

**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
SVEUČILIŠTA U ZAGREBU**
Katedra za elemente strojeva i konstrukcije



Milan Kostelac, dipl. ing.

LAMELNA SPOJKA

Lamelna spojka

-- programski zadatak --

Ime i prezime: _____

Broj zadatka	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10										
1. Tip spojke	mehanička																			
2. Pogonski stroj	elektromotor																			
3. Vrsta pogonskog stroja	centrifugalna pumpa, ventilator			lift, dizalica			preša													
4. Snaga, P [kW], koja se mora prenijeti na radni stroj	1	1,5	2	4	8	10	12	15	20	24										
5. Brzina vrtnje elektromotora n_1 [s^{-1}]; $n_2 = 0$; $\Delta n = n_1$	45 32 24 16 12 8																			
6. Vrsta torzijskog opterećenja	istosmjerno / naizmjenično																			
7. Vratilo spojke	Materijal: Č 0645; Potrebna sigurnost $S_{potr} = 1,8$ Kritični presjek: utor za pero (oblik B); Obrada: fino obrađeno																			
8. Moment tromosti svih masa koji se moraju ubrzati J [kgm^2]	0,25	0,35	0,5	0,7	0,85	1	3	4	6	8										
9. Traženo vrijeme ubrzanja spojke t_3 [s]	0,75			1,5			2,5													
10. Materijal tarnih površina	čelik / čelik		čelik / sinterobloga																	
	rad u ulju		rad na suho				rad u ulju													
11. Dopušteni odnos preostale F_{U0} prema uvedenoj uzdužnoj sili uključenja F_{UN} $\delta = F_{U0} / F_{UN}$	0,9		0,8			0,65		0,87												
12. Broj ciklusa uključivanja spojke na sat	40			30			20													
13. Način uključenja spojke	pod punim opterećenjem																			
14. Položaj ugradnje	vodoravan																			

Datum:

Asistent:

Prezime i ime: _____

Grupa: _____

Naziv Programa: LAMELNA SPOJKA

Potrebno je proračunati i konstruirati lamelnu spojku prema zadanim parametrima, definiranim listom zahtjeva:

1. Tip lamelne spojke koji se želi upotrijebiti - mehanički, hidraulički, pneumatski upravljiva spojka _____
 2. Upotrijebjen pogonski stroj (elektromotor, hidromotor, turbina, klipni motor i dr.) _____
 3. Vrsta stroja u koji je ugrađena spojka _____
 4. Snaga koja se mora prenijeti na radni dio spojke _____ kW
 5. Vrsta opterećenja: jednosmjerno naizmjenično
 6. Brzina vrtnje pri uključivanju spojke
 n_1 - brzina vrtnje pogonskog stroja _____ s^{-1}
 n_2 - brzina vrtnje gonjenog (radnog) stroja _____ s^{-1}
 Δn - max. nastala relativna brzina vrtnje _____ s^{-1}
 7. Način uključenja spojke: pod punim opterećenjem iz stanja mirovanja¹ opterećena momentom ubrzanja masa ($T_0=0$)
 8. Broj ciklusa uključivanja spojke na sat _____
 9. Materijal tarnih površina: čelik/čelik čelik/sinterobloga rad u ulju čelik/sinterobloga rad nasuho čelik/organska obloga lijev/organska obloga (max. 3 lamele)
 10. Moment tromosti svih masa koje se moraju ubrzati _____ kgm^2
 11. Traženo vrijeme ubrzanja spojke _____ s
 12. Dopušteni odnos preostale F_{UO} prema uvedenoj uzdužnoj sili uključenja F_{Un} tj. $\delta = F_{UO} / F_{Un} < 1$ _____
- Mjesto ugradnje: otvoreni prostor
 u zatvorenom kućištu
- Položaj ugradnje: vodoravan
 okomit
 proizvoljan

Ostali podaci i zahtjevi bitni za konstrukciju: _____

1) Proračun lamelne spojke kod uključenja iz stanja mirovanja u ovom programu se ne provodi

Opseg programa

1. Proračun treba izraditi prema uputama za navedeni tip lamelne spojke sa svim potrebnim skicama dijelova koji se dimenzioniraju ili kontroliraju računski. Proračun mora imati naslovnu stranicu prema predlošku, umetnuti ili prepisani tekst zadatka i uredno uvezan (omotni list, fascikl i dr.), zajedno s radioničkim crtežima svih dijelova spojke presavijenih na format A4.
2. Opseg i izrada konstrukcijske dokumentacije

Konstrukcijska dokumentacija sadrži montažni i radioničke crteže:

- a) Montažni (sklopni) crtež spojke s potrebnim brojem projekcija, presjeka i detalja na formatu A1 ili A2, s opisanom montažnom sastavnicom i obaveznom tablicom dosjeda i tolerancija neophodnih za ispravno funkcioniranje spojke.
- b) Radioničke crteže svih dijelova spojke sa svim kotama, obradom, tolerancijama dimenzija, oblika i položaja na formatima A4, A3 ili A2 s radioničkom sastavnicom, izuzev standardnih dijelova i gotovih dijelova (unutarnje i vanjske lamele).

Izrada crteža na bijelom neprozirnom papiru u tehnici tuš-olovka ili na paus papiru u tušu uz obaveznu predaju originala u olovci u preporučenom mjerilu 1:1 ili smanjenom mjerilu 1:2.

Zadano:_____

Rok predaje:_____

Asistent: _____

LAMELNA SPOJKA

1. UVOD

Ovaj tip spojke spada u grupu UKLJUČNO-ISKLJUČNIH spojki, a zbog prijenosa opterećenja trenjem u podgrupu TARNIH (frikcijskih) spojki. Osnovna namjena spojki je međusobno spajanje vratila, dok nasuprot tome ova grupa spojki i "razdvaja" međusobno vratila za vrijeme pogona pod opterećenjem. Takoder i kod razlike brzina vrtnje pogonske i gonjene (radne) strane omogućava uspostavljanje sinkronizma pogonske i gonjene strane.

2. TARNI MATERIJAL LAMELA

Vrsta tarnog para utječe na karakteristiku uključivanja, veličinu i dopušteno toplinsko opterećenje, vijek trajanja, način rada i dr. lamelne spojke odnosno kočnice (u dalnjem tekstu govorit će se samo o spojkama). Karakteristika pokretanja radne strane spojke ovisna je od toka okretnog momenta tijekom procesa uključivanja i određena je vremenskim prirastom tlačne sile na paketu lamela i veličinom faktora trenja.

U primjeni tarnih parova pojavljuju se različiti materijali, koji su tokom niza godina ispitivanja našli ekonomski opravdanu primjenu za željeni način rada i vijek trajanja spojke, te stoga koristimo kao tarne parove kaljeni čelik/kaljeni čelik, u dalnjem tekstu čelik/čelik, čelik/sinterobloga (trgovačkog naziva "Konstant" - Ortlinghaus - Wermelskirchen, "HS 09 N", "HS 11 N" - Hoerbirger & Co. Schongau, itd.) i čelik odnosno sivi lijev ili perlitni lijev/organska obloga ("Ortex" - Ortlinghaus, itd.). Nezakaljeni čelik/nezakaljeni čelik kao materijal tarnih parova, iako ekonomski vrlo opravdan, primjenjuje se najčešće kod sigurnosnih lamelnih spojki i kod lamelnih spojki s vrlo niskom učestalošću uključivanja ($z_k > 0,5$ ciklusa/h).

2.1. FAKTOR TRENJA

Faktor trenja zavisi od sparenih materijala tarnih površina, međusobnog dodirnog pritiska tarnih površina, brzine proklizavanja lamela, radne temperature tarnih površina, načina i vrste rada (rad nasuho ili rad u ulju tj. s podmazivanjem), konstrukcijske izvedbe tarnih površina (glatka ili ohrapavljena površina, džepovi, radijalni utori, spiralni kanali i dr.).

U osnovi, faktor trenja tarnih površina lamela koje rade nasuho znatno je veći od slučaja rada u ulju.

Pri radu u ulju na početku procesa uključivanja, zbog zatvorenog uljnog filma, na tarnim površinama se javlja tekuće ili plovno trenje. Proklizavanjem pritisnutih lamela uljni film se potiskuje, pri čemu nastaje miješovito trenje kao prijelazna pojava. Na kraju procesa uključivanja je poznata veličina faktora trenja, kao veličina nastala na "osušenim" tarnim površinama lamela, poznat pod nazivom "suhu trenje". Vremensko nestajanje mazivog filma ovisi o homogenosti i profilu tarnih površina. Povećanom ravnoćom (brušena površina lamela) i homogenosti tarne površine, duže se zadržava uljni film između lamela te se suprotno pospješuje otpuštanje mazivog filma spiralnim kanalima, radijalnim utorima, džepovima i prorezima što ima za posljedicu bržu uspostavu mješovitog, a zatim i suhog trenja.

Za vrijeme procesa uključivanja, kako je vidljivo, uočavaju se dva tipa trenja: na početku procesa je trenje gibanja - dinamičko trenje, a na kraju procesa trenje mirovanja-statičko trenje. Nasuprot tarnog para čelik/sinterobloga s glatkom površinom, tarsi par čelik/čelik pokazuje daleko veći odnos navedenih faktora trenja. Mjerenjem je ustanovljeno za tarsi par čelik/čelik $\mu_0/\mu = 1,8 \dots 2$ nasuprot para čelik/sinterobloga $\mu_0/\mu = 1,3 \dots 1,5$ (ovisno o elementima i stupnju legiranja).

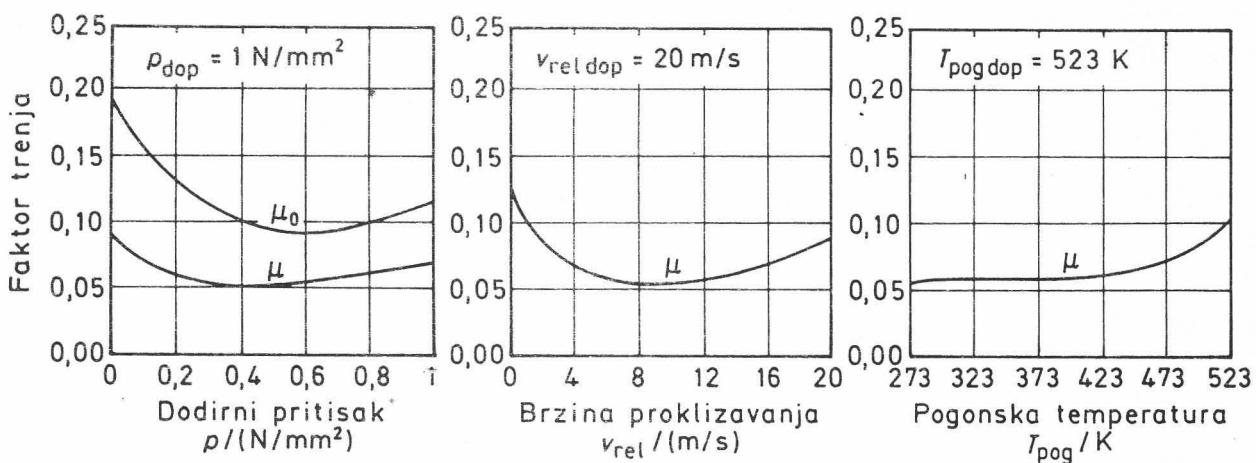
2.1.1. TARNI PAR ČELIK/ČELIK

Za ovaj iskušani tarsi par koristi se toplinski obrađeni (kaljen + srednje temperaturno popušten) specijalni opružni čelik završno fino brušen. Namijenjen je prvenstveno za rad s podmazivanjem - dovođenjem ulja između lamela ili za rad u ulju - potapanjem i bućanjem ulja. Radi lakšeg odvajanja lamela pri isključivanju, unutarnje lamele se izvode: valovito oblikovane tzv. "Sinus"-lamele (Ortlinghaus), oblikovane u obliku stošca, bombirane kod velikih izmjera lamela, te ubacivanjem valovitih prstenastih opruga između unutarnjih lamela (Stromag-Unna).

Lamelna spojka s ovim tarnim parom, naročito kad se upušta ručno u pogon, pokazuje za vrijeme uključivanja, pri ubrzavanju velikih masa, neravnomjernu, blago uzlaznu karakteristiku ubrzanja gonjene strane, sve dok na tarnim površinama postoji uljni film (pritom su faktor trenja i okretni moment koji prenosi spojka vrlo mali).

Nestajanjem tj. istiskivanjem uljnog filma povećava se faktor trenja, što ima za posljedicu nagli porast okretnog momenta uključivanja, što može dovesti do nepoželjno brzog ubrzavanja masa (udar na gonjenoj strani spojke).

Kod ovog tarnog para maksimalni dodirni pritisak tarnih površina $p_{dop} = 1 \text{ Nmm}^{-2}$ i maksimalna brzina proklizavanja $v_{rel,dop} = 20 \text{ ms}^{-1}$ ne smiju se prekoračiti. Velika razlika između statičkog faktora trenja ($v_{rel} = 0$) i dinamičkog faktora trenja u dalnjem razmatranju se mora uvažiti, kao i njihova promjena u zavisnosti od dodirnog pritiska tarnih površina, brzine proklizavanja lamela i pogonske temperature tarnih površina (slika 1.).



Slika 1. Faktor trenja tarnog para čelik/čelik - rad u ulju

2.1.2. TARNI PAR ČELIK/SINTEROBLOGA

Neprekidni razvoj metalurgije praškastih materijala omogućava za traženi slučaj eksploracije spojke odabir specijalnih materijala sa stajališta trenja. Sve oštiri zahtjevi u korištenju materijala obloga prema toplinskoj opteretivosti, konstantnom faktoru trenja, dodirnom pritisku tarnih površina, brzini proklizavanja i otpornosti prema trošenju ostvaruje se novim kvalitetnijim sinter-metalima. Kod ovog tarnog para faktor trenja od početka ubrzavanja do izjednačavanja brzine vrtnje pogonskog i gonjenog dijela ($v_{rel} = 0$) tj. uspostave sinkronizma neznatno se mijenja, što ima za poslijedicu ravnomernu karakteristiku ubrzanja masa, a time i dobivamo meko upuštanje gornjene strane. Ove obloge zbog niza prednosti sinter-materijala koriste se za rad nasuho i rad u ulju.

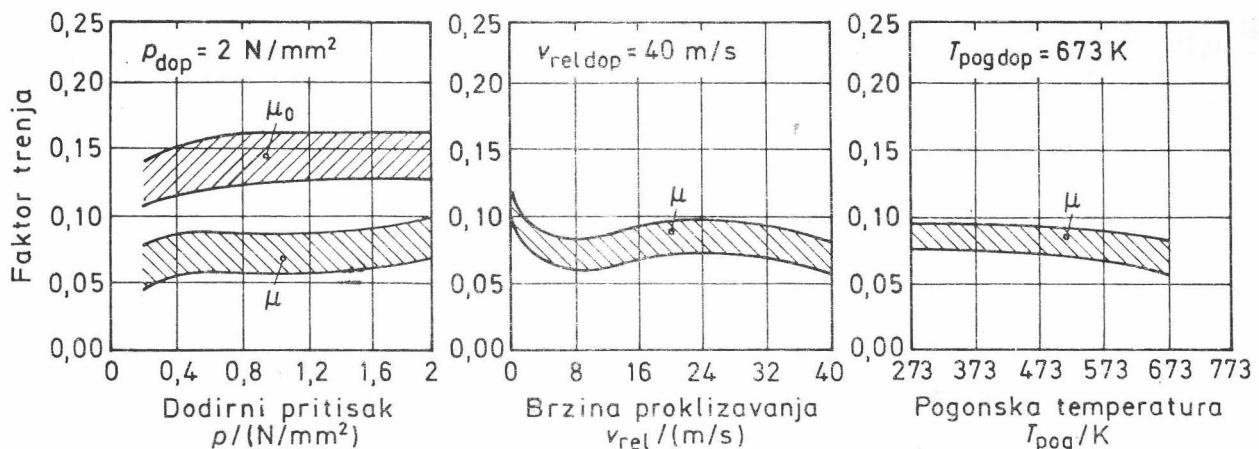
2.1.2.1. RAD U ULJU

Pri ovakovom načinu rada odnos statičkog naspram dinamičkog faktora trenja leži niže nego kod tarnog para čelik/čelik. Maksimalni dodirni pritisak tarnih površina $P_{dop} = 2 \dots 3 \text{ Nmm}^{-2}$ i brzina proklizavanja $v_{rel,dop} = 35 \dots 45 \text{ ms}^{-1}$ je znatno viša nego kod para čelik/čelik, te iz toga proizlaze manje izvedbene dimenzije spojke. Na slici 2 uočavaju se područja rasprostiranja vrijednosti statičkog i dinamičkog faktora trenja, jer je njihova veličina zavisna o elementima i stupnju legiranja, veličini zrna, pritisku i temperaturi sinteriranja.

