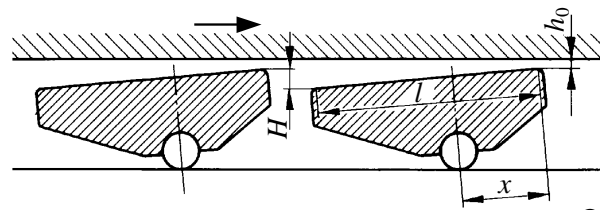
$$S_{ax} = \frac{10^3 \cdot p \cdot h_0^2}{\eta \cdot u_{sr} \cdot B}$$

$$u_{sr} = \frac{\pi \cdot d_{sr} \cdot n}{60 \cdot 10^3}$$

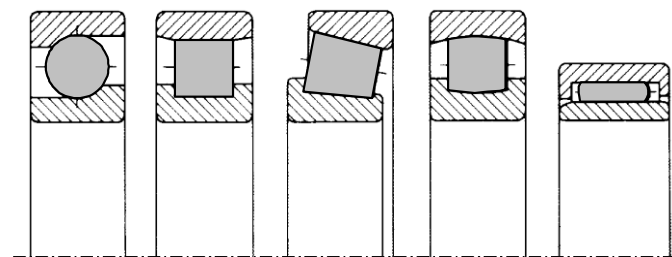
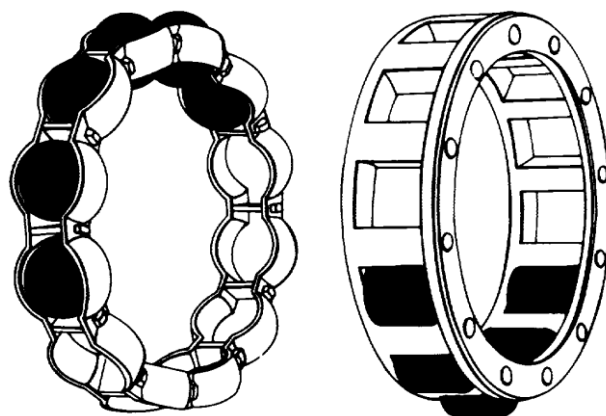
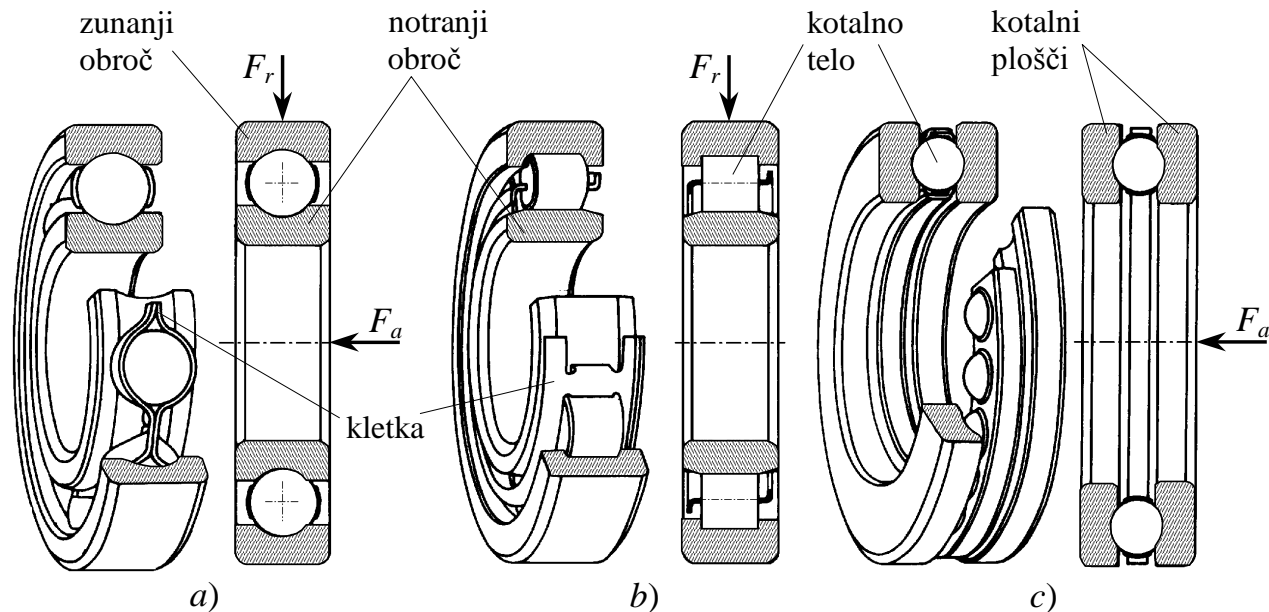
Relativna debelina oljnega filma

$$\delta = \frac{h_0}{H}$$

največja nosilnost pri $\delta \approx 0,8$



Kotalni ležaji



Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo



Katedra za strojne elemente
in razvojna vrednotenja

Gradiva za kotalne ležaje

Lastnosti gradiv za kotalne ležaje:

- dobre trdnostne lastnosti,
- visoko površinsko trdoto,
- dobro žilavost,
- dobro odpornost proti obrabi.

Kotalna telesa in ležajni obroči

- kromova jekla, ki vsebujejo povprečno 1% ogljika (100Cr2, 100Cr6, 100CrMn6, 100CrMo7, 100CrMo7-3, 100CrMnMo8 itd)
- za stožčaste ležaje in valjčne ležaje večjih velikosti se največ uporabljajo jekla za cementiranje in kaljenje (17MnCr5, 19MnCr5, 16CrNiMo6, 17NiCrMo1-4 itd)
- za podporne ležaje žerjavov jekla za poboljšanje (C54G, 44Cr2, 43CrMo4, 48CrMo4 itd)
- za kotalne ležaje, ki obratujejo v agresivnem okolju s prisotnostjo kislin in lugov, se uporabljajo nerjaveča jekla (X45Cr13, X102CrMo17, X89CrMoV18-1 itd)
- za ekstremno visoke delovne temperature pa se uporabljajo temperaturno obstojna jekla (80MoCrV42-16, X82WCrMoV6-5-4 itd), ki zagotavljajo visoko obratovalno varnost tudi pri temperaturah do 600°C.

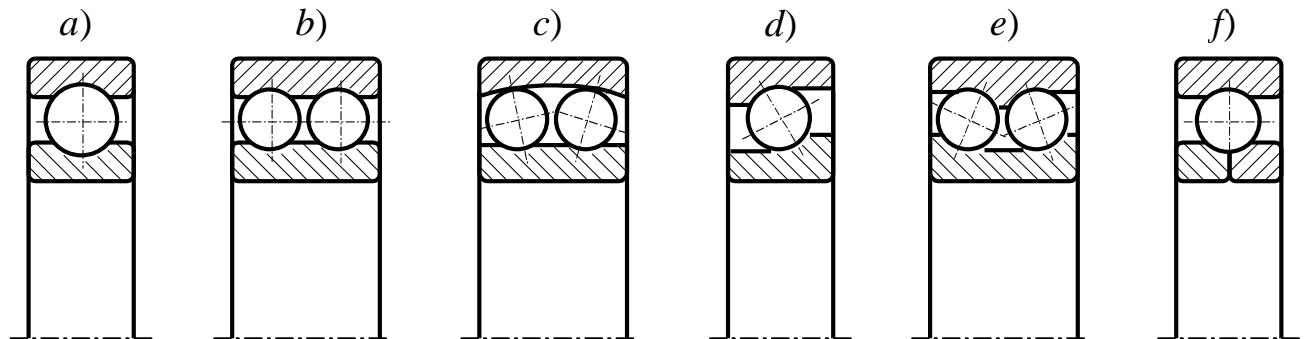
Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo



Katedra za strojne elemente
in razvojna vrednotenja

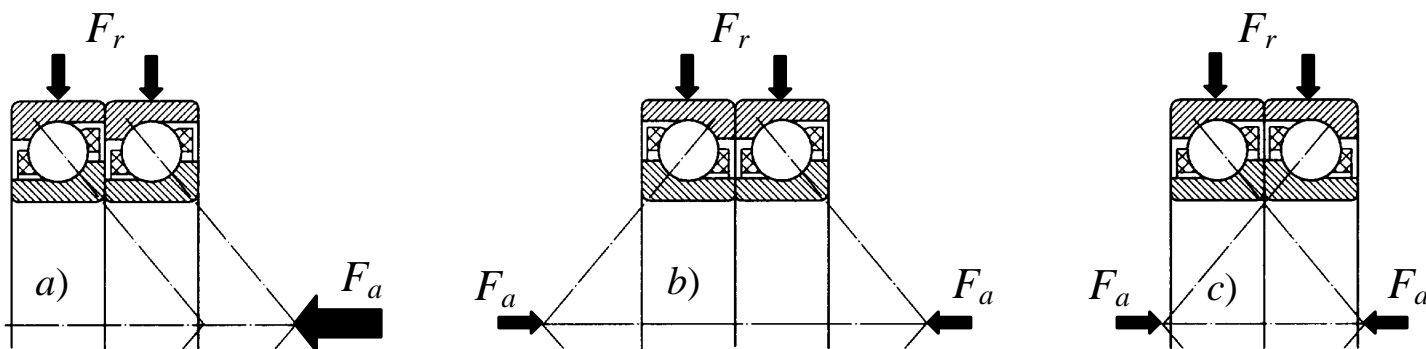
Konstruktivske izvedbe radialnih kotalnih ležajev

Standardne izvedbe radialnih krogličnih ležajev



Konstruktivske izvedbe radialnih kotalnih ležajev

Možni načini vgradnje univerzalnih krogličnih ležajev s poševnim dotikom

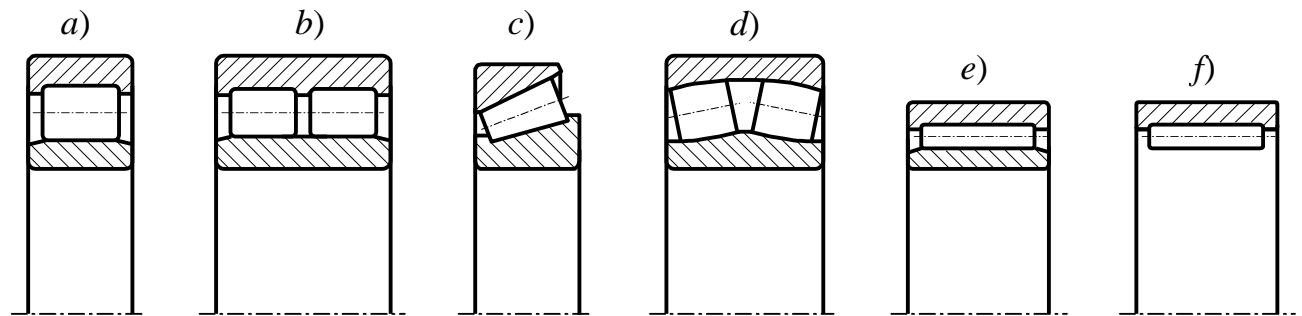


a) T-razporeditev b) O-razporeditev c) X-razporeditev



Konstruktivske izvedbe radialnih kotalnih ležajev

Standardne izvedbe radialnih ležajev z različnimi oblikami kotalnih teles



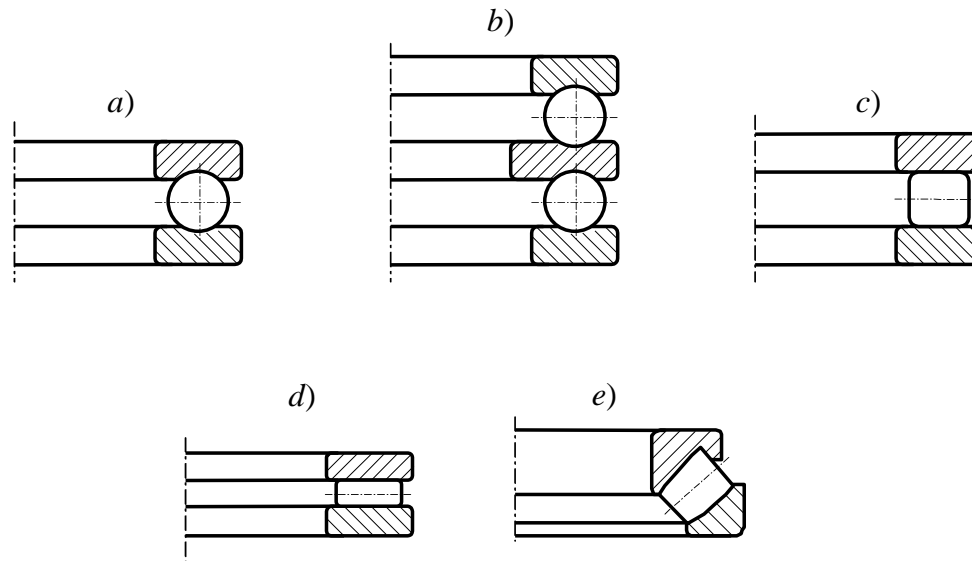
Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo