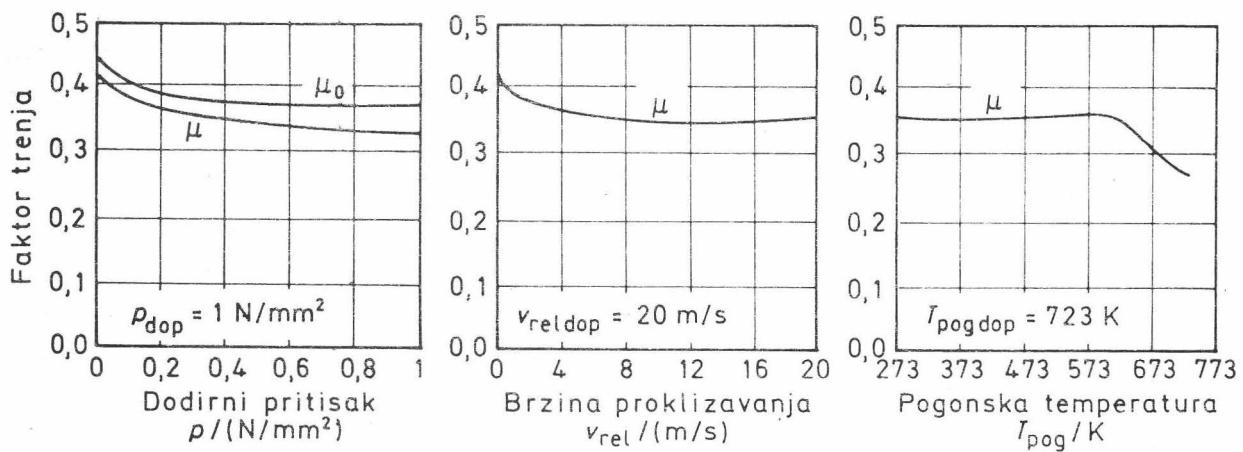
2.1.2.2. RAD NASUHO

Odnos statičkog prema dinamičkom faktoru trenja postaje još manji nego kod rada u ulju i leži u granicama 1,2...1,3. Sa slike 3 vidljivo je, da je maksimalna brzina

proklizavanja $v_{rel,dop} = 25 \text{ ms}^{-1}$ i dodirni pritisak tarnih površina $p_{dop} = 1 \text{ Nmm}^{-2}$ znatno niži od vrijednosti rada u ulju.



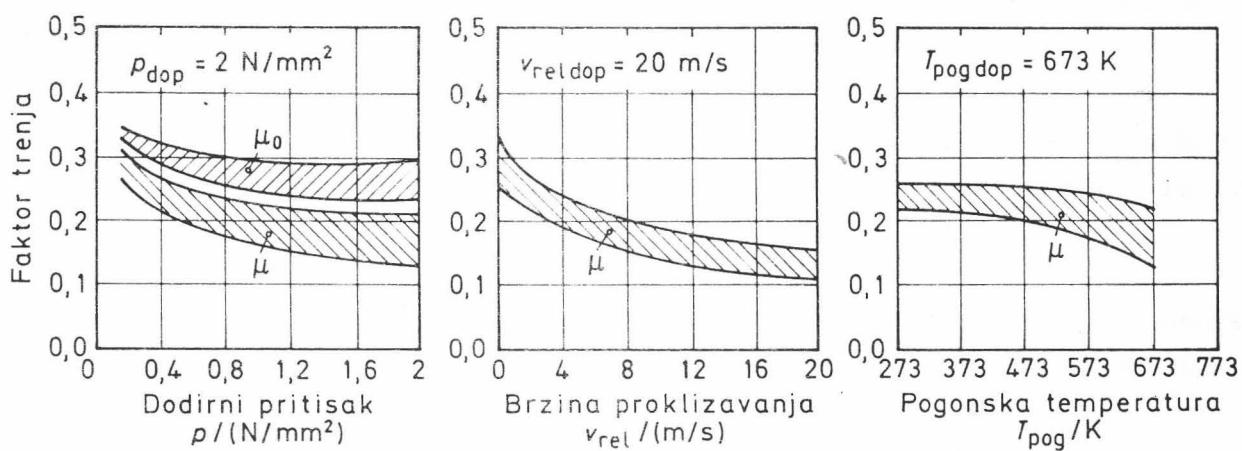
Slika 2. Faktor trenja tarnog para čelik/sinterobloga - rad u ulju



Slika 3. Faktor trenja tarnog para čelik/sinterobloga - rad nasuho

2.1.3. TARNI PAR ČELIK ODNOSNO LIJEV/ORGANSKA OBLOGA

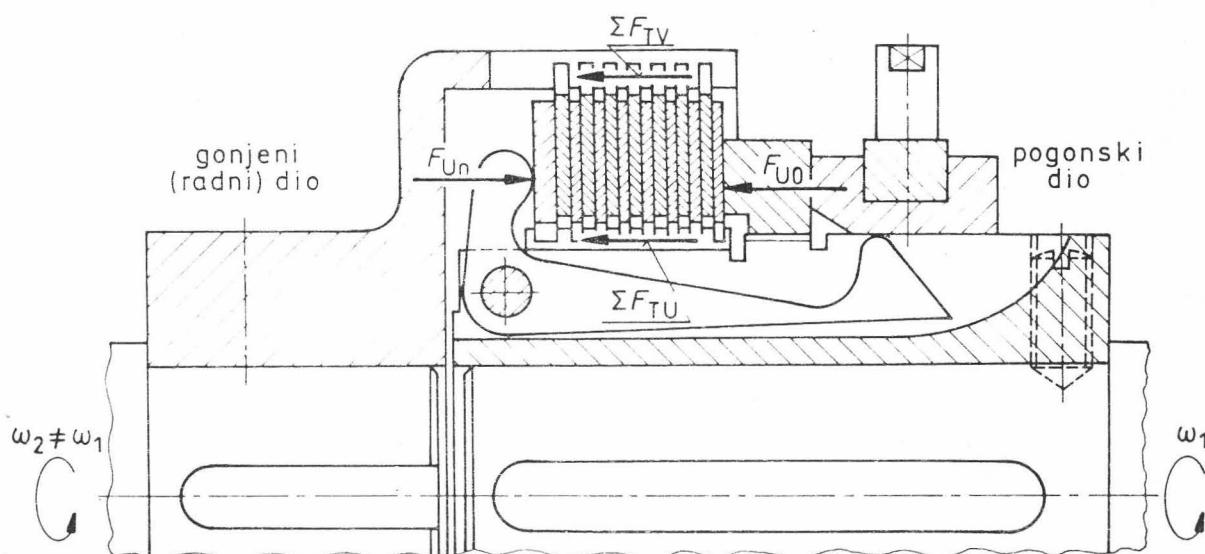
Pod pojmom organska obloga podrazumijevaju se različiti materijali prirodnog porijekla (pamučno i azbestno tkanje, papir i dr.) ili vjakna umjetnog porijekla pomiješani često s metalnom strugotinom u vezivom sredstvu (buna, umjetna smola i dr.). Namijenjen je isključivo za rad nasuho, a pri oblikovanju lamele obloga je izvedena u obliku segmenata ili prstenova, te je zalipljena ili zakovana na osnovnu čeličnu ploču. Prednost ovog tarnog para leži u vrlo visokoj veličini faktora trenja, te u vrlo povoljnem odnosu statičkog prema dinamičkom faktoru trenja 1,3...1, uz maksimalni dodirni pritisak $p_{dop} = 2 \text{ Nmm}^{-2}$ i brzini proklizavanja $v_{rel,dop} = 20 \text{ ms}^{-1}$. Vrsta i udio komponenata u oblozi, te tehnologija proizvodnje je najčešće poslovna tajna, zaštićena od strane proizvodača i zbog toga faktor trenja poprima različite vrijednosti (slika 4.).



Slika 4. Faktor trenja tarnog para čelik odnosno lijev/organska obloga - rad nasuho

2.2. PRORAČUN DOPUŠTENOG BROJA LAMELA

Rad lamelnih spojki zasniva se na načelu da se sastavni dijelovi spojke-lamele uzdužnim silama medusobno pritišću, čime se javljaju sile trenja, potrebne za prijenos okretnog momenta s pogonske na gonjenu stranu spojke. Tijekom procesa uključivanja pod opterećenjem, dolazi do uzdužnog pomicanja lamela, čime se stvaraju dodatni gubici zbog nastale sile trenja što ima za posljedicu smanjenje prenosivog okretnog momenta s T_p (uvedenog okretnog momenta na pogonskoj strani) na okretni moment uključivanja gonjene strane T_{UK} (okretni moment koji se može prenijeti pri uključivanju na radni stroj). Usljed popratnih sila trenja na grebenima - ozubljenjima lamela dolazi do gubitka uvedene uzdužne sile uključivanja F_{Un} na prvoj unutarnjoj lameli, na preostalu silu uključivanja F_{Uo} na zadnjoj unutarnjoj lameli (slika 5.).



Slika 5. Uzdužne sile u lamelnoj spojci pri uključivanju

Iz uvjeta ravnoteže u uzdužnom smjeru slijedi:

$$F_{Un} = F_{U0} + \text{sila trenja na grebenima (zubima)} = F_{U0} + \sum F_{TU} + \sum F_{TV}$$

Analizom sila i okretnih momenata na prvoj unutarnjoj lameli n (slika 6.) proizlaze slijedeći uvjeti ravnoteže:

$$F_{Nn} \cdot R_u - F_{On-1} \cdot R_m = 0 \quad \text{i} \quad F_{Un} - F_{TA_n} - F_{Un-1} = 0$$

Prema tome uvedeni okretni moment od prve unutarnje lamele n na stranu prve vanjske lamele n-1 iznosi:

$$T_{On} = F_{Nn} \cdot R_u = F_{On-1} \cdot R_m$$

$$\text{Srednji polumjer tarnih površina lamela } R_m = \frac{2 \cdot (R_1^3 - R_2^3)}{3 \cdot (R_1^2 - R_2^2)} \cong \frac{R_1 + R_2}{2}$$

Iz gornjeg izraza slijedi da je reaktivni preneseni okretni moment na vanjsku lamelu n-1 prve tarne površine z = 1

$$T'_{On-1} = F_{On-1} \cdot R_m$$

Kako je navedeno, kod uključivanja pod opterećenjem dolazi do naslanjanja grebena (zuba) lamela na bok utora - uzubine gonjenog - prihvavnog dijela, a uslijed uzdužnog pomicanja uzduž linije boka prihvavnog dijela javlja se sila trenja na n-toj lameli:

$$F_{TA_n} = \mu_{ax} \cdot F_{Nn}$$

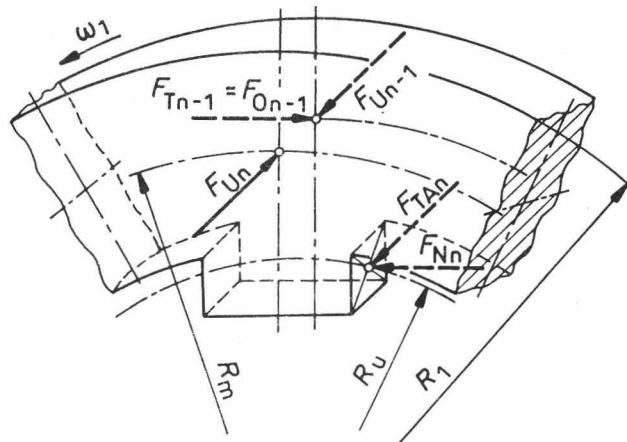
Faktor trenja μ_{ax} pojavljuje se uzduž grebena (zuba) lamela i utora prihvavnog dijela. Iz konstrukcije lamela sa i bez obloge te prihvavnog dijela vidljivo je, da se uvijek radi o kontaktu čelik/čelik odnosno lijev. Za rad s podmazivanjem iznosi $\mu_{ax} = 0,1 \dots 0,14$. Kod drugih kombinacija materijala mijenja se veličina faktora trenja.

Zbog konstrukcijskih razloga u izvedbama tarnih spojki s više lamela, skoro uvijek su krajnje lamele izvedene s unutarnjim ozubljenjem što znači da je broj lamele neparan odnosno unutarnjih lamela je za jednu više od vanjskih lamela.

Iz uvjeta ravnoteže sila na prvoj unutarnjoj lameli u uzdužnom smjeru (slika 6.) proizlazi: $F_{Un-1} = F_{Un} - F_{TA_n}$. Uslijed uzdužne sile F_{Un-1} između lamele n i n-1, tj. na prvoj tarnej površini z=1 na polumjeru R_m djeluje sila trenja F_{Tn-1} , odnosno obodna sila: $F_{On-1} = \mu_{ax} \cdot F_{Un-1} = F_{Tn-1}$

$$\text{Iz gornjih jednadžbi slijedi: } T'_{On-1} = T_{On} = \frac{F_{TA_n}}{\mu_{ax}} \cdot R_u = F_{On-1} \cdot R_m$$

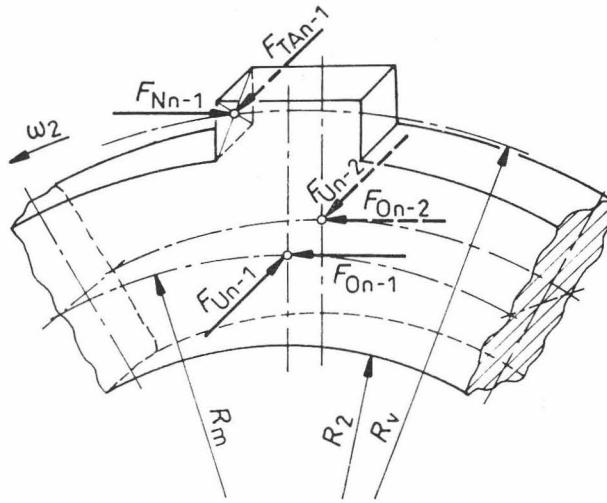
$$F_{TA_n} = \mu_{ax} \frac{R_m}{R_u} \cdot F_{On-1} \quad \Rightarrow \quad F_{TA_n} = \mu \cdot \mu_{ax} \frac{R_m}{R_u} \cdot F_{Un-1}$$



Slika 6. Sile na prvoj unutarnjoj lameli

Obodna sila $F_{O_{n-1}}$, prve vanjske lamele n-1 (slika 7.) je reakcija obodne sile F_{O_n} , prve unutarnje lamele n, koja je suprotna smjeru okretanja. Sredivanjem izraza uvjeta ravnoteže prve unutarnje lamele n uz uvođenje faktora $f_1 = 1/(1 + \mu \cdot \mu_{ax} \cdot R_m / R_u)$ dobiva se obodna sila prve tarne površine z = 1:

$$F_{O_{n-1}} = \mu \cdot f_1 \cdot F_{U_n}$$



Slika 7. Sile na prvoj vanjskoj lameli n-1

Analizom sila prve vanjske lamele n-1 (slika 7.) potpuno je identična provedenom postupku za prvu unutarnju lamelu n. Od druge unutarnje lamele n-2, na vanjsku lamelu n-1 djeluje uzdužna sila uključivanja $F_{U_{n-2}}$, tj. normalna sila na tarnoj površini z = 2, a u smjeru okretanja obodna sila $F_{O_{n-2}}$:

$$F_{O_{n-2}} = \mu \cdot F_{U_n}$$

Moment trenja na tornoj površini $z = 2$ (između lamela n-1 i n-2):

$$T'_{On-2} = F_{On-2} \cdot R_m = \mu \cdot R_m \cdot F_{Un-2}$$

Reaktivni okretni moment T_{On-1} , koji djeluje na vanjskoj lameli n-1, suprotan je smjeru okretanja, a u ravnoteži je s okretnim momentima na tornoj površini prema susjednim lamelama n i n-2:

$$T_{On-1} = T'_{On-1} + T'_{On-2}$$

Iz ravnoteže okretnih momenata prema osi okretanja:

$$F_{Nn-1} \cdot R_v = (F_{On-1} + F_{On-2}) \cdot R_m$$

Uslijed normalne sile F_{Nn-1} na vanjskom ozubljenju lamele n-1 javlja se sila trenja:

$$F_{TAn-1} = \mu_{ax} \cdot F_{Nn-1} = \mu_{ax} \cdot \frac{R_m}{R_v} \cdot (F_{On-1} + F_{On-2})$$

, koja je suprotnog smjera djelujućoj uzdužnoj sili uključivanja F_{Un-1} lamele n na lamelu n-1.