Katedra za strojne elemente
in razvojna vrednotenja

Konstruktivske izvedbe aksialnih kotalnih ležajev

Standardne izvedbe aksialnih kotalnih ležajev

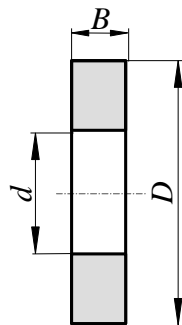


Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo

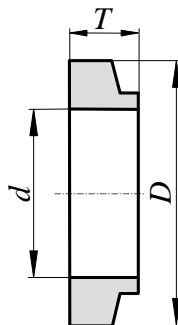


Katedra za strojne elemente
in razvojna vrednotenja

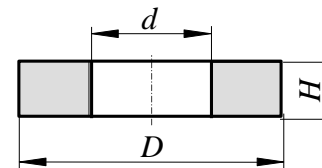
Označevanje kotalnih ležajev DIN 623



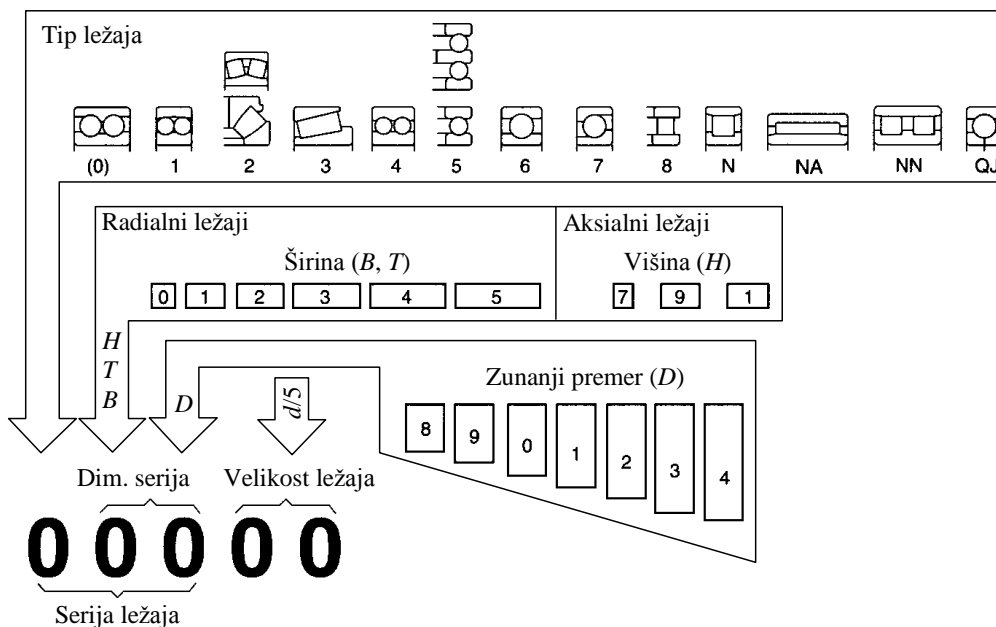
Radialni ležaj



Stožčasti ležaj

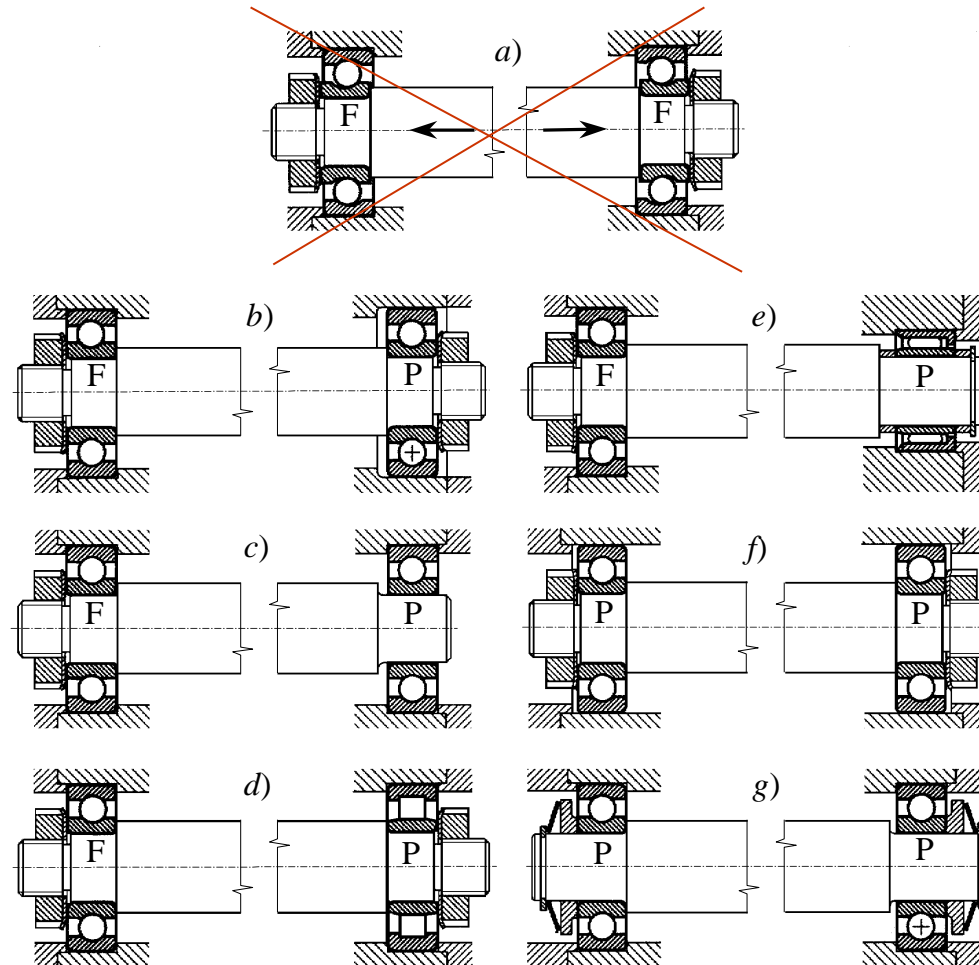


Aksialni ležaj



Vgradnja kotalnih ležajev

Oblikovanje togo vpetega (F) in pomičnega (P) ležajnega mesta

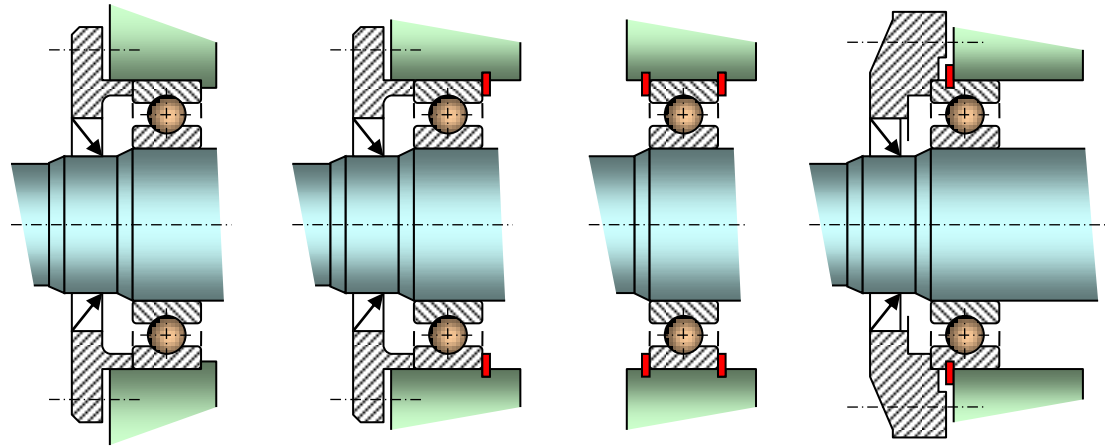


a) dva togo vpeta ležaja (neustrezno) b) pomični ležaj aksialno gibljiv v ohišju c) pomični ležaj aksialno gibljiv na gredi d) valjni ležaj kot pomični ležaj e) iglični ležaj kot pomični ležaj f) dva pomična ležaja z aksialno zračnostjo v ohišju g) dva pomična ležaja prednapeta z vzmetjo

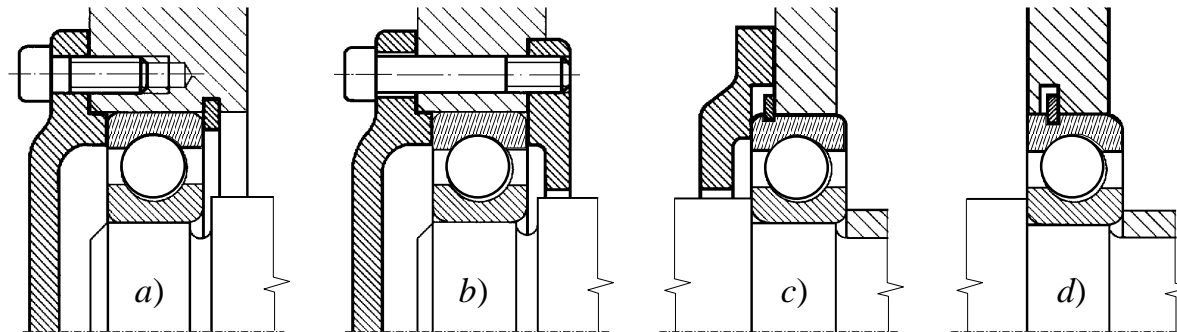


Vgradnja kotalnih ležajev

Konstruktivske variante aksialne pritrditve zunanega ležajnega obroča



a) s pokrovom in naslonom, b) s pokrovom in vzmetnim obročem, c) med dva vzmetna obroča, d) s pokrovom in vzmetnim obročem na ležaju

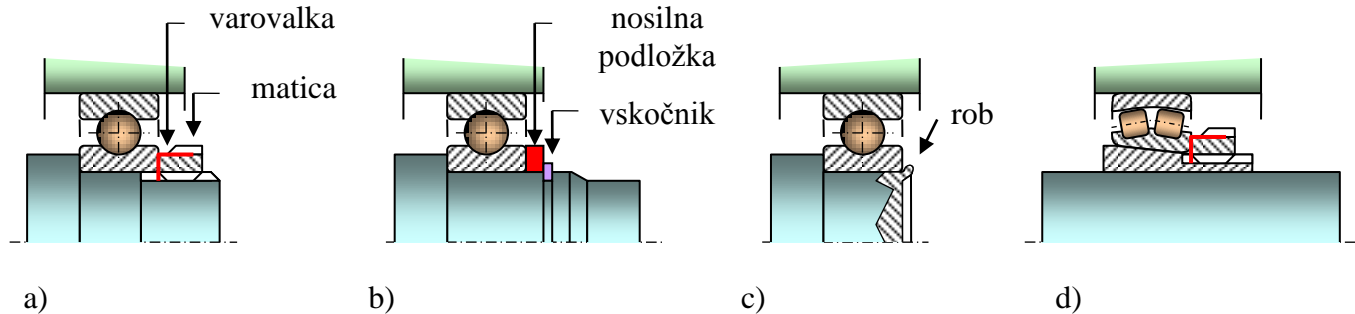


a) vskočnik in prirobnica b) dve prirobnici c) prirobnica in vskočnik d) vskočnik (deljeno ohišje)