Iz uvjeta ravnoteže u udužnom smjeru proizlazi, da je na tornoj površini $z = 2$ tj. između lamela n-1 i n-2 uzdužna sila uključivnja:

$$F_{Un-2} = \frac{F_{Un}}{1 + \mu \cdot \mu_{ax} \cdot \frac{R_m}{R_u}} - \mu_{ax} \cdot \frac{R_m}{R_v} \cdot (F_{On-1} + F_{On-2})$$

Uz prethodno navedene izraze za obodne sile F_{On-1} i F_{On-2} , te nakon uvrštenja u prethodni izraz za F_{Un-2} i sredivanja stog dobiva se:

$$F_{Un-2} = f_1 \cdot \frac{\frac{1 - \mu \cdot \mu_{ax}}{R_v} \cdot R_m}{1 + \mu \cdot \mu_{ax} \cdot \frac{R_m}{R_u}} \cdot F_{Un}$$

Uvođenjem dodatnog faktora $f_a = \left(\frac{1 - \mu \cdot \mu_{ax}}{1 + \mu \cdot \mu_{ax}} \cdot \frac{R_m}{R_u} \right)$, slijedi konačni oblik:

$$F_{Un-2} = f_1 \cdot f_a \cdot F_{Un}$$

Obodna sila na tornoj površini $z = 2$ između lamela n-1 i n-2:

$$F_{On-2} = \mu \cdot F_{Un-2} = \mu \cdot f_1 \cdot f_a \cdot F_{Un}$$

Prenešeni okretni moment od vanjske lamele n-1 na radno vratilo spojke.

$$T_{On-1} = T'_{On-1} + T'_{On-2}, \text{ uz date izraze } T'_{On-1} = R_m \cdot F_{On-1} = \mu \cdot f_1 \cdot R_m \cdot F_{Un}$$

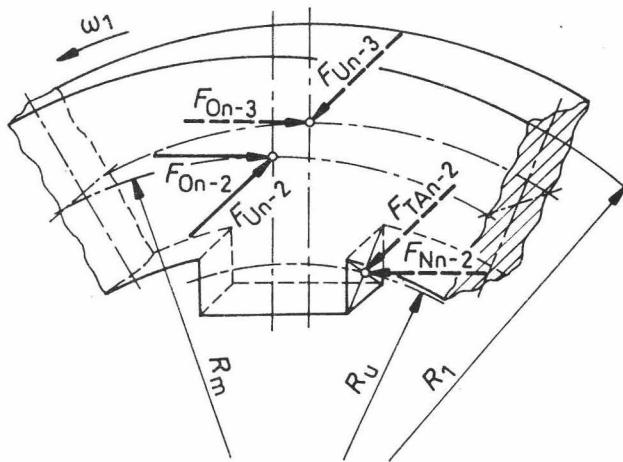
$$\text{i } T'_{On-2} = R_m \cdot F_{On-2} = \mu \cdot f_1 \cdot f_a \cdot F_{Un} \text{ nakon sređivanja dobiva se:}$$

$$T_{On-1} = (1 + f_a) \cdot f_1 \cdot \mu \cdot R_m \cdot F_{Un}$$

$$\text{U izraz } f_1 \cdot (1 + f_a) = 2 \cdot [1 / (1 + \mu \cdot \mu_{ax} \cdot R_m / R_u)] \cdot [1 / (1 + \mu \cdot \mu_{ax} \cdot R_m / R_v)]$$

$$\text{uvodenjem faktora } f_3 = (1 + \mu \cdot \mu_{ax} \cdot R_m / R_u) \cdot (1 + \mu \cdot \mu_{ax} \cdot R_m / R_v)$$

$$\text{dobivamo konačni izraz: } T_{On-1} = 2 \cdot f_3^{-1} \cdot \mu \cdot R_m \cdot F_{Un}.$$



Slika 8. Sile na drugoj unutarnjoj lameli n-2

Identičnim postupkom analize sila, tj. rješavanjem ravnoteže sila u uzdužnom smjeru kao i ravnoteže uvedenog parcijalnog okretnog momenta i okretnih momenata na tarnim površinama lamele, dobiva se uzdužna sila uključivanja između lamela n-2 i n-3 (slika 8.):

$$F_{Un-3} = F_{Un-2} - F_{TA_{n-2}}$$

i okretni moment na istoj tarnoj površini:

$$T'_{On-3} = T_{On-2} - T'_{On-2}$$

$$F_{On-3} \cdot R_m = F_{Nn-2} \cdot R_u - F_{On-2} \cdot R_u$$

Iz uvjeta $F_{TA_{n-2}} = \mu_{ax} \cdot F_{Nn-2}$ i $F_{Nn-2} = \frac{R_m}{R_u} (F_{On-2} - F_{On-3})$ slijedi:

$$F_{TA_{n-2}} = \mu_{ax} \cdot \frac{R_m}{R_u} \cdot (F_{On-2} + F_{On-3})$$

$$F_{On-2} = \mu \cdot f_1 \cdot f_a \cdot F_{Un}$$

$$F_{On-3} = \mu \cdot F_{Un-3}$$

Odatle dobivamo : $F_{TAn-2} = \mu \cdot \mu_{ax} \cdot \frac{R_m}{R_u} \cdot (f_1 \cdot f_a \cdot F_{Un} + F_{Un-3})$

$$F_{Un-3} = f_1 \cdot f_a \cdot F_{Un} - \mu \cdot \mu_{ax} \cdot \frac{R_m}{R_u} \cdot f_1 \cdot f_a \cdot F_{Un} - \mu \cdot \mu_{ax} \cdot \frac{R_m}{R_u} \cdot F_{Un-3}$$

$$F_{Un-3} \left(1 + \mu \cdot \mu_{ax} \cdot \frac{R_m}{R_u} \right) = f_1 \cdot f_a \left(1 - \mu \cdot \mu_{ax} \cdot \frac{R_m}{R_u} \right) \cdot F_{Un}$$

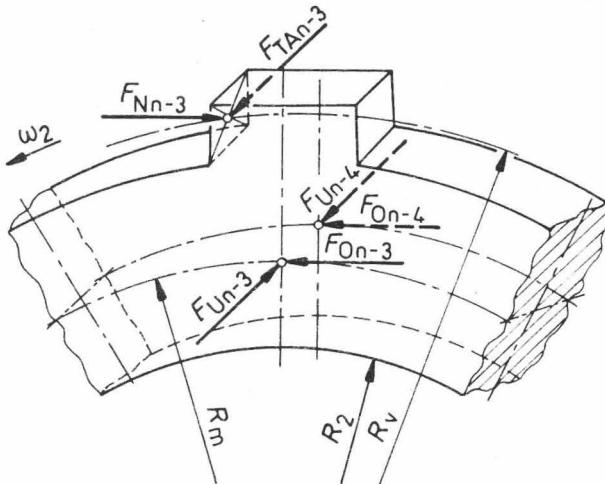
$$F_{Un-3} = f_1 \cdot f_a \cdot \frac{I - \mu \cdot \mu_{ax} \cdot \frac{R_m}{R_u}}{I + \mu \cdot \mu_{ax} \cdot \frac{R_m}{R_u}} \cdot F_{Un}$$

Uvođenjem faktora $f_i = \left(I - \mu \cdot \mu_{ax} \cdot \frac{R_m}{R_u} \right) / \left(I + \mu \cdot \mu_{ax} \cdot \frac{R_m}{R_u} \right)$

dobiva se izraz za silu uključenja na tornoj površini između lamela n-2 i n-3:

$$F_{Un-3} = f_1 \cdot f_a \cdot f_i \cdot F_{Un}$$

i okretni moment : $T'_{On-3} = \mu \cdot f_1 \cdot f_a \cdot f_i \cdot F_{Un}$



Slika 9. Sile na drugoj vanjskoj lameli n-3

Iz uvjeta ravnoteže vanjske lamele n-3 (slika 9.):

$$F_{Un-4} = F_{Un-3} - F_{TAn-3}$$

$$T_{On-3} = T'_{On-3} + T'_{On-4}$$

$$F_{Nn-3} \cdot R_v = F_{On-3} \cdot R_m + F_{On-4} \cdot R_m$$

i prethodnih uvjeta $F_{On-3} = \mu \cdot F_{Un-3} = \mu \cdot f_1 \cdot f_a \cdot f_i \cdot F_{Un}$ i $F_{On-4} = \mu \cdot F_{Un-4}$ dobivaju se:

$$F_{TAn-3} = \mu_{ax} \cdot F_{Nn-3} = \mu_{ax} \cdot \frac{R_m}{R_v} \cdot (F_{On-3} + F_{On-4}) = \mu \cdot \mu_{ax} \cdot \frac{R_m}{R_v} \cdot (F_{Un-3} + F_{Un-4})$$

$$F_{Un-4} = F_{Un-3} - F_{TAn-3} = f_1 \cdot f_a \cdot f_i \cdot F_{Un} - \mu \cdot \mu_{ax} \cdot \frac{R_m}{R_v} \cdot (f_1 \cdot f_a \cdot f_i \cdot F_{Un} + F_{Un-4})$$

$$F_{Un-4} \cdot \left(I + \mu \cdot \mu_{ax} \cdot \frac{R_m}{R_u} \right) = \left(I - \mu \cdot \mu_{ax} \cdot \frac{R_m}{R_v} \right) \cdot f_1 \cdot f_a \cdot f_i \cdot F_{Un}$$

$$F_{Un-4} = \frac{I - \mu \cdot \mu_{ax} \cdot R_m / R_v}{I + \mu \cdot \mu_{ax} \cdot R_m / R_v} \cdot f_1 \cdot f_a \cdot f_i \cdot F_{un}$$

$$F_{Un-4} = f_1 \cdot f_a^2 \cdot f_i \cdot F_{un}$$

Uzdužna preostala sila uključivanja može se izračunati za proizvoljan broj lamela odnosno tarnih površina z, izmjeničnim množenjem faktorima f_a i f_i te se dobiva:

$$\text{na lameli n-4: } F_{Un-5} = f_1 \cdot f_a^2 \cdot f_i^2 \cdot F_{un} ;$$

$$\text{na lameli n-5: } F_{Un-6} = f_1 \cdot f_a^3 \cdot f_i^2 \cdot F_{un} ;$$

$$\text{na lameli n-6: } F_{Un-7} = f_1 \cdot f_a^3 \cdot f_i^3 \cdot F_{un} ;$$

$$\text{na lameli n-7: } F_{Un-8} = f_1 \cdot f_a^4 \cdot f_i^3 \cdot F_{un} ; \quad \text{itd.}$$

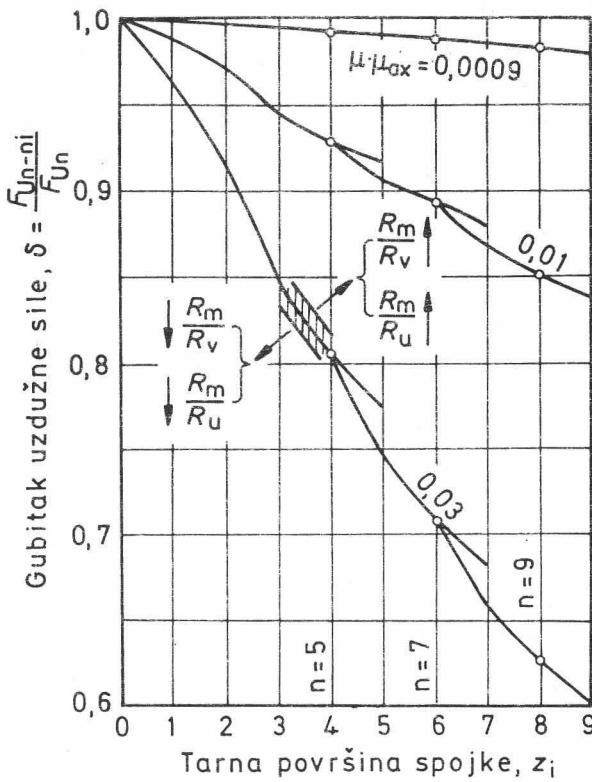
Na dijagramu (slika 10.) prikazan je gubitak uzdužne sile uključivanja F_{Un} na prvoj lameli prema preostaloj sili uključivanja F_{Un-ni} na ni-toj lameli spojke, sastavljene iz n lamer za različite umnoške $\mu \cdot \mu_{ax}$ i određeni odnos dimenzija R_m / R_v i R_m / R_u , s kvalitativnim prikazom pomaka gubitka uzdužne sile pri promjeni dimenzija lamela, prema prethodnim iznosima faktora f_1, f_a , i f_i .

Kod spojke sa $n = 7$ lamela preostala (raspoloživa) sila na zadnjoj tarnej površini $z = 6$, kod umnoška $\mu \cdot \mu_{ax} = 0,03$ iznosi cca. 71 % od veličine uvedene uzdužne sile uključivanja F_{Un} (slika 10.), a kod $\mu \cdot \mu_{ax} = 0,01$ cca. 90 %, tj. preostala sila na zadnjoj lameli F_{Un} je manja za cca. 29 %, odnosno cca. 10 % od uvedene sile F_{Un} .

Prenešeni okretni moment od vanjske lamele na radno vratilo spojke:

$$T_{on-3} = \mu \cdot R_m \cdot (F_{Un-3} + F_{Un-4}) = (f_1 \cdot f_a \cdot f_i \cdot F_{Un} + f_1 \cdot f_a^2 \cdot f_i \cdot F_{Un}) \cdot \mu \cdot R_m = \\ = (I + f_a) \cdot f_1 \cdot f_a \cdot f_i \cdot \mu \cdot F_{Un} \cdot R_m$$

Uz uvjet $(I + f_a) \cdot f_1 = 2 \cdot f_3^{-1}$ dobivamo: $T_{on-3} = 2 \cdot \mu \cdot f_3^{-1} \cdot f_a \cdot f_i \cdot R_m \cdot F_{Un}$

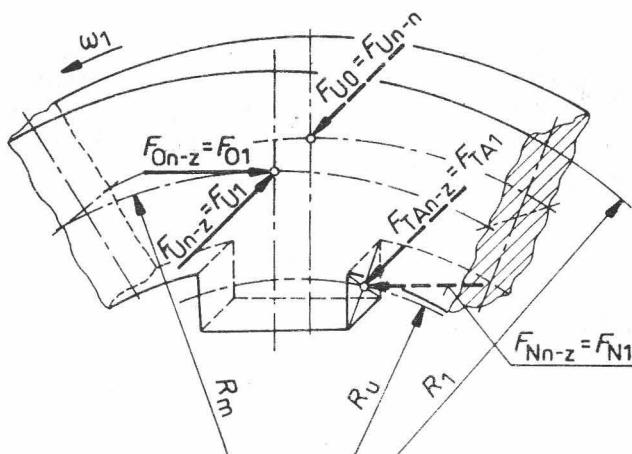


Slika 10. Dijagram gubitka uzdužne sile na z_i -toj tarnoj površini za $R_m / R_v = 0,8077$ i $R_m / R_u = 1,3125$

Prenešeni okretni moment od proizvoljne vanjske lamele n_j na radno vratilo spojke dobiva se množenjem prenesenog okretnom momenta predhodne vanjske lamele $i-2$ sa faktorima f_a i f_i , te imamo npr. preneseni okretni moment s vanjske lamele $n-5$:

$$T_{On-5} = f_a \cdot f_i \cdot T_{On-3} = 2 \cdot \mu \cdot f_3^{-1} \cdot f_a^2 \cdot f_i^2 \cdot R_m \cdot F_{Un};$$

s vanjske lamele $n-7$: $T_{On-7} = 2 \cdot \mu \cdot f_3^{-1} \cdot f_a^3 \cdot f_i^3 \cdot R_m \cdot F_{Un}$ itd.



Slika 11. Sile na zadnjoj unuarnoj lameli $n-z = 1$

Analizom sila na zadnjoj unutarnjoj lameli $n-z=1$ (slika 11.) proizlazi $F_{U_{n-n}} = F_{U_{n-z}} - F_{T_{An-z}}$, te iz uvjeta prenesenog okretnog momenta: $T_{O_{n-z}} = F_{O_{n-z}} \cdot R_U$ slijedi izraz uzdužne sile trenja na grebenu:

$$F_{T_{An-z}} = \mu_{ax} \cdot F_{N_{n-z}} = \mu_{ax} \cdot \frac{R_m}{R_u} \cdot F_{O_{n-z}} = \mu \cdot \mu_{ax} \cdot \frac{R_m}{R_u} \cdot F_{U_{n-z}}$$

Od zadnje vanjske lamele $n-z+1$ na zadnju unutarnju lamelu $n-z$ djeluje uzdužna sila uključivanja $F_{U_{n-z}}$, odnosno uzdužna sila zadnje tarne površine, a u suprotnom smjeru od smjera okretanja, obodna sila $F_{O_{n-z}}$.

$$F_{U_{n-z}} = f_1 \cdot f_a^{\frac{z}{2}} \cdot f_i^{\frac{z}{2}-1} \cdot F_{U_n}$$

$$F_{U_{n-n}} = f_1 \cdot f_a^{\frac{z}{2}} \cdot f_i^{\frac{z}{2}-1} \cdot F_{U_n} - \mu \cdot \mu_{ax} \cdot \frac{R_m}{R_u} \cdot f_1 \cdot f_a^{\frac{z}{2}} \cdot f_i^{\frac{z}{2}-1} \cdot F_{U_n}$$

$$F_{U_{n-n}} = \left(1 - \mu \cdot \mu_{ax} \cdot \frac{R_m}{R_u} \right) \cdot f_1 \cdot f_a^{\frac{z}{2}} \cdot f_i^{\frac{z}{2}-1} \cdot F_{U_n}$$

Uvođenjem faktora $f_2 = 1 - \mu \cdot \mu_{ax} \cdot \frac{R_m}{R_u}$ slijedi: $F_{U_{n-n}} = f_1 \cdot f_2 \cdot f_a^{\frac{z}{2}} \cdot f_i^{\frac{z}{2}-1} \cdot F_{U_n}$

kao i faktora $f_1 \cdot f_2 = \left(1 - \mu \cdot \mu_{ax} \cdot \frac{R_m}{R_u} \right) \cdot \frac{1}{1 + \mu \cdot \mu_{ax} \cdot \frac{R_m}{R_u}} = f_i$

$$F_{U_{n-n}} = F_{U_0} = f_a^{\frac{z}{2}} \cdot f_i^{\frac{z}{2}-1} \cdot F_{U_n}$$

Najmanja preostala uzdužna sila $F_{U_{n-n}} = F_{U_0}$ poslije zadnje unutarnje lamele $n-z$, tj. reakcija na čelnu ploču-oslonac dobije se množenjem uzdužne sile zadne tarne površine $z=n-1$ faktorom f_a . Iz odnosa $F_{U_0}/F_{U_n} = f_a^{z/2} \cdot f_i^{z/2}$ za spojku s proizvoljnim brojem lamela $n=z+1$, može se prema još dopuštenom ili zadanom smanjenju uzdužne sile uključivanja na lamelama izračunati najveći, još uvijek DOPUŠTENI BROJ LAMELA. Iz veličine gubitka uzdužne sile uključivanja F_{U_n} na prvoj lameli prema uzdužnoj sili F_{U_0} na zadnjoj unutarnjoj lameli dobiva se dopušteni broj lamela:

$$\delta = \frac{F_{U_0}}{F_{U_n}} = f_a^{\frac{z}{2}} \cdot f_i^{\frac{z}{2}} < 1$$

$$\delta = \left[\frac{1 - \mu \cdot \mu_{ax} \cdot \frac{R_m}{R_v}}{1 + \mu \cdot \mu_{ax} \cdot \frac{R_m}{R_v}} \right]^{\frac{z}{2}} \cdot \left[\frac{1 - \mu \cdot \mu_{ax} \cdot \frac{R_m}{R_u}}{1 + \mu \cdot \mu_{ax} \cdot \frac{R_m}{R_u}} \right]^{\frac{z}{2}}$$

$$\frac{2}{\delta^z} = \frac{1 - \mu \cdot \mu_{ax} \cdot \frac{R_m}{R_v}}{1 + \mu \cdot \mu_{ax} \cdot \frac{R_m}{R_v}} \cdot \frac{1 - \mu \cdot \mu_{ax} \cdot \frac{R_m}{R_u}}{1 + \mu \cdot \mu_{ax} \cdot \frac{R_m}{R_u}}$$