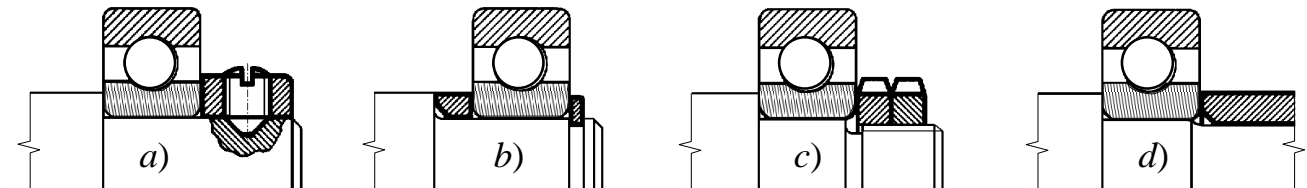


Vgradnja kotalnih ležajev

Konstruktivske variante aksialne pritrditve notranjega ležajnega obroča



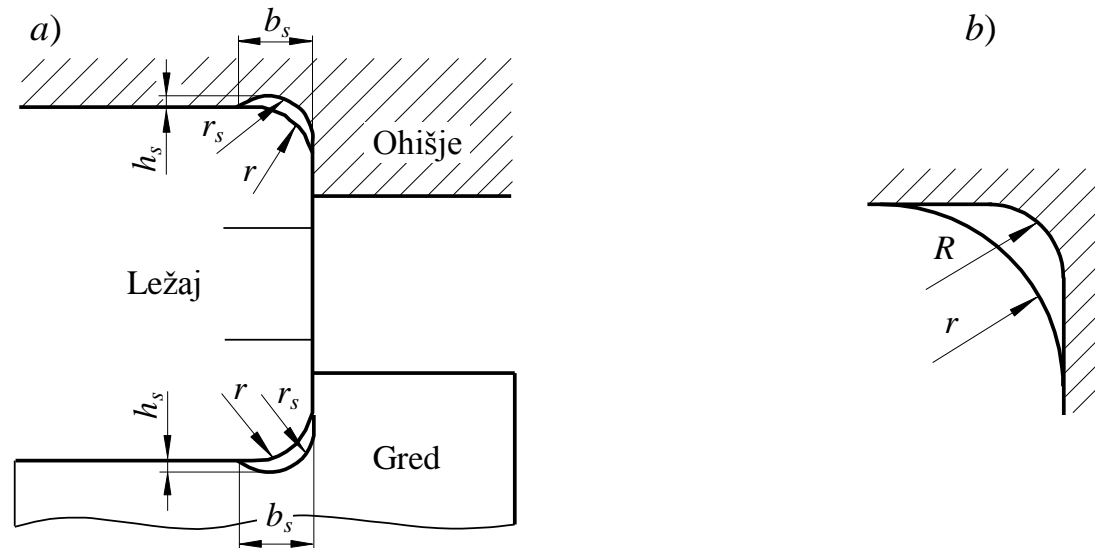
a) z matico in varovalko, b) z vzmetnim obročem in vmesno podložko, c) z zarobljeno gređjo (velika serija),
d) s stožčastim tornim vpenjalnim obročem



a) distančni obroč z zatičem b) distančni obroč in vskočnik c) dvojna matica d) distančna puša



Izvedba naslona na gredi in v ohišju



a) z žlebotom b) z zaokrožitvijo R

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo



Katedra za strojne elemente
in razvojna vrednotenja

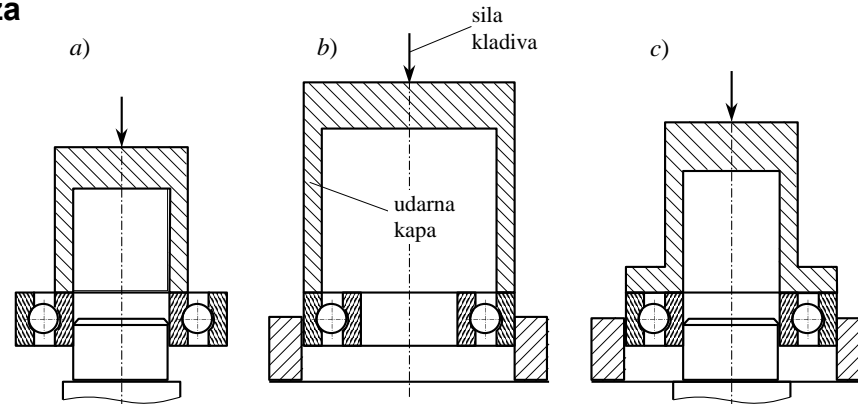
Montaža ležajev

Pomembno:

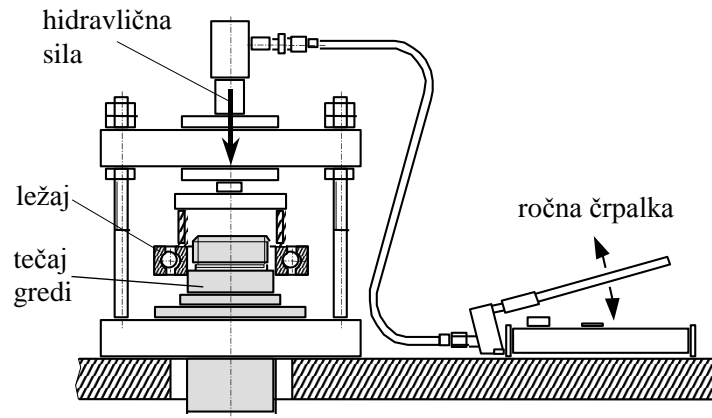
- čista delovna površina,
- pravilni postopek montaže ter
- ustrezno orodje.

Montaža ležajev z valjastim ležajnim sedežem

Hladna montaža



a) tesni prileg na gredi b) tesni prileg v ohišju c) tesni prileg na gredi in v ohišju



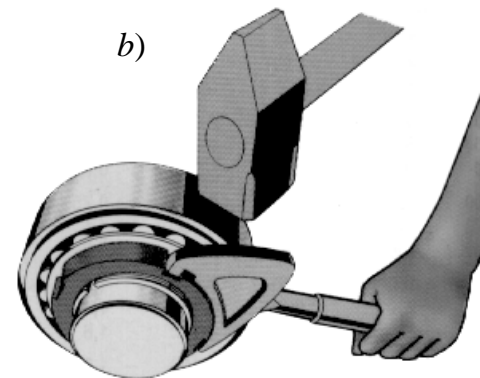
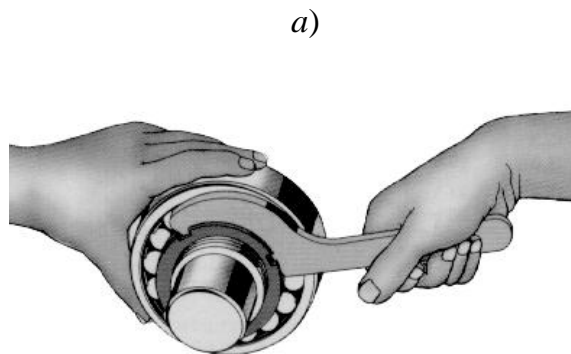
Vroča montaža



Montaža ležajev

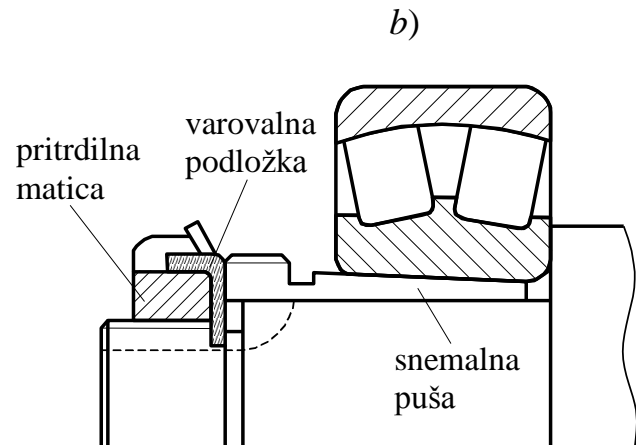
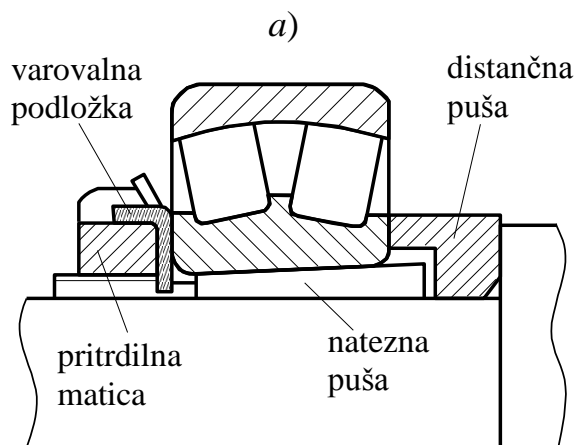
Montaža ležajev s koničnim ležajnim sedežem

Hladna montaža



Montaža kotalnih ležajev s pritrdilno matico

a) s kavljastim ključem b) z udarnim ključem



Vroča montaža

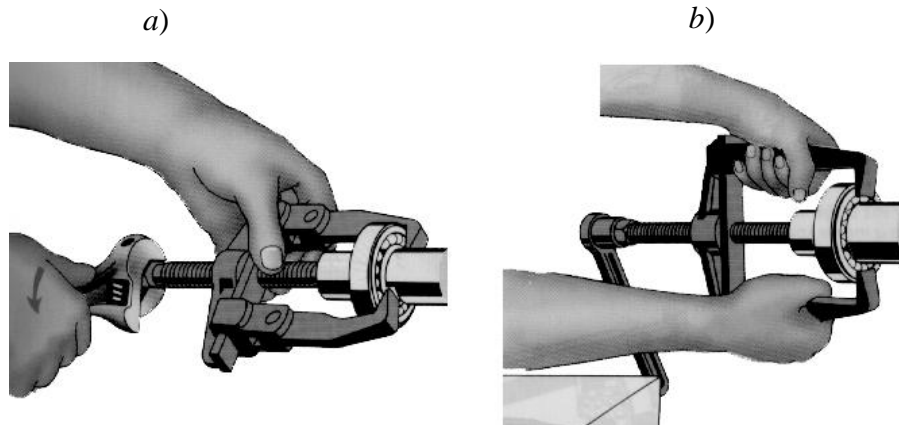
Montažo kotalnih ležajev s pušo

a) natezna puša b) snemalna puša



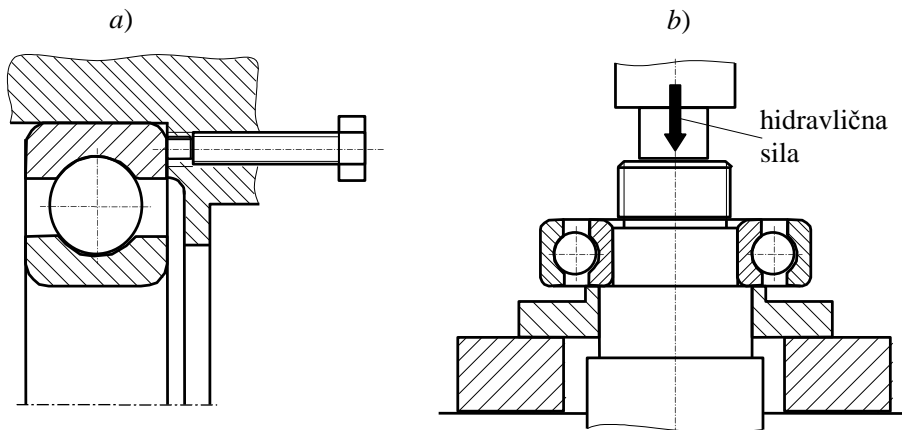
Demontaža ležajev

Demontaža ležajev z valjastim ležajnim sedežem



Demontaža kotalnih ležajev s snemalcem ležajev

a) namestitev snemalca na notranjem obroču b) namestitev snemalca na zunanjem obroču



Nekatere možnosti za demontažo kotalnih ležajev

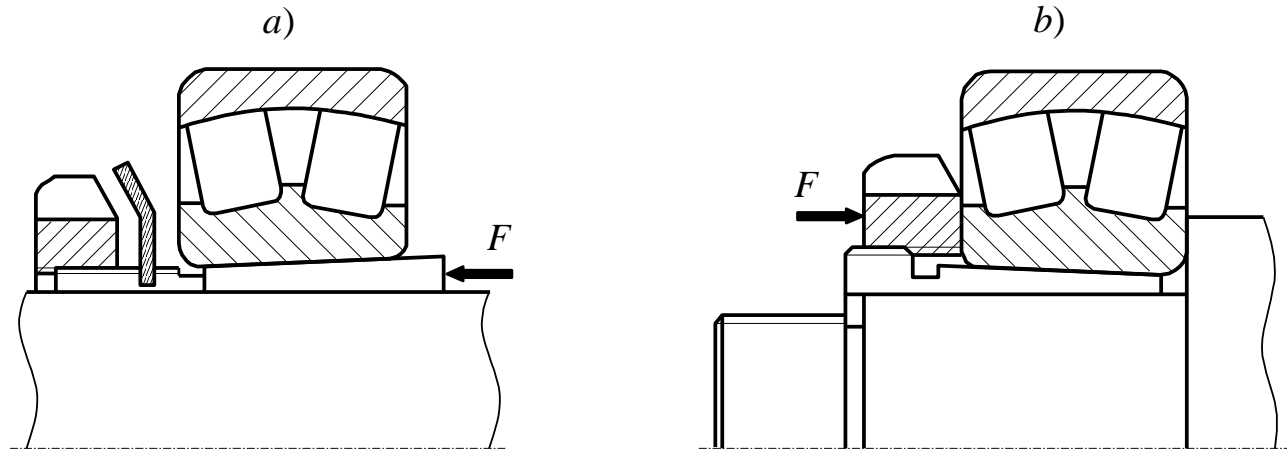
a) z vijaki b) s hidravlično stiskalnico

Vir: Ren / Glodež Strojni elementi 1. del



Demontaža ležajev

Demontaža ležajev s koničnim ležajnim sedežem



Demontaža kotalnih ležajev s koničnim ležajnim sedežem

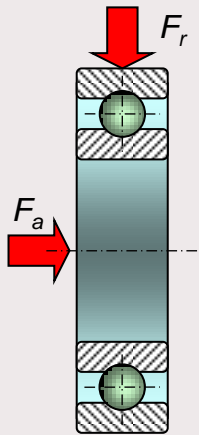
a) demontaža ležajev na natezni puši b) demontaža ležajev na snemalni puši

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo



Katedra za strojne elemente
in razvojna vrednotenja

Preračun kotalnih ležajev



Velikost ležaja določimo glede na:

- vrsta ležaja in njegova nosilnost (dinamična C in statična C_o nosilnost ležaja – v katalogih proizvajalcev),
- zunanje obremenitve (radialna, aksialna)
- zahtevana življenjska doba (število vrtljajev ali ur delovanja do prvih znakov utrujenostnih poškodb na ležajnem obroču ali kotalnem telesu - osnovna življenjske doba jo doseže 90% vseh preizkušanih ležajev),
- zanesljivost delovanja.

Statična nosilnost ležaja C_o

Je nosilnost pri mirovanju, tj. pri radialnih oz. aksialnih ležajih tista radialna oz aksialna obremenitev, ki povzroča skupno plastično deformacijo 10^{-4} premera kotalnega elementa.

Uporabljamo jo pri izbiri ležajev, ki:

- se vrtijo z zelo nizkimi vrtilnimi hitrostmi,
- so obremenjeni v mirovanju.