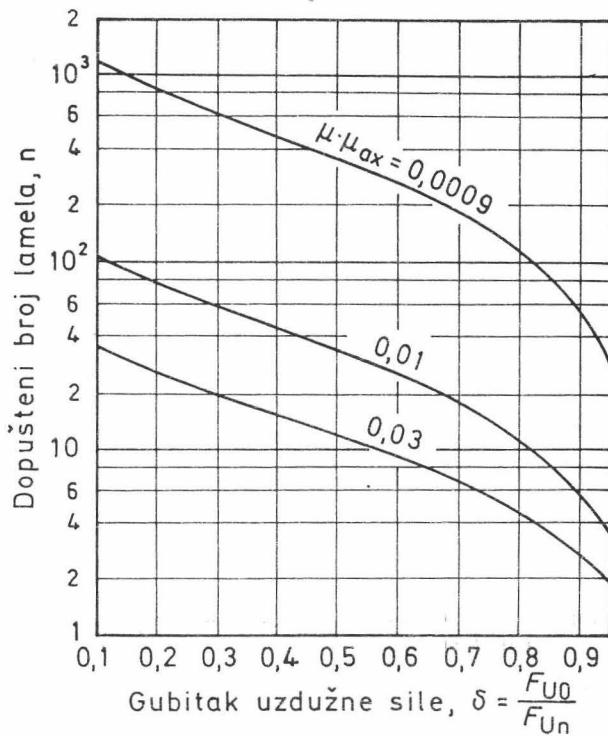
$$\frac{2}{z} \log \delta = \log \left(1 - \mu \cdot \mu_{ax} \cdot \frac{R_m}{R_v} \right) - \log \left(1 + \mu \cdot \mu_{ax} \cdot \frac{R_m}{R_v} \right) + \log \left(1 - \mu \cdot \mu_{ax} \cdot \frac{R_m}{R_u} \right) - \log \left(1 + \mu \cdot \mu_{ax} \cdot \frac{R_m}{R_u} \right)$$

uz $z=n-1$ dobiva se:

$$n = 1 + \frac{2 \cdot \log \delta}{\log \left(1 - \mu \cdot \mu_{ax} \cdot \frac{R_m}{R_v} \right) - \log \left(1 + \mu \cdot \mu_{ax} \cdot \frac{R_m}{R_v} \right) + \log \left(1 - \mu \cdot \mu_{ax} \cdot \frac{R_m}{R_u} \right) - \log \left(1 + \mu \cdot \mu_{ax} \cdot \frac{R_m}{R_u} \right)}$$

Iz dijagrama (slika 12.) je vidljivo, da za dopušteni gubitak uzdužne sile uključivanja, npr. $\delta = F_{U0}/F_{Un} = 0,70$, tj. preostala uzdužna sila F_{U0} je za 30 % manja od uvedene uzdužne sile uključivanja F_{Un} , najveći dopušteni broj lamela za odnos dimenzija lamela $R_m/R_v = 0,8077$ i $R_m/R_u = 1,3125$ kod $\mu \cdot \mu_{ax} = 0,03$ iznosi 7 lamela, a kod $\mu \cdot \mu_{ax} = 0,01$ 18 lamela.

Prema praktičnim podacima lamelne spojke koje se uključuju pod opterećenjem nemaju više od 15 lamela, a u iznimnim slučajevima maksimalno 21 lamelu.

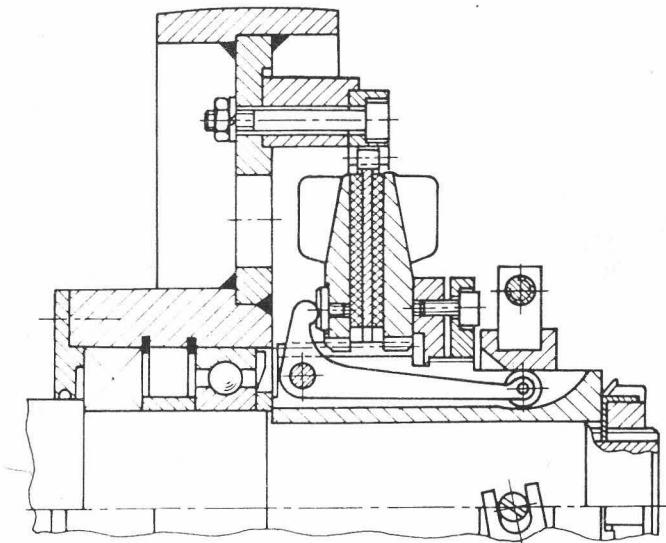


Slika 12. Najveći dopušteni broj lamela spojke

2.3 TOPLINSKA OTPORNOST TARNIH PAROVA

Toplinsko opterećenje tarne spojke je određeno radom trenja po ciklusu uključivanja, brojem uključivanja u određenom vremenu, stankom između dva uključivanja, odvođenjem topline sa spojke, trajanju procesa ubrzanja masa i dr. Rad trenja može se odrediti iz veličine masa koje se ubrzavaju i razlike brzine vrtnje Δn gognjene i pogonske strane prema vremenu ubrzanja-rastrčavanja gognjene strane, uzimajući u obzir i momente opterećenja spojke pri uključivanju. Pri procesu uključivanja moguće je neznatnu količinu topline, nastale pretvorbom energije akumulirati tj. zadržati u spojci, zbog relativno male mase iste, dok je ostatak topline potrebno odvesti u okolinu. Iz tog razloga preispitujemo ugradnju te ukoliko je moguće odabiremo prikladnije mjesto, pri čemu, odvođenju topline pridajemo veliko značenje.

U pogonima za ubrzanje velikih masa u kratkom vremenu rastrčavanja tj. velikim radom ubrzavanja, koriste se pneumatsko upravljive spojke s jednom lamelom i velikim rashladnim površinama, koja je dodatnim rebrima znatno povećana. Prijelaz topline na okolni zrak je pojačan strujanjem zraka pomoću rebara i kako je zavisao od brzine vrtnje (slika 13).



Slika 13. Spojka s jednom tarnom pločom nazvana jednolamelna ili dvopovršinska spojka (Ortlinghau - Wermelskirchen)

Spojka ugradena u kućište prijenosnika i stroja ne može se hladiti na gornji način, već protjecanjem rashladnog ulja kroz i oko lamela. Daljnje odvodenje topline odvija se preko vanjske površine kućišta ugradnje, oplahivanog s unutarnje strane uljem, na okolni zrak. Po potrebi je moguće izvršiti dodatno orebrenje vanjske površine ili primijeniti hladnjak ulja.

Dopušteno toplinsko opterećenje za stacionarno stanje rada q_{dop} , kao fizikalna karakteristika, daje se uz pretpostavku ravnomjerne raspodjele rada trenja i u

približno jednakom iznosu po cijelom području nastajanja. Za vrijeme procesa uključivanja nastaje visoki temperaturni skok na tarnim površinama uslijed pretvorbe rada trenja u toplinu u vrlo kratkom vremenskom periodu tj. u vremenu ubrzavanja masa. Pouzdan i dug rad spojke uvjetovan je time, da postignuta temperatura na tornoj površini, bilo trenutna nastala u fazi pretvorbe rada trenja u toplinu, bilo trajna - pogonska nastala u stacionarnom stanju, nesmije prekoračiti dopuštene vrijednosti za upotrebljeni tarni materijal tj. uvijek se moraju uvažiti dopuštene vrijednosti temperature.

Za tarni par čelik/čelik toplinsko opterećenje je zavisno od vrste i temperature rashladnog sredstva kao i njegove količine. Trenutna (kratkotrajna) temperatura tarne površine od $300\ldots350$ °C, odnosno pogonska temperatura od $200\ldots250$ °C nesmije biti prekoračena. Za podmazivanje prskanjem i uranjanjem (bućkanjem) dopušteno toplinsko opterećenje u trajnom radu tarne površine iznosi $q_{dop} = 3,6 \cdot 10^{-3}\ldots4,7 \cdot 10^{-3}$ W/mm² (niže vrijednosti za bućanje), a za unutarnje podmazivanje (strujanje ulja između lamela) $q_{dop} = 4,7 \cdot 10^{-3}\ldots5,8 \cdot 10^{-3}$ W/mm².

Kod tarnog para čelik/sinterobloga, najčešće primjenjivana sinterbronca posjeduje vrlo dobru toplinsku vodljivost i visoku otpornost kratkotrajnim temperaturnim skokovima nastalih pri uključivanju od cca. $400\ldots500$ °C, a neki tipovi do cca. 600 °C, bez bojazni da pritom nastane međusobno zavarivanje mikroneravnina. Pri ovakvim visokim temperaturama, pri radu u ulju nastaje uljna magla, a pri radu nasuho $q_{dop} \approx 5,5 \cdot 10^{-3}$ W/mm². Za podmazivanje bućanjem $q_{dop} = 25 \cdot 10^{-3}\ldots42,5 \cdot 10^{-3}$ W/mm², a pri unutarnjem podmazivanju $q_{dop} = 41,6 \cdot 10^{-3}\ldots83 \cdot 10^{-3}$ W/mm² (podatci: Ortlinghaus - Wermelskirchen).

Tarni par čelik odnosno lijev/organska obloga se koristi za pogonske temperature do max. 250 °C. Kratkotarjna opterećenja temperaturnim skokovima od cca $300\ldots400$ °C su dopuštena, ali se pritom javlja intenzivno trošenje obloge lamele. Iako su namijenjene za rad nasuho, kombinacija lijev/organska obloga kod jednolamelnih spojki (slika 13.) ima $q_{dop} \approx 27,8 \cdot 10^{-3}$ W/mm², a za čelik ili lijev/organska obloga kod višelamelnih spojki (maksimalno $n = 4$ lamele s organskom oblogom) $q_{dop} = 4,1 \cdot 10^{-3}$ W/mm².

Prema VDI 2241, list 1 opisana je dopuštena specifična površinska snaga trenja q_{AO} [W/mm²] i dopušteni površinski rad uključivanja po ciklusu q_{AE} [J/mm²], koji također na određeni način opisuju otpornost toplinskom opterećenju. Nastale razlike u iznosima razlikuju se od proizvođača do proizvođača, od metode i načina mjerena.

2.4. PRIMJENA TARNIH PAROVA

Jeftini tarni par čelik/čelik koristi se uspješno u svim tipovima lamelnih spojki izuzev kod elektromagnetski upravljivih spojki (u dalnjem tekstu elektromagnetske spojke) s protočnim silnicama. Iako radi isključivo u ulju, koristi se za niske

učestalosti uključivanja pri malom toplinskom opterećenju. Kod primjene u sigurnosnim spojkama, materijal lamela ne treba biti zakaljen, mogu raditi nasuho, ali pri prijenosu velikih opterećenja, treba voditi računa o trajanju proklizavanja.

Tarni par čelik/sinterobloga, iako predviđen za obje vrste rada, pretežno se koristi za rad s podmazivanjem, jer može podnijeti visoka toplinska opterećenja, visoke brzine proklizavanja pri visokim dodirnim pritiscima tarnih površina. Naročito je preporučeno unutarnje podmazivanje kroz vratilo.

Najčešće primjenjivani tarni par za rad nasuho je tarni par čelik odnosno lijev/organska obloga, koji pri upotrebi u obliku višelamelne spojke, može prenijeti visoki okretni moment, pri niskim učestalostima uključivanja uz maleno toplinsko opterećenje. Međutim kao jednolamelna spojka namjenjena je za najteže uvjete rada i to za prijem i uključivanje visokih okretnih momenata, pri visokim učestalostima uključivanja s kratkim pauzama mirovanja između dva uključivanja.

2.5. VRIJEME I TOČNOST UKLJUČIVANJA

Zavisno od primjenjene vrste pogona za upravljanje spojkom (mehanički, hidraulički, pneumatski ili elektromagnetski), mogu se postaviti različiti zahtjevi, kao i izvedbe prema vremenu i točnosti uključivanja. U optimalnoj funkciji moraju se uskladiti tip i karakteristika izvedbe, kao i materijal tarne površine. Općenito, spojke za rad nasuho uključuju se točnije od spojki za rad s podmazivanjem.

Elektromagnetske lamelne spojke s protočnim silnicama kroz lamele imaju obično duže vrijeme uključivanja (naročito vrijeme isključivanja), nego drugi tipovi elektromagnetskih spojki zbog pojave zaostalog magnetizma unutar zračnog procjepa.

Hidraulički upravljive spojke uključuju se vrlo točno i brzo uz uvjet dobrog korištenja, ispravno dimenzioniranih upravljačkih elemenata u sustavu, pri čemu dimenzije cijevi, veličina i tip razvodnika, kvalitet i kapacitet pumpnog agregata i drugih elemenata daju veliki utjecaj na traženu funkciju spojke. Vrijeme uključivanja kod ovih spojki se postiže od cca 0,5...1 sek, uz ispunjene gornjih uvjeta.

Nasuho radeće, pneumatski upravljive spojke mogu ispuniti vrlo oštре zahtjeve s gledišta vremena i točnosti uključivanja pri prijenosu velikih okretnih momenata npr. kod preša i škara. Ispravnim dimenzioniranjem ventila i vodova kod ovih spojki može se postići vrijeme uključivanja od cca. 0,1...0,2 sek .

Na dijagramu vremenskog toka rada lamelne spojke (slika 14.) uočavaju se karakteristična vremena za stanje uključivanja i isključivanja - otpuštanja, poznata kao vrijeme zatvaranja i otvaranja lamelne spojke, te vrijeme ubrzavanja rotirajućih masa, tj. vrijeme proklizavanja lamela spojke.

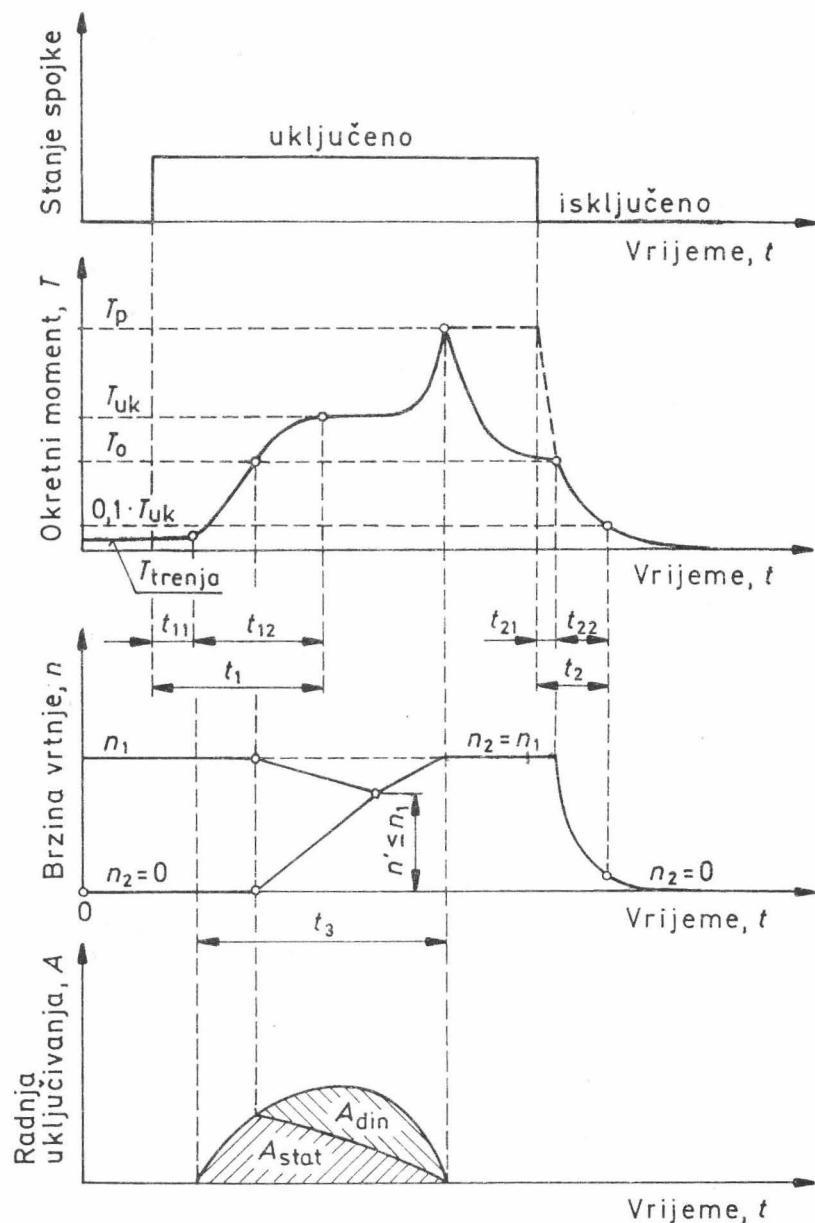
Vrijeme starta spojke t_{11} je period od trenutka uključivanja upravljačkog pogona spojke do početka porasta okretnog momenta na gonjenoj strani; poznato kao vrijeme kašnjenja. Vrijeme povećavanja okretnog momenta t_{12} je vrijeme od početka rasta do

postizanja nazivnog okretnog momenta uključivanja T_{UK} (dinamičkog okretnog momenta) na gonjenoj strani. Vrijeme zatvaranja tj. uključivanja spojke t_1 je zbroj vremena starta t_{11} i vremena povećavanja okretnog momenta t_{12} :

$$t_1 = t_{11} + t_{12}$$

Vrijeme otvaranja odnosno isključivanja spojke vezano je uz uklanjanje upravljačkog pogona sa zatvorene spojke i djelovanje pogona za razmicanje lamela (opružna sila prstenastih valovitih opruga ili "Sinus" lamela). Vrijeme starta t_{21} je vrijeme od isključivanja upravljačkog pogona do početka opadanja prenosivog okretnog momenta T_p . Vrijeme opadanja t_{22} je period od početka opadanja prenosivog okretnog momenta T_p do 10 %-tnog iznosa momenta uključivanja T_{UK} . Vrijeme otvaranja spojke iznosi:

$$t_2 = t_{21} + t_{22}$$



Slika 14. Dijagram vremenskog toka rada lamelne spojke

Vrijeme ubrzavanja rotirajućih masa t_3 je period unutar kojeg tarne površine spojke pod silom pritiska izvode medusobno relativno kretanje ili je to vrijeme ostvarivanja sinkronizma ($v_{rel} = 0$) pogonske i gonjene strane spojke. Ono je uvijek duže od vremena zatvaranja spojke t_1 .