Dinamična nosilnost ležaja C

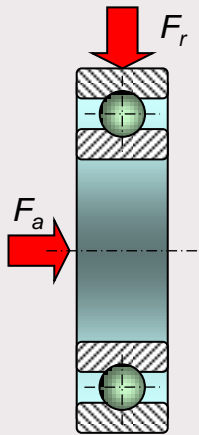
Dinamična nosilnost ležaja tista konstantna obremenitev ležaja, pri kateri je življenjska doba ležaja 10^6 vrtljajev. Pri tem predpostavimo, da je:

- obremenitev konstantna po smeri in po velikosti,
- deluje centrično na ležaj,
- je samo radialna pri radialnih ležajih oziroma
- samo aksialna pri aksialnih ležajih.

Dinamično nosilnost uporabljamo pri izbiri dinamično obremenjenih ležajev, to je ležajev, ki se vrtijo pod obremenitvijo.



Preračun kotalnih ležajev



Ekvivalentna obremenitev ležaja

Statična ekvivalentna obremenitev ležaja P_0

- samo radialna obremenitev ležaja: $P_0 = F_r$
- samo aksialna obremenitev ležaja: $P_0 = F_a$
- kombinirana obremenitev ležaja $P_0 = X_0 \cdot F_r + Y_0 \cdot F_a$

$P_0 < F_r$, upoštevamo $P_0 = F_r$

Dinamična ekvivalentna obremenitev ležaja P

- samo radialna obremenitev ležaja: $P = F_r$
- samo aksialna obremenitev ležaja: $P = F_a$
- kombinirana obremenitev ležaja $P = X \cdot F_r + Y \cdot F_a$
- spremenljiva obremenitev ležaja

- srednja dinamična ekvivalentna obremenitev ležaja P_{sr}

$$P_{sr} = \frac{P_{\min} + 2P_{\max}}{3}$$

- spremenljiva obremenitev ležaja v posameznih časovnih intervalih, vrtilna hitrost je konstantna

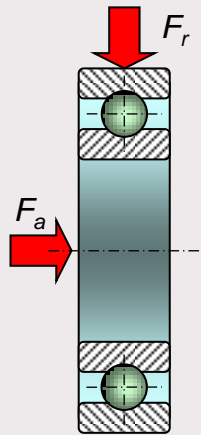
$$P_{sr} = \sqrt[3]{\frac{P_1^3 \cdot t_1 + P_2^3 \cdot t_2 + \dots + P_n^3 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}$$

- spremenljiva obremenitev, spremenljiva vrtilna hitrost (npr. pri obdelovalnih strojih)

$$P_{sr} = \sqrt[3]{\frac{P_1^3 \cdot N_1 + P_2^3 \cdot N_2 + \dots + P_n^3 \cdot N_n}{N_1 + N_2 + \dots + N_n}}$$



Preračun kotalnih ležajev



Kontrola statične nosilnosti kotalnih ležajev

- statično nosilno število ležaja

$$s_0 = \frac{C_0}{P_0} \geq s_{0\min}$$

- najmanjše potrebno statično nosilno število kotalnih ležajev $s_{0\min}$

| $s_{0\min}$ | Zahteve glede mirnosti teka |
|--|-----------------------------|
| 1,5 ... 2,5 | visoke |
| 1,0 ... 1,5 | srednje |
| 0,7 ... 1,0 | nizke |
| $s_{0\min} \geq 4$ za prilagodne krogične ležaje | |

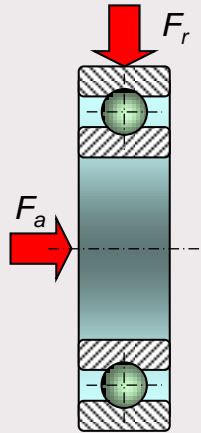
Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo



Katedra za strojne elemente
in razvojna vrednotenja

Preračun kotalnih ležajev

Določitev velikosti kotalnih ležajev glede na življenjsko dobo



Približni izračun življenjske dobe

$$L = L_0 \cdot \left(\frac{f_9 \cdot C}{P} \right)^x$$

| | | |
|-------|---------------------|---|
| L | [število vrtljajev] | življenjska doba ležaja |
| L_0 | [število vrtljajev] | osnovna življenjska doba ležaja; $L_0 = 10^6$ vrtljajev |
| C | [N] | dinamična nosilnost ležaja iz ustreznega kataloga |
| P | [N] | dinamična ekvivalentna obremenitev ležaja |
| f_9 | | temperaturni koeficient ležaja |
| x | | eksponent |
| | $x = 3$ | kroglični ležaji |
| | $x = 10/3$ | valjčni, iglični, stožčasti in sodčkasti ležaji |

Temperaturni koeficient ležaja f_9

| | | | | |
|-------------------------------------|------------|-----|------|-----|
| Temperatura ležaja ϑ [°C] | ≤ 150 | 200 | 250 | 300 |
| Temperaturni koeficient f_9 | 1,0 | 0,9 | 0,75 | 0,6 |



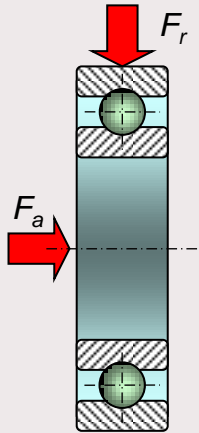
Preračun kotalnih ležajev

Življenjska doba ležaja v obratovalnih urah:

$$L_h = \frac{L}{60 \cdot n}$$

L_h [h]
 L [število vrtljajev]
 n [min⁻¹]

življenjska doba ležaja v obratovalnih urah
 število vrtljajev v življenjski dobi,
 vrtilna hitrost ležaja



Priporočljive življenjske dobe kotalnih ležajev L_h v obratovalnih urah

| Področje uporabe | L_h [h] | Področje uporabe | L_h [h] |
|--|-----------------|--|-----------------|
| Električni gospodinjnski aparati | 1000 ... 2000 | Ladijski propelerji | 15000 ... 25000 |
| Majhni ventilatorji | 2000 ... 4000 | Ladijski pogoni | 20000 ... 30000 |
| Majhni elektromotorji (do 4 kW) | 8000 ... 10000 | Poljedelski stroji | 3000 ... 6000 |
| Elektromotorji srednjih moči | 10000 ... 15000 | Mala dvigala | 5000 ... 10000 |
| Veliki stacionarni elektromotorji | 20000 ... 30000 | Splošni menjalniki | 8000 ... 15000 |
| Majhna motorna kolesa | 600 ... 1200 | Prenosi obdelovalnih strojev | 20000 |
| Večja motorna kolesa, majhni osebni avtomobili | 1000 ... 2000 | Prenosi pomožnih strojev v proizvodnji | 7500 ... 15000 |
| Večji osebni avtomobili, manjša tovorna vozila | 1500 ... 2500 | Majhni stroji za hladno valjanje | 5000 ... 6000 |
| Večja tovorna vozila, avtobusi | 2000 ... 5000 | Večji stroji za valjanje | 8000 ... 10000 |
| Tramvaji | 20000 ... 25000 | Stroji v rudarstvu | 4000 ... 10000 |
| Potniški vagoni | 25000 | Večji ventilatorji v rudarstvu | 40000 ... 50000 |
| Tovorni vagoni | 35000 | Večje vrvenice | 40000 ... 60000 |
| Lokomotive | 20000 ... 40000 | Stroji v papirni industriji | 50000 ... 80000 |
| Pogoni motornih čolnov | 3000 ... 5000 | Mlini | 20000 ... 30000 |



Preračun kotalnih ležajev

Natančen izračun življenjske dobe

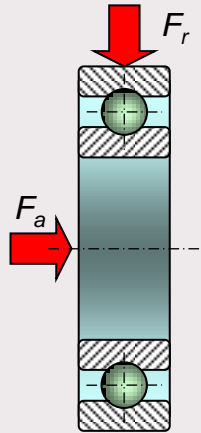
Potrebno dobro poznati:

- obratovalne pogoje
- kvaliteto mazanja in
- temperaturo ležajnega mesta.