3. DIMENZIONIRANJE SPOJKE

Na izvedbu i veličinu lamelne spojke od presudnog su značaja veličina radnog okretnog momenta, momenta tromosti rotirajućih masa, vrijeme i ciklus rada, rad uključivanja, način i snaga upravljanja spojkom, vrsta pogona i dr.

3.1.DIMENZIONIRANJE PREMA MAKSIMALNOM PRENOSIVOM MOMENTU

Radni okretni moment T_o je djelujući moment na gonjenoj strani lamelne spojke, proračunat npr. iz nazivne snage i brzine vrtnje izvršnog organa radnog stroja:

$$T_o = \frac{P}{\omega}$$

Osim radnog okretnog momenta T_o mora se također promatrati i karakteristika vrtnje pogonskog i radnog stroja uz analizu dodatnih dinamičkih opterećenja. Nastale promjene mogu biti periodične (opterećenje se mijenja po nekom ciklusu) ili povremeno (opterećenje se povremeno smanjuje ili povećava tokom vremena). Električni i turbo strojevi imaju ravnomjerniji okretni moment za razliku od klipnih, a neravnomjernost klipnih strojeva zavisi od broja cilindara i o stupnju uravnoteženosti masa. Radni strojevi kod kojih se javljaju velika ubrzavanja rotirajućih masa i strojevi kod kojih radne sile naglo rastu (valjaonički stanovi, drobilice), predstavljaju strojeve s naglim povećanjem potrebnog radnog okretnog momenta.

Često je vrlo teško odrediti iznos i vrijeme nastanka dinamičkog udara, te se zbog toga u praksi mogu kompenzirati neravnomjernosti iskustvenim pogonskim faktorom K_I -ISO, dokument 192 E (tablica 1.). Prema tome stvarno najveće vanjsko opterećenje dobiva se množenjem radnog opterećenja pogonskim faktorom K_I . Uz radni moment pridaje se često moment trenja i otpora u ležajima, navojnim vretenima, zupčanicima i drugim elementima, reducirani na vratilo spojke. Obično se zanemaruje zbog relativno malog iznosa naspram radnog momenta ili se uzima u obzir preko faktora sigurnosti.

Opterećenje radnog stroja	Vrsta pogonskog stroja			
	Vrsta radnog stroja	Elektromotor Parna turbina Višecilindrični klipni motor Hidromotor	Parni stroj 2-cilindrični klipni motor	1-cilindrični klipni motor
ravnomjerni pogon	Generatori za proizvodnju struje, lančani transporteri, rotacioni kompresori, zračne pjeskarilice, tekstilni strojevi, transportni strojevi, ventilatori, centrifugalne pumpe	1,5	2	2,5
umjeteni udari	Dizalice, liftovi, elevatori, rotacione peći, vitla, dizalični pogoni, rotacioni hladnjaci, namatalice, mješalice, oštrilice, brusilice, alatni strojevi, preše za opeku	2	2,5	3
srednji udari	Bageri, bušeće garniture, briketna preša, jamski ventilatori, valjci za gumu, građevinske mješalice, vijčane pumpe, bubenjasta čistilica, vibratori, višekomorni mlinovi	2,5	3	3,5
jaki udari	Klipna pumpa, jarmača (pila), preša, valjci za papir, rudničke drobilice, valjaonički stanovi, cementni mlinovi, centrifuge	3	3,5	4

Tablica 1. Pogonski faktor K_I

U procesu uključivanja spojka pored radnog okretnog momenta mora prenijeti i okretni moment koji ubrzava pripadne mase T_e , od brzine vrtnje n_1 na brzinu vrtnje n_2 u poznatom vremenskom periodu - vremenu ubrzanja t_3 . Potrebni okretni moment ubrzanja masa računa se po izrazu:

$$T_e = \frac{J \cdot \Delta\omega}{\Delta t_{ubrz.}} = \frac{J \cdot (\omega_1 - \omega_2)}{t_3} = \frac{J \cdot (n_1 - n_2)}{9,56 \cdot t_3}$$

Moment tromosti mase $J = \int r^2 dm$ definiran je kao zbroj svih umnožaka elementarnih masa i kvadrata njihove udaljenosti od osi rotacije. Izraze za proračun momenata tromosti karakterističnih toracionih tijela nalaze se u tablicama (npr. za puni i šuplji valjak, prsten, ploču i dr.) potrebno je reducirati na os rotacije spojke. Proračun pravocrtno pokretnih masa u moment tromosti rotacionih masa na os spojke provodi se po izrazu:

$$J = m_p \cdot \frac{v_p^2}{\omega_2^2}$$

Okretni moment uključivanja T_{UK} (dinamički okretni moment) je djelujuće opterećenje u sustavu pri uključivanju spojke. Djeluje za vrijeme uključivanja do uspostave sinkronizma pogonske i gonjene strane, a jednak je sumi radnog momenta i momenta ubrzanja rotacionih masa, uvećanoj za faktor sigurnosti $s=1,2\dots1,4$ za spojke za rad nasuho i $s=1,4\dots1,6$ za spojke za rad u ulju.

$$T_{uk} = s \cdot (K_I \cdot T_O + T_e)$$

Analizom okretnih momenata na vanjskim lamelama spojke može se od pogonskog dijela na gonjeni-radni dio prenijeti okretni moment, koji se sastoji iz prenesenih parcijalnih momenata vanjskih lamela n-1, n-3, n-5, ..., n-z+1. Nazivni (kataloški) okretni moment T_{NS} spojke za uključivanje pod opterećenjem iznosi:

$$\begin{aligned} T_{On-1} &= 2 \cdot f_3^{-1} \cdot \mu \cdot R_m \cdot F_{Un} \\ T_{On-3} &= 2 \cdot f_3^{-1} \cdot f_a \cdot f_i \cdot \mu \cdot R_m \cdot F_{Un} \\ T_{On-5} &= 2 \cdot f_3^{-1} \cdot f_a^2 \cdot f_i^2 \cdot \mu \cdot R_m \cdot F_{Un} \\ &\vdots \\ T_{On-z+1} &= 2 \cdot f_3^{-1} \cdot f_a^{\frac{z}{2}-1} \cdot f_i^{\frac{z}{2}-1} \cdot \mu \cdot R_m \cdot F_{Un} \end{aligned}$$

Uvrštavanjem predhodnih izraza dobiva se konačni izraz nazivnog okretnog momenta T_{NS} , koji spojka može teorijski prenijeti pri uključivanju pod opterećenjem:

$$\begin{aligned} T_{NS} &= 2 \cdot \mu \cdot f_3^{-1} \cdot R_m \cdot F_{Un} \left(I + f_a \cdot f_i + f_a^2 \cdot f_i^2 + \dots + f_a^{\frac{z}{2}-1} \cdot f_i^{\frac{z}{2}-1} \right) \\ T_{NS} &= 2 \cdot \mu \cdot f_3^{-1} \cdot R_m \cdot F_{Un} \cdot \sum_{q=0}^{\frac{z}{2}-1} (f_a \cdot f_i)^q \end{aligned}$$

Za prijenos opterećenja traži se uvjet: $T_{UK} \leq T_{NS}$, a dalnjim izjednačavanjem dobiva se relacija:

$$s \cdot (K_I \cdot T_O + T_e) = 2 \cdot \mu \cdot f_3^{-1} \cdot R_m \cdot F_{Un} \cdot \sum_{q=0}^{\frac{z}{2}-1} (f_a \cdot f_i)^q$$

iz koje se dobiva potrebna uzdužna sila uključivanja F_{Un} na prvoj unutarnjoj lameli n:

$$F_{Un} = \frac{s \cdot (K_I \cdot T_O + T_e) \cdot f_3}{2 \cdot \mu \cdot R_m \cdot \sum_{q=0}^{\frac{z}{2}-1} (f_a \cdot f_i)^q}$$

3.1.1. KONTROLA DODIRNOG PRITISKA TARNIH POVRŠINA

Dodirni pritisak p kontrolira se na prvoj tarnoj površini $z = 1$, između lamela n i n-1 i uvijek mora biti manji od dopuštenog pritiska p_{dop} , koji je određen vrstom upotrebljenog tarnog para i načinom rada (objašnjeno u poglavljju 2 - Tarni materijal lamela).

$$p = \frac{F_{U_{n-1}}}{\pi \cdot (R_1^2 - R_2^2)} \leq p_{dop}$$

Uvedena sila uključivanja F_{U_n} na čelo prve unutarnje lamele n, smanjuje se na prvoj tornoj površini $z = 1$ na silu $F_{U_{n-1}}$, zbog uzdužne sile trenja na grebenim lamele :

$$F_{U_{n-1}} = \frac{F_{U_n}}{1 + \mu \mu_{ax} \cdot \frac{R_m}{R_u}} = f_1 \cdot F_{U_n}$$

Računajući dodirni pritisak s najvećim dopuštenim brojem lamela, utvrđuje se početni odnos naspram dopuštenog dodirnog pritiska. Za relaciju $p < p_{dop}$ može se smanjiti ukupni broj lamela za dvije (2) lamele, tj. broj tarnih površina za jednu (1). Ponovljenom kontrolom nazivnog okretnog momenta T_{NS} vanjskih lamela i dodirnog pritiska tarnih površina, može doći do daljnog smanjenja broja lamela n u spojci. Pritom moraju biti ispunjeni uvjeti prijenosa opterećenja $T_{UK} \leq T_{NS}$ i dodirnog pritiska $p < p_{dop}$. Smanjenje broja lamela n sprovodi se do povećanja dodirnog pritiska prema iskustvenom uvjetu $p \approx 0,8 \dots 0,9 p_{dop}$, uz istovremeni uvjet prijenosa opterećenja. Međutim bitno je napomenuti, da upravljačka snaga spojke (mehanička sila na poluzi, hidraulički i pneumatski pritisak i elektromagnetska sila), koja nam stoji na raspolaganju kao i elementi u upravljačkom lancu realne su veličine, definirane slučajem primjene stroja i veličine spojke, mogu biti ograničavajući faktor sa stajališta smanjenja broja lamela n. Kod mehanički upravljivih spojki dimenzioniranje dvokrake poluge kopčanja, svornjaka, ručice i drugih elemenata, kod pneumatski i hidraulički upravljivih spojki raspoloživi tlak medija i dimenzija lamela samo su neke od faktora koji mogu imati za posljedicu potrebu smanjenja uzdužne sile uključivanja F_{U_n} odnosno rezultat toga je povećanje broja lamela n.

3.1.2. PRORAČUN PRENOSIVOOG OKRETNOG MOMENTA ZATVORENE SPOJKE

Pri uključivanju pod opterećenjem, spojka može prenijeti na gonjenu stranu spojke nazivni okretni moment T_{NS} , čija je veličina odredena dimenzijom lamela, vrstom torno para i silom pritiska F_{U_n} . On je redovito niži od prenosivog okretnog momenta zatvorene spojke T_p (statičkog momenta) tj. kod postignutog sinkronizma pogonske i gonjene strane. Odnos nazivnog okretnog momenta kojeg spojka može prenijeti kad se uključuje pod opterećenjem i okretnog momenta kad je zatvorena, zavisao je od torno para i u principu prenosivi okretni moment zatvorene spojke je za cca. 20...80 % veći od nazivnog momenta kad se spojka uključuje pod opterećenjem. Može se dati relacija:

$$T_p = (1,2 \dots 1,8) \cdot T_{NS} \approx k \cdot T_{UK}$$

Faktor k je ustvari odnos statičkog prema dinamičkom faktoru trenja, te za tarni par čelik/čelik $k = 1,8\dots 2$, čelik odnosno lijev/ørganska obloga $k = 1\dots 1,3$ i za čelik/sinterobloga $k = 1,3\dots 1,5$.

Analizom rada spojke kad se uključuje neopterećena ili še uključuje iz stanja mirovanja pogonske i gonjene strane ($n_1 = n_2 = 0$), dobiva se prenosivi okretni moment zatvorene spojke:

$$T_p = \mu_o \cdot z \cdot R_m \cdot F_{Un} = \mu \cdot k \cdot z \cdot R_m \cdot F_{Un}$$

Razlika okretnih momenata T_{NS} i T_p utječe na toplinsko opterećenje spojke zbog odnosa:

$$\frac{T_p}{T_{NS}} = \frac{\mu \cdot k \cdot z \cdot R_m \cdot F_{Un}}{2 \cdot \mu \cdot f_3^{-1} \cdot R_m \cdot F_{Un} \cdot \sum_{q=0}^{q=\frac{z}{2}-1} (f_a \cdot f_i)^q} = \frac{k \cdot f_3 \cdot z}{2 \cdot \sum_{q=0}^{q=\frac{z}{2}-1} (f_a \cdot f_i)^q} > 1$$

Prema tome moment trenja T_R ulazi u toplinski proračun spojke kao iznos nazivnog opterećenja.

$$T_R = T_{UK} \cdot \frac{T_p}{T_{NS}} = T_{UK} \cdot \frac{k \cdot f_3 \cdot z}{2 \cdot \sum_{q=0}^{q=\frac{z}{2}-1} (f_a \cdot f_i)^q}$$

Dodirni pritisak tarnih površina za spojke koje se uključuju neopterćene ili iz stanja mirovanja kao i za sigurnosne lamelne spojke poprima po svim tarnim površinama konstantni iznos:

$$p_{stat} = \frac{F_{Un}}{\pi \cdot (R_1^2 - R_2^2)} \leq p_{dop\ stat}$$

$$F_{Un} = \frac{T_p}{\mu_o \cdot z \cdot R_m}$$

$$p_{stat} = \frac{T_p}{\mu_o \cdot z \cdot R_m \cdot \pi \cdot (R_1^2 - R_2^2)}$$

3.2. DIMENZIONIRANJE PREMA NASTALOM RADU TRENJA

Tarne spojke s velikom učestalošću uključivanja ili dugim vremenima ubrzavanja masa t_3 potrebno je i toplinski proračunati odnosno provjeriti. U procesu uključivanja pod opterećenjem pritisnute lamele međusobno proklizavaju do postizavanja sinkronizma pri čemu se javlja radnja trenja A_R , manifestiran u obliku toplinskog opterećenja. Nastala toplina na tarnim površinama mora se učinkovito odvesti, kako za spojku, odnosno tarni par ne bi došlo do prekoračenja dopuštene vrijednosti

tempreture zagrijavanja. Ukupna količina topline Q jednog ciklusa uključivanja spojke nastaje kao djelovanje momenta trenja T_R kroz vrijeme proklizavanja do uspostave sinkronizma pogonske i gonjene strane odnosno to je transformiran rad trenja A_R u toplinu, nastao za vrijeme ubrzavanja rotirajućih masa t_3 , kod razlike brzina vrtnje pogonskog i gonjenog dijela spojke $\Delta \omega$ do izjednjačavanja brzina vrtnje $\Delta \omega = 0$.

$$Q = A_R = A_{stat} + A_{din} = T_R \cdot \frac{I}{2} \cdot (\omega_1 - \omega_2) \cdot t_3 \quad [\text{J/uključivanju}]$$

Razvijena količina topline nakon z_k ciklusa kopčanja na sat iznosi:

$$Q_z = Q \cdot z_k \quad [\text{J/h}]$$

Da bi se izbjeglo povećano toplinsko opterećenje pri uključivanju pod opterećenjem tj. djelovanjem radnog okretnog momenta $K_I \cdot T_O$, mora rasploživi okretni moment za ubrzanje masa $T_{NS} - K_I \cdot T_O$, biti dovoljno velik da se ubrzanje izvede u traženom vremenu. Kod odnosa $T_{NS} / K_I \cdot T_O < 2$ imamo velik prirast toplinskog opterećenja, jer se spojka ne može ubrzati u vremenu t_3 , te je zbog toga potrebno imati na osnovu iskustva za smanjeno toplinsko opterećenje odnos $T_{NS} / K_I \cdot T_O > 3 \dots 4$.

Kod čistog ubrzanja masa ($T_O = 0$), količina topline po jednom uključivanju koja se razvije u spojci jednaka je energiji ubrzanja masa:

$$Q = A_R = \frac{J}{2} \cdot (\omega_1 - \omega_2)^2 \quad [\text{J/ uključivanju}]$$

U primjeni lamelnih spojki mogu se razlikovati sljedeći postupci uključivanja:

1. spojka se uključuje samo jedanput u toku rada
(jednostruko uljučivanje $z_k < 0.2$ ciklusa/h);
2. trajno uključivanje u radu ($z_k > 5$ ciklusa/h);
3. proklizavanje spojke pri preopterećenju.

3.2.1. JEDNOSTRUKO UKLJUČIVANJE

Pretvorenu radnju trenja u toplinu spojka mora moći akumulirati, jer se zbog jednog uključivanja ne uzima prijelaz topline s vanjskih površina spojke na okolinu. Za toplinsku ravnotežu pretpostavlja se, da se preuzima ukupna nastala toplina iz radnje trenja procesom uključivanja, samo od paketa lamela. Tada se proračunava prirast temperature ΔT paketa lamela po izrazu:

$$\Delta T \approx \frac{Q}{m \cdot c} \quad [\text{K}]$$

Ujednačena temperatura paketa lamela mora ostati ispod dopuštene pogonske tempreture $T_{pog\ dop}$ za upotrijebljeni tarni par:

$$T = T_{ok} + \Delta T \leq T_{pog\ dop} \quad [\text{K}]$$

Za temperaturu okoline uzimamo najnepovoljniji slučaj zagrijanosti, te imamo

$$T_{ok} = 293 \dots 303 \text{ (313) K} \cong 20 \dots 30 \text{ (40) } ^\circ\text{C}$$

Specifična toplina c za čelik i čelični lijev (ČL) iznosi 461 J/kgK, a za lijevano željezo (SL) 545 J/kgK. Masa m toplinski akumulirajućeg paketa lamela za tarni par čelik/čelik i čelik/sinterobloga je ukupna masa paketa lamela, dok je za tarni par čelik odnosno lijev/organska obloga, masa neobloženih lamela jer je organska obloga dobar toplinski izolator.

Računski izvod predstavlja srednju vrijednost temperature bez da postupak obuhvati veličinu nastalog temperaturnog skoka.

Za spojke koje rade u ulju nastaje dodatno hlađenje uslijed odvođenja dijela topline uljem, koje oplahuje trane površine. Pod pretpostavkom, da se kod procesa uključivanja u spojci nastala toplina preko paketa lamela i rashladnog ulja odvede, proračunava se potrebna količina rashladnog ulja:

$$V_{ulja}^* \approx \frac{Q - m \cdot c \cdot (T_{pog\ dop} - T_{ok})}{\rho_{ulja} \cdot c_{ulja} \cdot \Delta T_{ulja}} \quad [\text{m}^3/\text{uključivanju}]$$

Za dimenzioniranje kapaciteta pumpe uvodi se vrijeme proklizavanja pri uključivanju, tj. vrijeme ubrzanja masa:

$$V_{ulja} = \frac{V_{ulja}^*}{t_3} \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

Iz gornjeg izraza uočava se, da se proračun odvedene topline rashladnim uljem koristi kod toplinski jako opterećenih spojki, gdje je specifična gustoća ulja $\rho_{ulja} = 0,9 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, a specifična toplina $c_{ulja} = 1886 \text{ J/kgK}$. Kod jednostrukog uključivanja može se nadtemperatura ΔT_{ulja} zadržati ugranicama dopuštene, ako temperaturni skok u paketu lamela nije prevelik uz istovremeno dosta brzo akumuliranje topline od paketa i uz odgovarajuću količinu protoka hladnog ulja. Može se pretpostaviti uz malu grešku, da se pogonska temperatura spojke poravnava prema izlaznoj temperaturi rashladnog ulja u pogonskoj sabirnici (rezervoaru) T_{ok} , pri čemu maksimalna temperatura ulja $T_{max} = T_{ok} + T_{ulja} = 333 \dots 343 \text{ K} \cong 60 \dots 70 \text{ } ^\circ\text{C}$ nesmije biti prekoračena iskustvena granična vrijednost nadtemperature ulja iznosi, $\Delta T_{ulja} = 2 \dots 4 \text{ K}$ - za povratno hlađenje u pogonskoj sabirnici, uz uvjet da količina ulja u istoj treba biti cca. 8-terostrukе protočne količine ulja, da bi se otklonilo brzo starenje ulja i $\Delta T_{ulja} = 10 \dots 12 \text{ K}$ za povratno hlađenje u vodenom hladnjaku.

3.2.2. TRAJNO UKLJUČIVANJE U EKSPLOATACIJI

U toplinu pretvoreni rad trenja, kroz duži vremenski period se odvedena okolini zrak, pri čemu je nužno predpostaviti, da se ciklusi uključivanja odvijaju u približno jednakim vremenskim razmacima i niti jedan ciklus uključivanja ne prekorači maksimalni iznos energije uključivanja. Razvijena količina topline proračunava se po izrazu:

$$Q_z = T_R \cdot \frac{1}{2} \cdot (\omega_1 - \omega_2) \cdot t_3 \cdot z_k \quad [\text{J/h}]$$

Proizvedena toplina na tarnim površinama se odvodi kroz lamele k vanjskim površinama spojke i odatle prelazi na okolini zrak. Nakon određenog vremena rada odnosno određenog broja ciklusa uključivanja-isključivanja, uspostavlja se u spojni stacionarna temperatura, kao ravnoteža između nastale topline na tarnim površinama i odvedene topline s vanjskih površina spojke. Dopušteno stacionarno (pogonsko) stanje temperature nije samo uvjetovano tarnim parom kao kod mehaničkih i hidrauličkih upravljivih spojki većnpr. kod elektromagnetskih spojki ograničenje je u izolaciji zavojnice, kod pneumatskih upravljivih spojki u postojanosti brtvi prema starenju i dr.

Prijelaz topline na okolinu se opisuje kao konvekcijski prijelaz opisan Newton-ovim zakonom hlađenja preko prirasta temperature, koja mora ostati ispod dopuštene vrijednosti za korišteni tarni par:

$$T = \frac{Q_z}{\alpha_k \cdot A_s} + T_{ok} \leq T_{pogdop} \quad [\text{K}]$$

Koefficijent prijelaza topline može se proračunati kao funkcija brzine vrtnje. Radi se o konekcijskom prijelazu topline, koji ovisi o stanju strujanja medija na vanjskim površinama s kojih se odvodi toplina. Različiti režimi pogona, kao podmazivanje uljnom maglom, unutarnje podmazivanje ili podmazivanje uranjanjem utječe također na prijelaz topline. Koefficijent prijelaza topline dakle ovisi o brzini strujanja okolnog zraka, koja je kod rotirajućih ploča jednaka srednjoj obodnoj brzini v_m [m/s] i prema Niemann-u može se izvesti prema izrazu:

$$\alpha_k \approx 18800 + 25100 \sqrt{v_m^3} \quad [\text{J/m}^2 \text{hK}]$$

Vanjska površina spojke A_s je rotirajući dio spojke izložen struji zraka s kojeg se odvodi toplina.

Ukoliko bi temperatura prerasla dopuštenu, onda treba konstrukcijski predvidjeti povećanje vanjske površine spojke (dodatno orebrenje, otvorena oplošja), ugradnja prisilnog strujanja zraka, hlađenje uljem i dr.

Međutim, može se kontrolirati i specifično toplinsko opeterećenje q , proračunato prema radu trenja pri uključivanju, pretvorenu u toplinu natarnoj površini uz

prepostavku ravnomjerne raspodjele po cijelom području nastanka, prema dopuštenom toplinskom opterećenju (poglavlje 2.3).

$$q = \frac{F}{A_{tr}} = \frac{T_R \cdot (\omega_1 - \omega_2) \cdot t_3}{2 \cdot \pi \cdot z \cdot (R_2^2 - R_1^2)} \leq q_{dop} \quad [\text{W/mm}^2]$$

Za rad u ulju prepostavlja se, da nastala količina topline nakon t_3 kopčanja može odvesti samo rashladnim uljem, jer je ovakva spojka ugrađena u zatvoreno kućište, te je tada za toplinsko ravnotežno stanje potrebna količina rashladnog ulja:

$$V_{ulja}^* = \frac{Q - A_s \cdot \alpha_k \cdot \Delta T_{pogdop}}{\rho_{ulja} \cdot c_{ulja} \cdot \Delta T_{ulja}} \approx \frac{Q}{\rho_{ulja} \cdot c_{ulja} \cdot \Delta T_{ulja}} \quad [\text{m}^3/\text{uključivanju}]$$

Kapacitet pumpe:

$$V_{ulja} = \frac{V_{ulja}^*}{t_3} \quad [\text{m}^3 / \text{s}]$$

3.2.3. PROKLIZAVANJE SPOJKE PRI PREOPTEREĆENJU

Spojka prokliče ukoliko je narinuti okretni moment veći od prenosivogokretnog momenta zatvorene spojke T_p . Spojka proklizava određeno vrijemetpr, opterećena okretnim momentom uključivanja T_{UK} , zbog promjene statičkog faktora trenja na dinamički faktor trenja μ , prema datom odnosu $T_p \approx k \cdot T_{UK}$, pri čemu se oslobođena količina topline proračunava po izrazu:

$$Q_{pr} = T_{UK} \cdot \frac{I}{2} \cdot (\omega_1 - \omega_2) \cdot t_{pr} \quad [\text{J}]$$

Pod uvjetom, da se ukupna nastala toplina za vrijeme proklizavanja t_{pr} potpuno preuzme od paketa lamela, bez nastanka dopuštenih temperturnih skokova, može se proračunati dopušteno vrijeme proklizavanja:

$$t_{prdop} = \frac{m \cdot c \cdot (T_{pogdop} - T_{ok})}{T_{UK} \cdot (\omega_1 - \omega_2)} \quad [\text{s}]$$

Ako je ovakva proklizavajuća spojka postavljena kao sigurnosna između pogonskog i radnog stroja, tad ona mora preuzeti kod blokiranja pogona kinetičku energiju rotirajućih pogonskih masa. Dopušteno vrijeme proklizavanja se proračunava po izrazu:

$$t_{prdop} = \frac{J \cdot \omega}{T_{UK}} \leq \frac{m \cdot c \cdot (T_{pogdop} - T_{ok})}{T_{UK} \cdot \omega_1} \quad [\text{s}]$$

3.3. OTPORNOST TROŠENJU I VIJEK TRAJANJA TARNE OBLOGE

Veličina trošenja lamele odnosno obloge prvenstveno ovisi od vremena proklizavanja pri uključivanju i isključivanju, toplinskog opterećenja, od upotrebljenih tarnih materijala kao i od kvalitete (stanja) i oblika površina na suprotnih lamela. Trošenje ostaje niže, kada pri toplinskom udaru kod svakog uključivanja, postignuta temperatura tarne površine lamele nije prekoračila dopuštenu granicu.

Smanjenje trošenja postiže se upotrebom ulja kao rashladnog sredstva, uz uvjet neposrednog dovodenja ulja na tarnu površinu. Uz izvedbu dovodenja ulja iznutra tj. kroz vratilo i pri naročitom oblikovanju tarnih površina (spiralni kanali, radikalni utori, džepovi), čime je ostvareno svršishodno cirkuliranje ulja "iznutra-van", pri čemu ulje poprima funkciju spremnika topline i sigurnog vodiča topline nastale pri uključivanju, trošenje je vrlo malo. Spojke za rad s podmazivanjem imaju manje trošenje od spojki za rad nasuho, te je potrebno kod ovih drugih konstrukcijskim zahvatima na spojci (izvedba s orebrenjem - lopaticama, provrtima), promjenom mesta ugradnje ili dodatnim vanjskim hlađenjem, ostvariti bolje odvodenje topline, a time spriječiti znatno trošenje. Karakteristika trošenja obloge dana je u obliku specifičnog istrošenja obloge q_v [mm³/Wh].

Temperaturni skok na površini, nastao pri uključivanju, kod tarnog para čelik/čelik ulje je u stanju zadržavati dosta niskim zbog prijelaza topline s vruće lamele na hladno ulje, a time i smanjiti trošenje. Ukoliko nastane prekoračenje dopuštenje vrijednosti stvorene količine topline (po ciklusu uključivanja ili po satu rada) intenzivno se povećava trošenje. Pritom dolazi do vidnog odnošenja materijala lamela uz prateće razaranje tarne površine (efekt "hladnog" zavarivanja vrhova mikroneravnina). Specifično istrošenje ovog tarnog para za normalne uvjete rada $q_v = 0,034$ [mm³/Wh].

Tarni par čelik/sinterobloga odnosno sinterbronca, kao najčešći materijal tarne obloge, proizvodi se u različitim kvalitetama, te nam stoji na raspolaganju mogućnost rada na suho ili rada s podmazivanjem. Kod rada s podmazivanjem bitno je da se proe sinterirane površine kod pojave visokočkih temperatura ne zapune talogom (čadi) od izgorenog ulja, čime opada toplinska otpornost. Utjecaj ovog efekta smanjuje se, pa čak i odklanja naročitim profiliranjem tarne površine i dobavom dovoljne količine ulja daje se naročito značenje, jer je velikom količinom na početku, a malom na kraju procesa uključivanja, moguće trošenje smanjiti na vrlo male vrijednosti. Kod rada na suho toršenje je veće nego kod rada s podmazivanjem. Traženo trajanje pri eksploataciji uvjetuje karakteristika trošenja obloge $q_v = 0,017 \dots 0,069$ [mm³/Wh] za rada s podmazivanjem i $q_v = 0,086 \dots 0,34$ [mm³/Wh] za rada nasuho, uz pretpostavku dobre pouzdanosti odvodenja topline, koje se konstrukcijskim zahvatima može poboljšati.

Tarni par čelik odnosno lijev/organska obloga namijenjen za rada nasuho ima vrlo malo trošenje obloge do temperature tarne površine od cca. 423 K (150 °C). Iznad

ove temperature karakteristika trošenja ima nagli rast. Današnji razvoj organskih tarnih materijala teži kritičnoj temperaturi kod koje je još uvijek malo trošenje, od cca. 573 K (300 °C). Specifično trošenje ove obloge $q_v = 0,172...0,258$ [mm³/Wh].

Iznos nastalog istrošenja tarne obloge pri uključivanju zavisi od izvršenog rada trenja u vremenu proklizavanja, načinu rada spojke, vrsti tarnog para, dimenziji i volumenu obloge, kvaliteti izrade i montaže i dr. , te kao rezultat trošenja obloge može se odrediti očekivana trajnost obloge, odnosno vijek trajanja lamela spojke t_h :

$$t_h = \frac{V_o}{q_v \cdot P_R} = \frac{2 \cdot V_o}{q_v \cdot T_R \cdot (\omega_1 - \omega_2) \cdot t_3 \cdot z_k} \quad [\text{h}]$$

$$\text{Volumen istrošenja obloge: } V_o = s_o \cdot y \cdot z \cdot \pi \cdot (R_i^2 - R_2^2) \quad [\text{mm}^3]$$

Faktor korisne površine obloge y prema ukupnoj tarnoj površini zavisi od kvalitete izrade lamela, točnosti ugradnje, mjestu ugradnje, načinu rada i dr. , te se iskustveno uzima 0,85...0,98 za glatke lamele. Za lamele s utorima, kanalima, džepovima i prezima potrebno je njihovu površinu odbiti od ukupne površine, dok faktor korisne površine iznosi $y = 0,80...0,99$.

Iskustvena dopuštena debljina istrošenja obloge s_o uzima se da je 95 % debljine obloge (sinterobloge, organske obloge) , a kod tarnog para čelik/čelik iznosi cca. 25 % debljine lemele. Prilikom zamjene istrošenih lamela obično se preporuča zamjena cijelog paketa, jer su troškovi servisiranja i stajanja pogona daleko viši nego cijena novih lamela ugradenih u spojku.

4. PODMAZIVANJE I HLAĐENJE SPOJKI I KOČNICA

Rad spojke u ulju normalno se primjenjuje u kućištima prijenosnika i strojeva tj. u zatvorenom prostoru. Osim funkcije podmazivanja, ulje poprima i funkciju rashladnog sredstva, koje se može dovesti ubrizgavanjem, preko uranjanja (bućkanja) spojke u ulju - 1/10 vanjskog promjera uronjena ili kao unutarnje podmazivanje kroz vratilo.

Za slučaj ugradnje s povećanim toplinskim opterećenjem primjenjuje se unutarnje podmazivanje, količinom ulja od oko 0,5..2 mm³/mm²s, kao najintenzivnjom vrstom hlađenja spojki. U pitanju tipa ulja, potrebno je kod normalne upotrebe lamelnih spojki u prijenosnicima iznaći kompromis, jer ulje za podmazivanje visoko opterećenih zupčanika i ležaja, ne mogu se uвijek upotrijebiti i za lamelne spojke. Općenito se moraju postaviti slijedeći zahtjevi na ulje za lamelne spojke: visoka toplinska stabilnost i otpornog starenju, dobra toplinska vodljivost i rashladno djelovanje, otpornost stvaranju taloga (čadi) pri povišenim temperaturama, mala promjena viskoziteta pri promjeni temperature ulja, neutralno djelovanje prema bakru (max. stupanj korozije 2 - DIN 51759) i čeliku pri povišenim temperaturama, malo pjenušanje (naročito kod hidraulički upravljaljivih spojki) i dr. .

U tablici 2. dat je pregled moguće korištenih ulja za rad lamelnih spojki različitih proizvođača, klasificiranih prema kinematičkoj viskoznosti na 40 °C, odnosno obodnoj brzini najvećeg vanjskog promjera spojke.

Valjni ležaj u spojkama, za rad nasuho, ugrađuju se s brtvenim prstenom, tako da mast za podmazivanje ne može prodrijeti u prostor spojke. Upotreboom kugličnih ležaja tipa 2Z ili 2 RS dobiva se dvostruka prednost: ležaj nije potrebno podmazati pri montaži i nema naknadnog podmazivanja.

Proizvođač	Mehanički i hidraulički upravljive lamelne spojke srednje brzine vrtnje $v_m \approx 5 \dots 12 \text{ m/s}$		Elektromagnetske lamelne spojke, mehanički i hidraulički upravljive spojke visoke brzine vrtnje $v_m > 12 \text{ m/s}$	
	$v \approx 45 \dots 70 \text{ mm}^2/\text{s}$ ¹⁾		$v \approx 25 \dots 45 \text{ mm}^2/\text{s}$	
ARAL	Kosmol TL 68	64 mm^2/s	Kosmol TL 46 Öl CMS	44 mm^2/s 22 mm^2/s
BP	Energol HL 46 Energol THB 46	46 mm^2/s 46 mm^2/s	Energol HL 32 Energol THB 32	32 mm^2/s 32 mm^2/s
CASTROL	Hyspin HL 46 Perfekto T46	46 mm^2/s 46 mm^2/s	Hyspin VG 32 Perfekto T32	32 mm^2/s 32 mm^2/s
ELF	Polytelis 46	46 mm^2/s	Polytelis 32	31 mm^2/s
ESSO	Teresso 68 Esstic 68	64 mm^2/s 64 mm^2/s	Teresso 68 Esstic 68	64 mm^2/s 64 mm^2/s
INA	Transhidrol JD 50	63 mm^2/s	ATFA ATF B2	35 mm^2/s 33 mm^2/s
MOBIL OIL	D.T.E. Oil Medium	43,4 mm^2/s	D.T.E. Oil Light	29,6 mm^2/s
SHELL	Tellus Öl C46 Tellus Öl C68	46 mm^2/s 68 mm^2/s	Tellus Öl C32	32 mm^2/s
TEXACO	Rando Oil C Regal Oil R&O 68	65 mm^2/s 63 mm^2/s	Rando Oil B Regal Oil R&O 46	43 mm^2/s 42 mm^2/s

1) $1 \text{ mm}^2/\text{s} \approx 1 \text{ cSt}$

Tablica 2. Ulja namjenjena za rad lamelnih spojki

5. UPRAVLJANJE LAMELNIH SPOJKI I KONSTRUKCIJA

Za poznati slučaj ugradnje, način upravljanja spojkom ovisi o raspoloživom pogonskom mediju na stroju ili mjestu ugradnje, željenoj karakteristici uključivanja, očekivanom vremenu ubrzanja masa, točnost uključivanja, te o dodatnoj mogućnosti programiranog uključivanja.