Življenjska doba ležaja

$$L = L_0 \cdot \left(\frac{C}{P}\right)^x \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot a_3$$

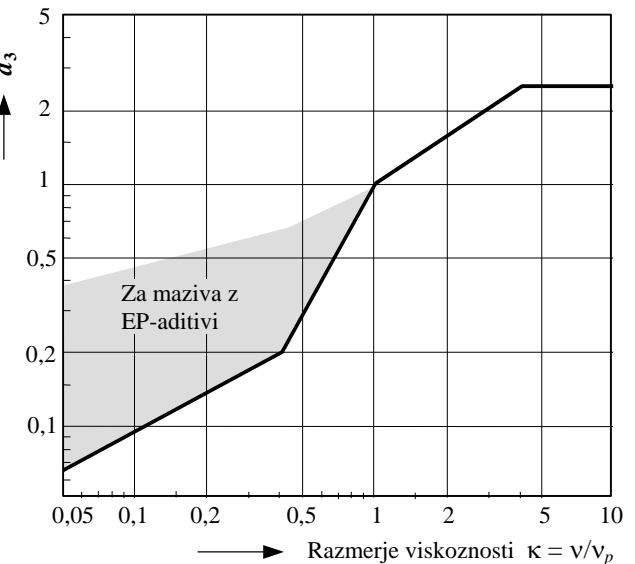
- L [število vrtljajev] življenjska doba ležaja
 L_0 [število vrtljajev] osnovna življenjska doba ležaja; $L_0 = 10^6$ vrtljajev
 C [N] dinamična nosilnost ležaja iz ustreznega kataloga
 P [N] dinamična ekvivalentna obremenitev ležaja
 x eksponent
 $x = 3$ kroglični ležaji
 $x = 10/3$ valjni, iglični, stožčasti in sodčkasti ležaji



a_1 ... koeficient življenjske dobe

| Verjetnost, da ne bo prišlo do poškodb ležaja [%] | 90 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 |
|---|-----|------|------|------|------|------|
| a_1 | 1,0 | 0,62 | 0,53 | 0,44 | 0,33 | 0,21 |

a_3 koeficient obratovalnih pogojev

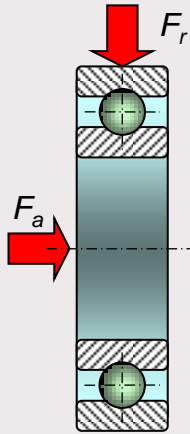


a_2 ... koeficient izvedbe ležaja;

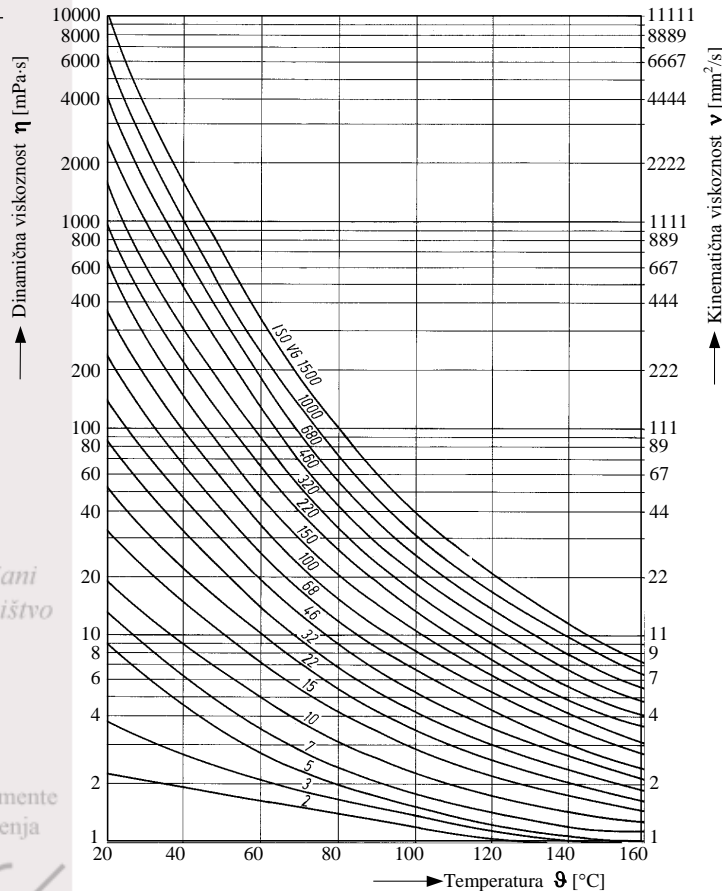
$a_2 = 1,0$ za standardne izvedbe ležajev



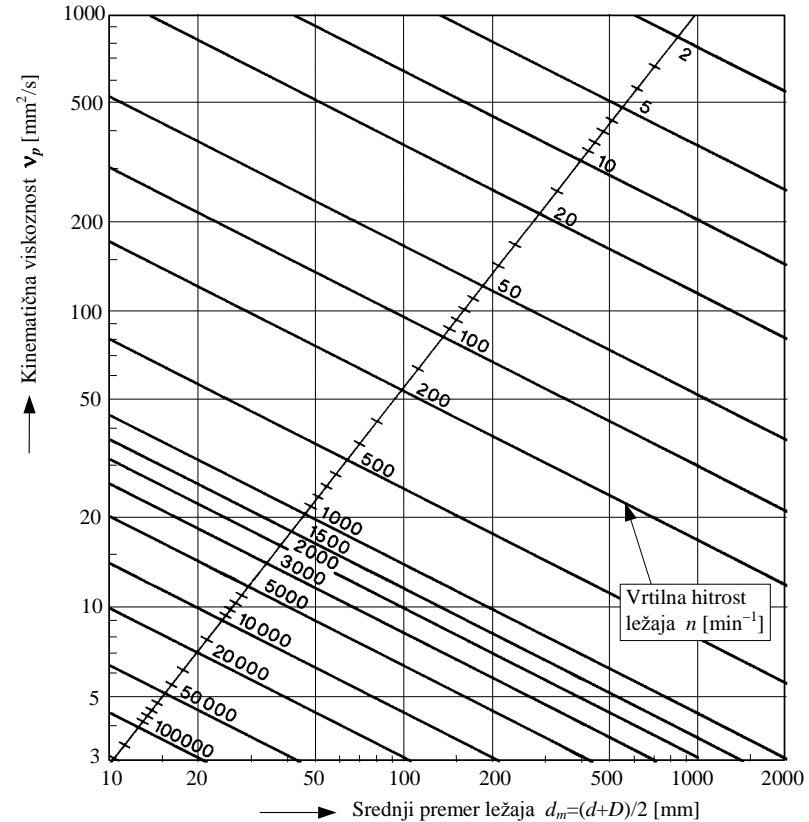
Preračun kotalnih ležajev



Dejanska viskoznost maziva pri obratovalni temperaturi



Potrebna kinematična viskoznost maziva pri obratovalni temperaturi za tvorbo nosilnega oljnega filma η_p



Mazanje kotalnih ležajev z mastjo

- pri normalnih vrtilnih hitrostih in temperaturah

Prednosti:

- enostavna in cenena konstrukcijska izvedba,
- boljše adhezijske lastnosti maziva ter
- boljša zaščita pred vlago in nečistočami iz okolice