Mehanički upravljive tj. uključivane spojke predstavljaju vanjsko upravljivu spojku mehaničkom silom, koja je vezana uz polužni mehaizam i uobičajenu izvedbu vratila. Ručno uključivanje pruža mogućnost mekog upuštanja u rad gornjene strane (ručna sila 100...200 N), međutim koristi li se dodatno pneumatska, hidraulička ili elektromagnetska sila preko mehanizma, otvara se dodatni način mehaničkog uključivanja spojke u automatskom radu i mogućnost programirane karakteristike upuštanja.

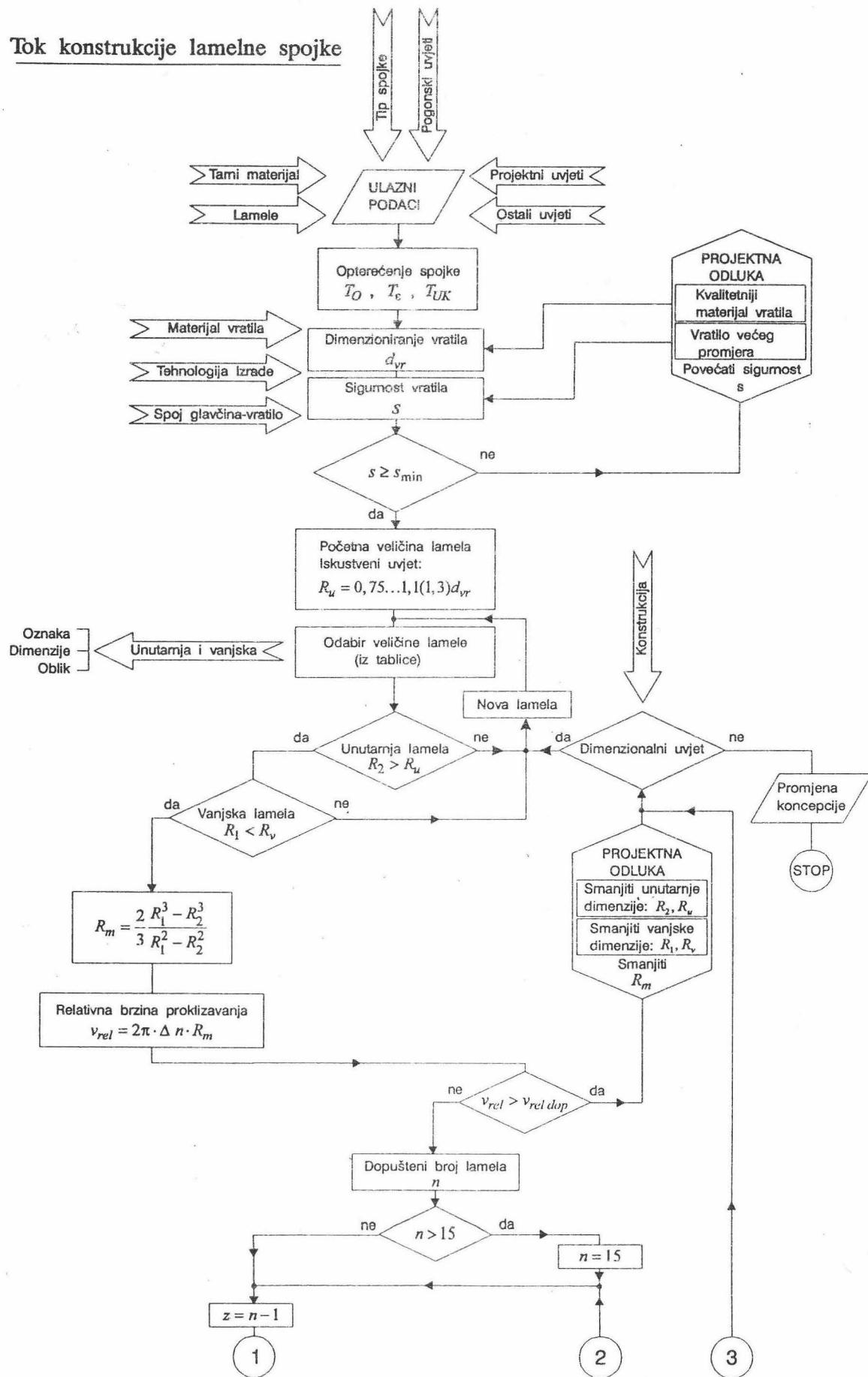
Kod preša, škara, specijalnih alatnih strojeva, brodskih pogona, teških građevinskih strojeva, garnitura za bušenje tla, kao i kod valjaoničkih stanova i dr., uvjek je prisutan stlačeni zrak ili ga je lako dovesti, te se iz toga razloga, vrlo često koristi ovaj tip jeftinog pogona. Specijalnim ventilima i razvodnicima, te ispravno dimenzioniranom armaturom moguće je postići vrlo kratko vrijeme uključivanja (npr. kod preša), a i vrlo mekano ubrzati velike mase.

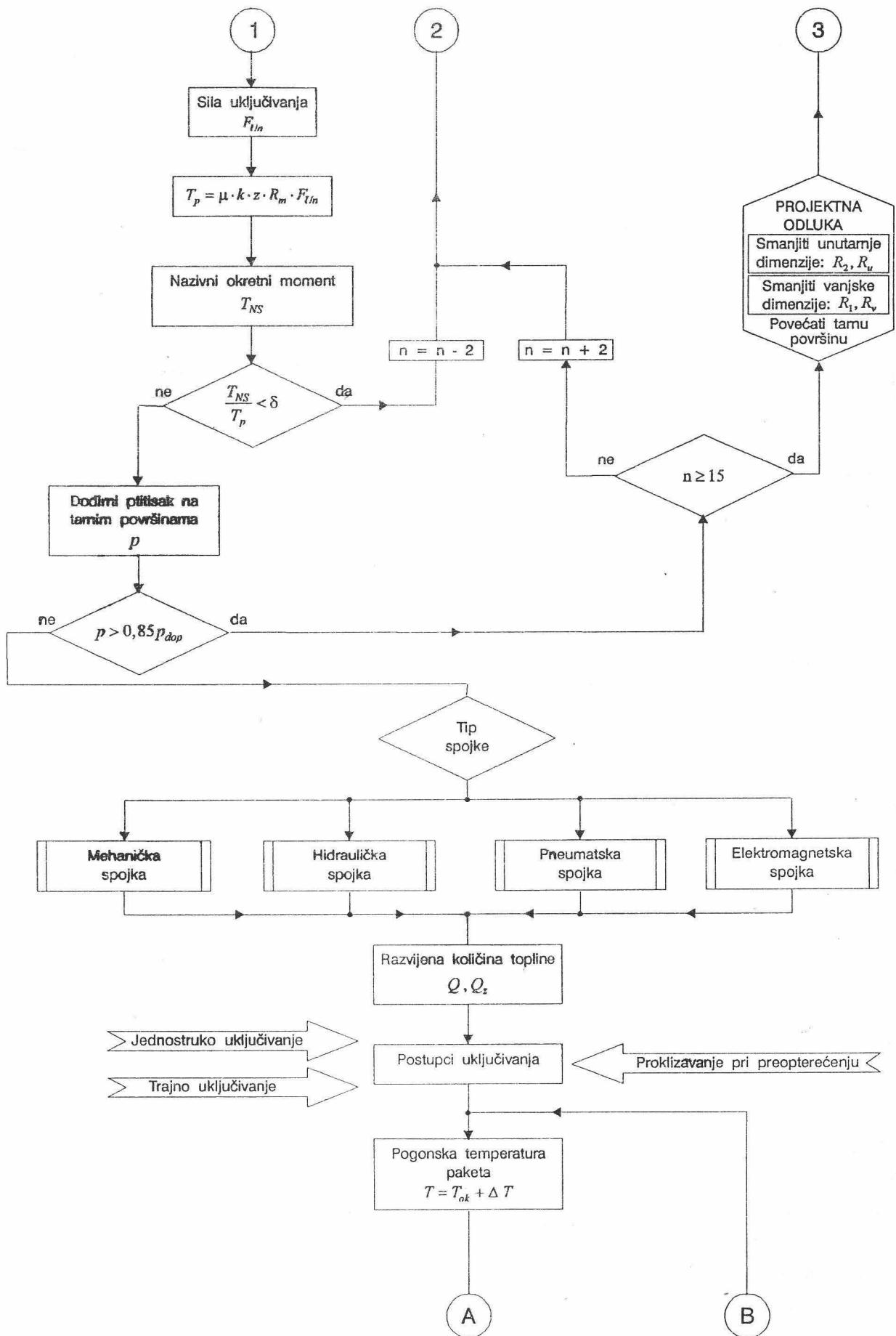
Za nestacionarne pogone kao što su tračna vozila, lokomotive, brodovi, teški kamioni i dr. koriste se hidraulički upravljive lamelne spojke ukomponirane u mehaničke prijenosnike - mjenjače, zbog prijenosa velikih opterećenja malim dimenzijama i masom spojke.

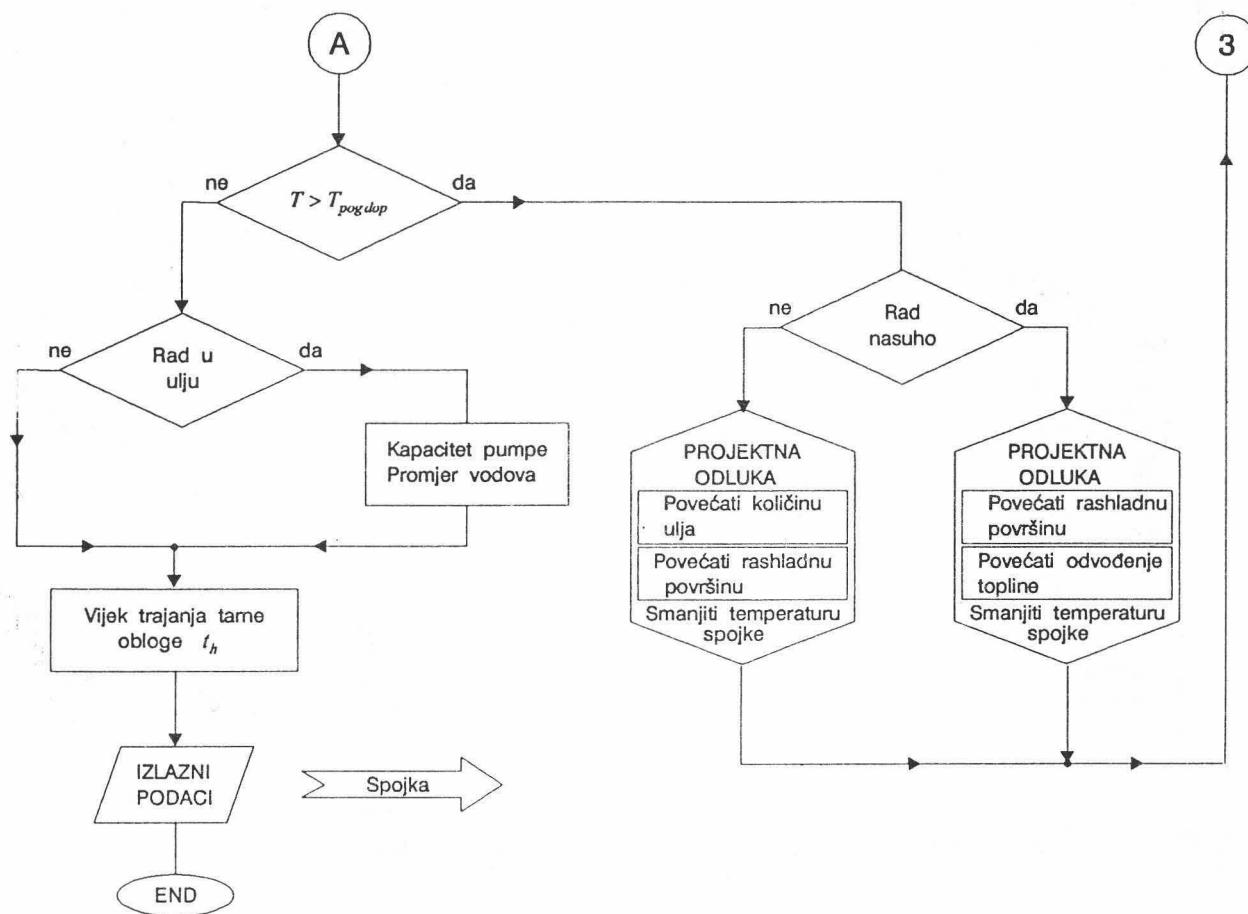
Elektromagnetski upravljive spojke, namjenjene za rad nasuho i za rad u ulju, su uvrstive u potpuno automatski rad stroja uz centralnu izvedbu napojnog organa.

Proračun svih tipova lamelnih spojki u većem svom dijelu je isti, što je vidljivo iz dijagrama toka konstrukcije izuzev proračuna specifičnih dijelova za pojedini tip spojke (objašnjeno u poglavlju za svaki tip).