Smernice za izbiro masti za mazanje kotalnih ležajev

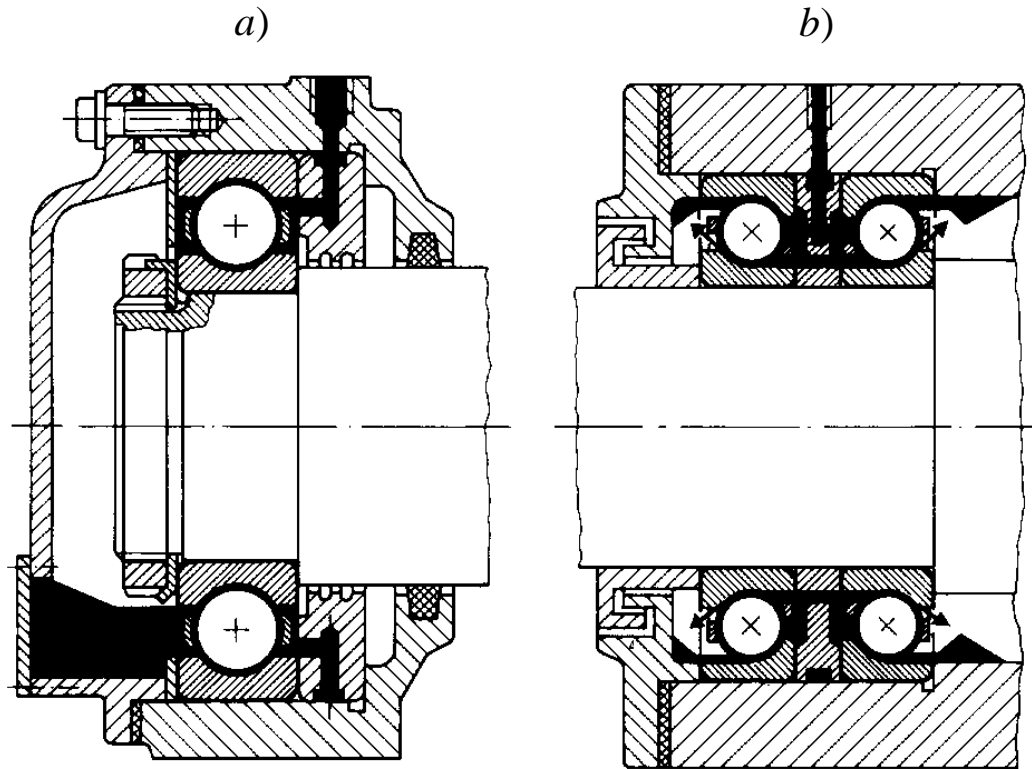
| n/n_{mej} | $f(P/C)$ | Priporočljiva mast | |
|--|-------------|--|--|
| $\leq 1,0$ | $\leq 0,16$ | Normalne masti za kotalne ležaje po DIN 51825 | |
| | | <i>Mehke masti</i> - za male koeficiente trenja - za daljše dovodne kanale masti - za hladne zagone | <i>Trde masti</i> - za nizek hrup ležajev - za zaščito pred nečistočami iz okolice |
| $0,3 \dots 0,5$ | $> 0,16$ | Posebne masti za visoke tlake (npr. mast na osnovi kalcijevega mila) | |
| > 1 | – | Posebne masti za visoke vrtilne hitrosti (npr. mast na osnovi barijevega mila) | |
| n [min ⁻¹] vrtilna hitrost ležaja n_{mej} [min ⁻¹] mejna vrtilna hitrost ležaja P [N] dinamična ekvivalentna obremenitev ležaja C [N] dinamična nosilnost ležaja iz ustreznega kataloga f koeficient obremenitve ležaja $f = 1$ za kroglične ležaje in valjčne ležaje s pretežno radialno obremenitvijo ($F_a / F_r \leq 1$) $f = 2$ za valjčne ležaje s pretežno aksialno obremenitvijo ($F_a / F_r > 1$) | | | |

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo



Katedra za strojne elemente
in razvojna vrednotenja

Mazanje kotalnih ležajev z mastjo

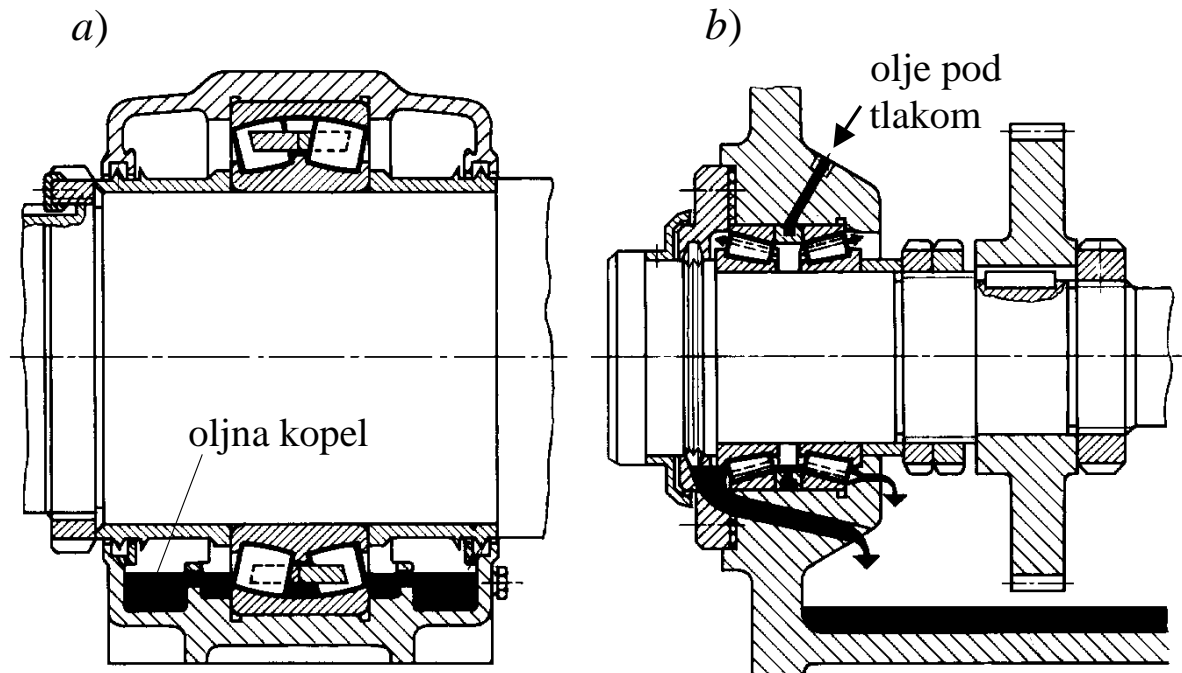


a) navadni kroglični ležaj b) kroglična ležaja s poševnim dotikom

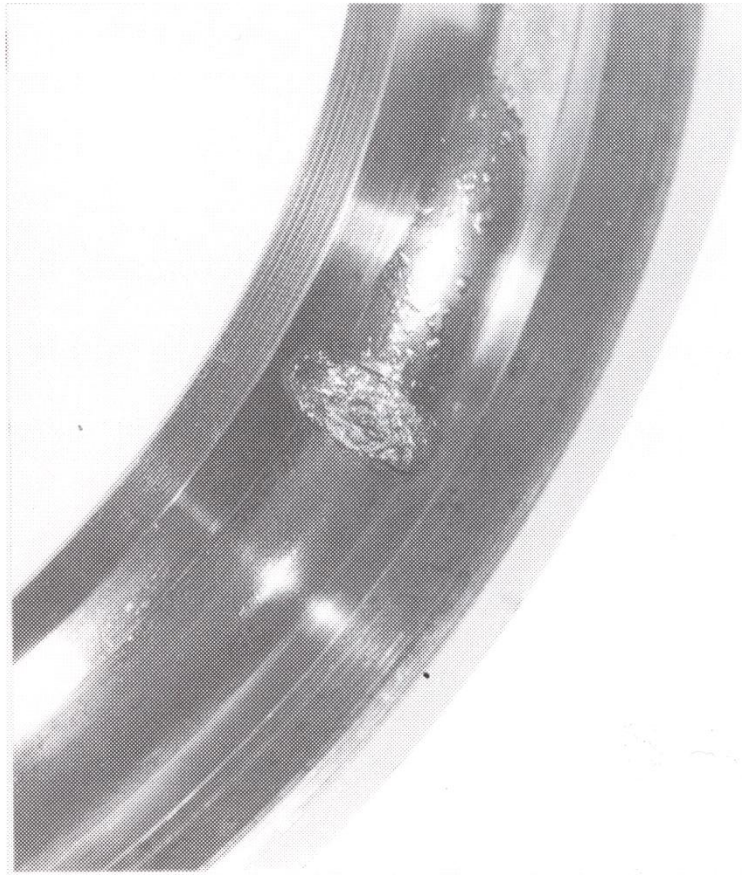


Mazanje kotalnih ležajev z oljem

- visoke vrtilne hitrosti in temperature – hlajenje
 - mazanje v oljni kopeli,
 - obtočno mazanje,
 - mazanje z oljno meglo.



Utrujenostne poškodbe kotalnega ležaja



Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo



Katedra za strojne elemente
in razvojna vrednotenja