Tok konstrukcije lamelne spojke





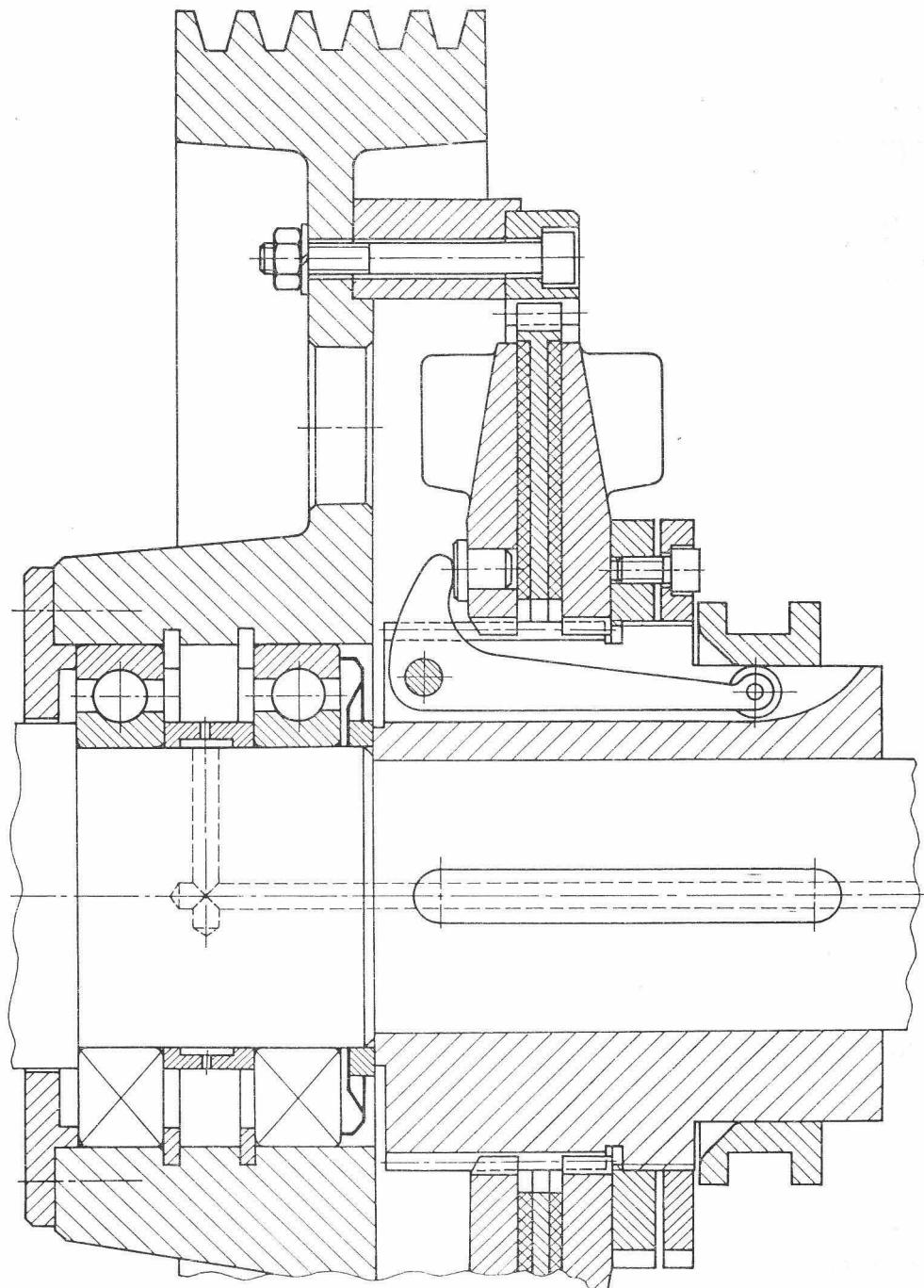


5.1. MEHANIČKI UPRAVLJANA SPOJKA

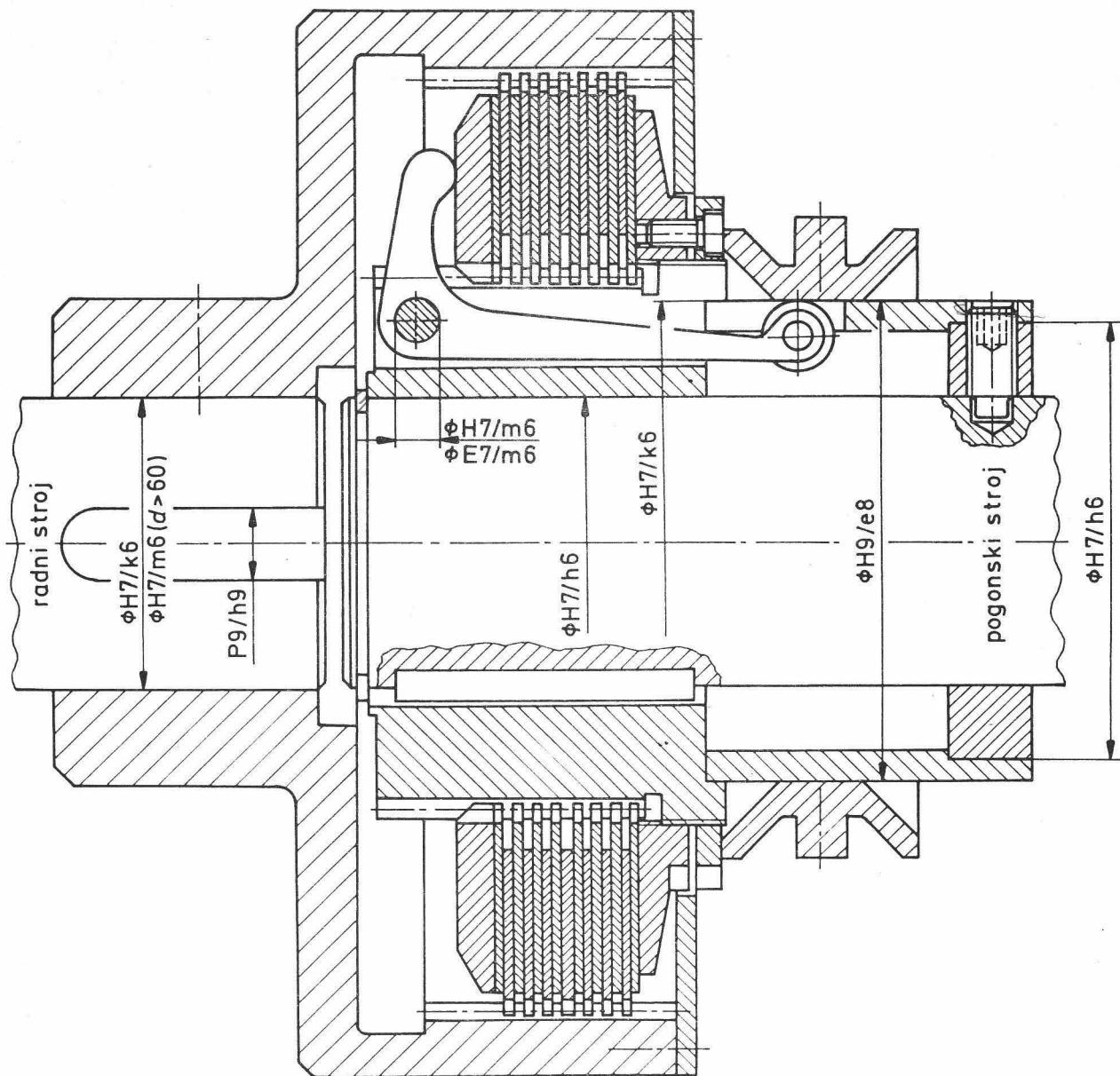
Okretni moment , kako je prethodno navedeno , prenosi se sa pogonske na radnu stranu spojke trenjem , koje je nastalo na tarnim površinama uzdužno pritiskivanih lamela. Kod mehaničkih upravljivih lamelnih spojki (u dalnjem tekstu mehaničke lamelne spojke) potrebna sila za međusobno pritiskivanje lamela postiže se polužnim mehanizmom. Zbog načina izvođenja ručne podloge (slika 20.) ovim spojkama upravlja se direktno na mjestu ugradnje. Ukoliko se želi daljinski upravljati, rad poslužioca zamjenjuje se hidrauličkim ili pneumatskim cilindrom , navojnim vrtenom , ozubljenom letvom ili drugim konstruktivnim rješenjem.

Naročita prednost ovih spojki leži u prijenosu velikih okretnih momenata (do 50000 Nm) pri malim izmjerama lamela, ali s velikim brojem tarnih površina. Poslužioc, ovakvim načinom upravljanja spojkom, radni stroj može uključivati vrlo meko i s osjećajem, a velike rotiriajuće mase polagano ubrzati. Mogu se uključivati i pri suprotnim smjerovima vrtnje pogonske i gonjene strane, a u isključnom stanju imaju vrlo mali moment praznog hoda. U oko 10 % slučajeva ove spojke se izvode za rad u ulju odnosno s podmazivanjem.

Iz gore navedenih razloga upotrebljavaju se u većini industrijskih područja strojogradnje (građevinska mehanizacija, transportna sredstva, alatni strojevi, mala brodogradnja itd.). Razlika JEDNOLAMELNE - jednopločne spojke (slika 15.) od VIŠELAMELNE - višepločne spojke (slika 16.) je u broju ugrađenih lamela; višelamelna spojka može raditi i s podmazivanjem, dok jednolamelna spojka zbog dodatnog hladjenja izvedenim orebrenjem samo nasuho. Sve prikazane spojke su JEDNOSTRUKO djelujuće. DVOSTRUKO djelujuća mehanička lamelna spojka sastoji se od dvije jednostruko djelujuće spojke upravljane jednim polužnim mehanizmom.



Slika 15. Jednolamelna mehanička spojka s prirubnicom za ubrzanje velikih rotacionih masa (preše)

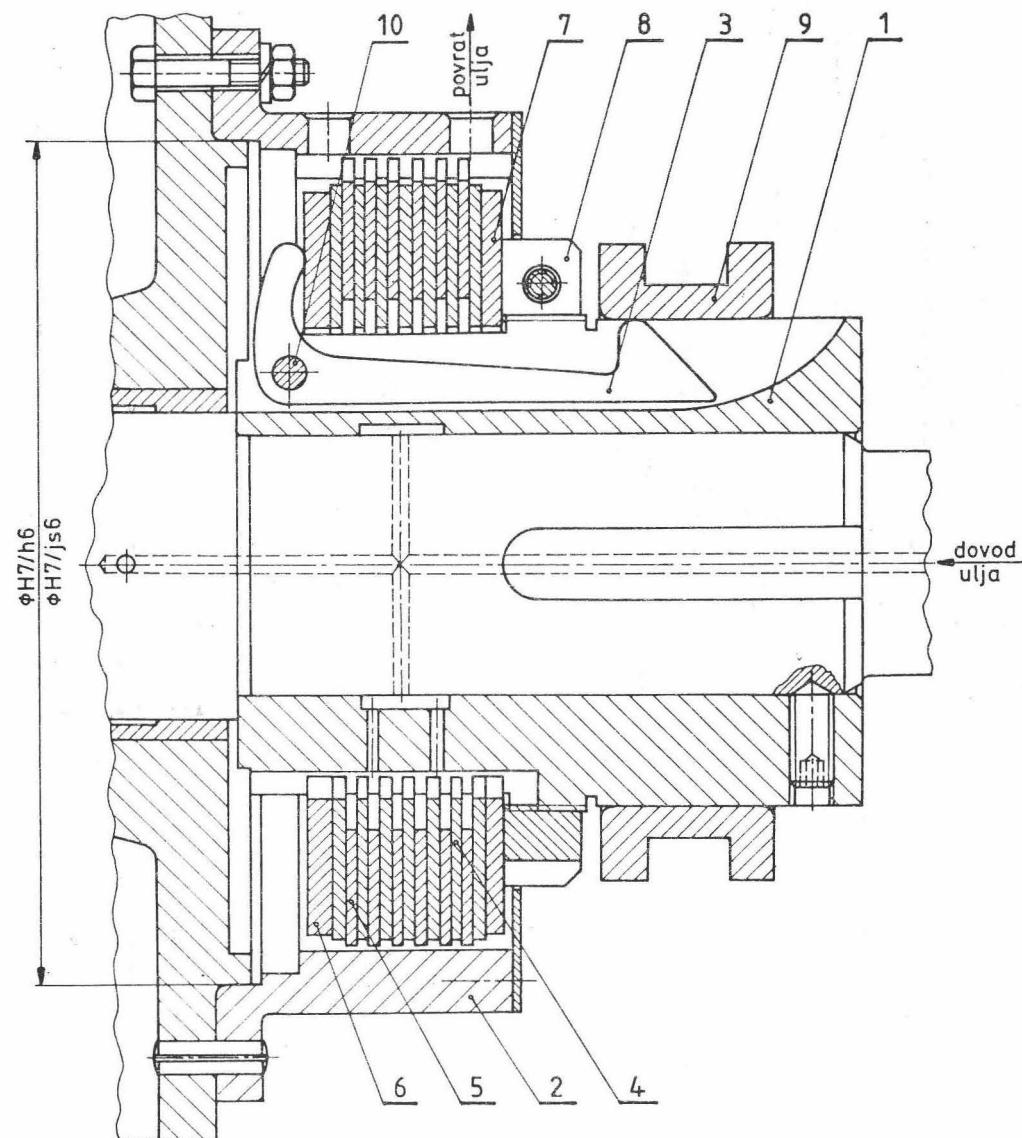


Slika 16. Višelamelna mehanička spojka s glavčinom za dva vratila

5.1.1. PRINCIP RADA

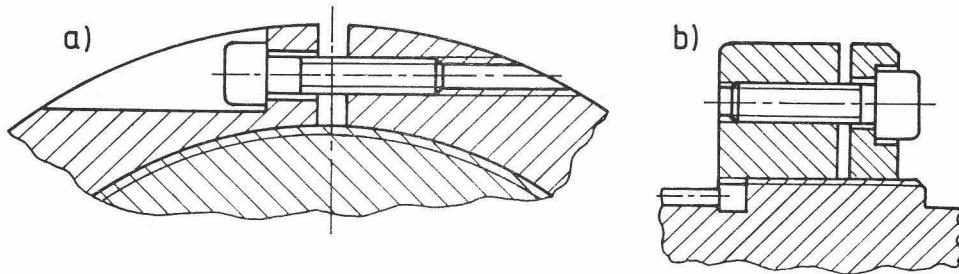
S vratilom (slika 17.) spojeno unutarnje tijelo-glavična (1) preko pera DIN 6885 nosi na svojem vanjskom ozubljenju (DIN 867 ili DIN 5480) ili u utorima unutarnje lamele (4) s odgovarajućim unutarnjim ozubljenjem ili grebenima. Na identičan način spojene su vanjske lamele (5) sa vanjskim tijelom - okrilje (2). Naizmjenično poredane vanjske i unutarnje lamele tvore paket lamela, koji je ograničen s jedne strane pomičnom tlačnom pločom (6) i čeonom pločom - naslon (7) s druge strane, čiji se položaj može podešavati. U kontaktu s čeonom pločom je matica za

podešavanje (8), spojena navojem na unutarnje tijelo, kojom se podešava razmak između lamela odnosno prenosivi okretni moment. U nekim konstrukcijama spojki ($T_{NS} > 1500 \text{ Nm}$) čeona ploča se izostavlja jer njezinu funkciju preuzima matica za podešavanje. Način osiguranja navoja matice za podešavanje od odvrtanja u toku rada prikazan je na slici 18 u zavisnosti od veličine spojke. Na tlačnu ploču naslanja se kraći krak poluge (3) , dok se duži krak naslanja na pomični naglavak (9) u uključenom stanju. Duži krak ima naročito izveden upravljački vrh-nos , koji je kod većih spojki zamijenjen kotačićem. Uzdužnim pomakom naglavka u smjeru matice za podešavanje , nos poluge se pritišće unutra. Zakretanje poluge oko svornjaka (10) , kraći krak poluge pomiče preko tlačne ploče paket lamela k čeonoj ploči odnosno matici za podešavanje. Na taj način postepeno se anulira zračnost između tarnih površina , povećava dodirni pritisak na priljubljenim lamelama , što ima za posljedicu stvaranje sile trenja kojom se prenosi okretni moment tj. spaja pogonska i gonjena strana.



Slika 17. Višelamelna spojka s prirubnicom za rad s podmazivanjem

Odvajanje lamela ostvareno je umetanjem valovitih opruga ili "Sinus"-lamela , koje istovremeno vraćaju polugu u početni položaj pri isključivanju spojke

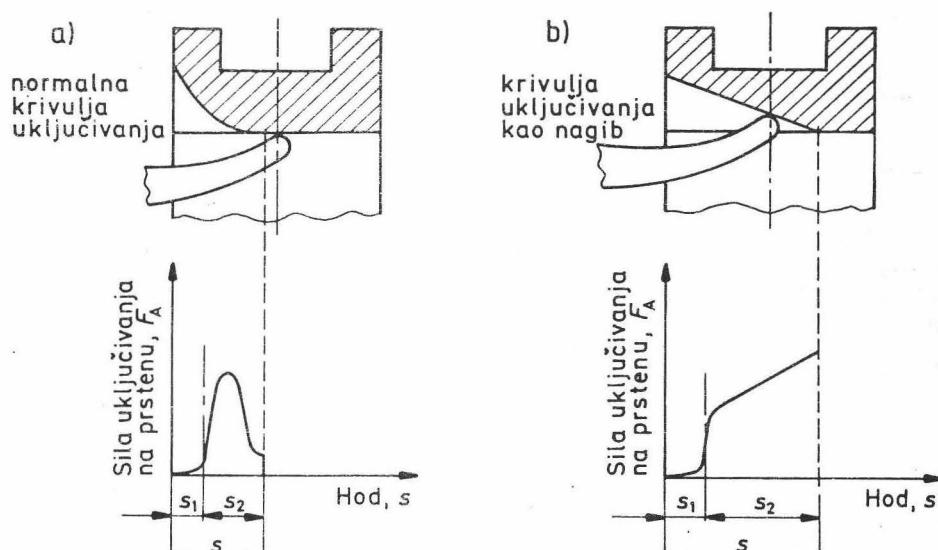


Slika 18. Osiguranje navoja matice za podešavanje od odvrtanja

- a) male spojke ($T_{NS} \leq 1500 \text{ Nm}$)
- b) velike spojke ($T_{NS} > 1500 \text{ Nm}$)

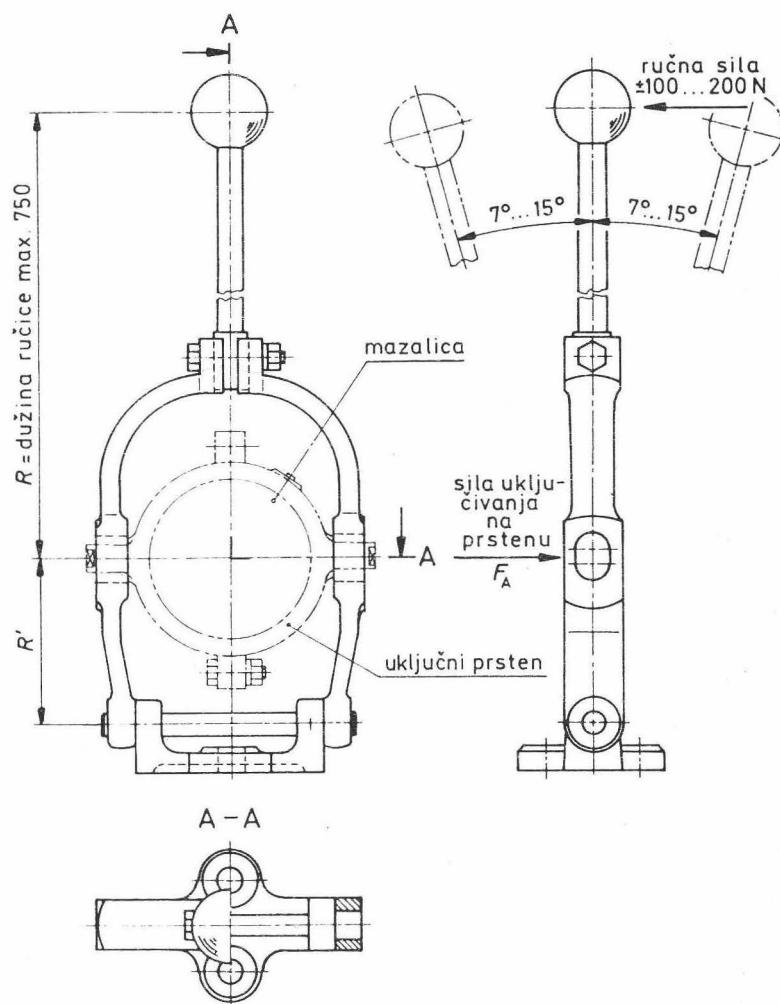
U uključenom stanju za normalni slučaj rada pomični naglavak nadvučen je nad nosom dužeg kraka poluge , čime ga od uzdužnog pomicanja osigurava sila trenja na kontaktnom mjestu (slika 19-a.). Nastaju li na stroju udari ili jake vibracije potrebno je naglavak osigurati od pomicanja , a time i od isključivanja spojke (npr. rasteretnim utorom). Treba li spojku kratkotrajno uključiti i odmah iza toga isključiti (pogon građevinskog stroja , alatnog stroja itd.) naglavak poprima formu prema slici 19-b. Naglavak je izведен s blagom kosinom tj. nos poluge nije podvučen pod cilindričnu površinu pri uključenoj spojci.

Pomicanje naglavka, a time uključivanje i isključivanje spojke obavlja se ručnom polugom (slika 20.) preko dvodjelnog uključnog prstena (slika 21.) smještenog na naglavak spojke. Zbog relativnog klizanja uključnog prstena prema naglavku, uključni prsten izrađuje se iz sivog lijeva, bronce, mjedi ili crvenog lijeva, ali u pogonu spojke potrebno ga je povremeno podmazivati.

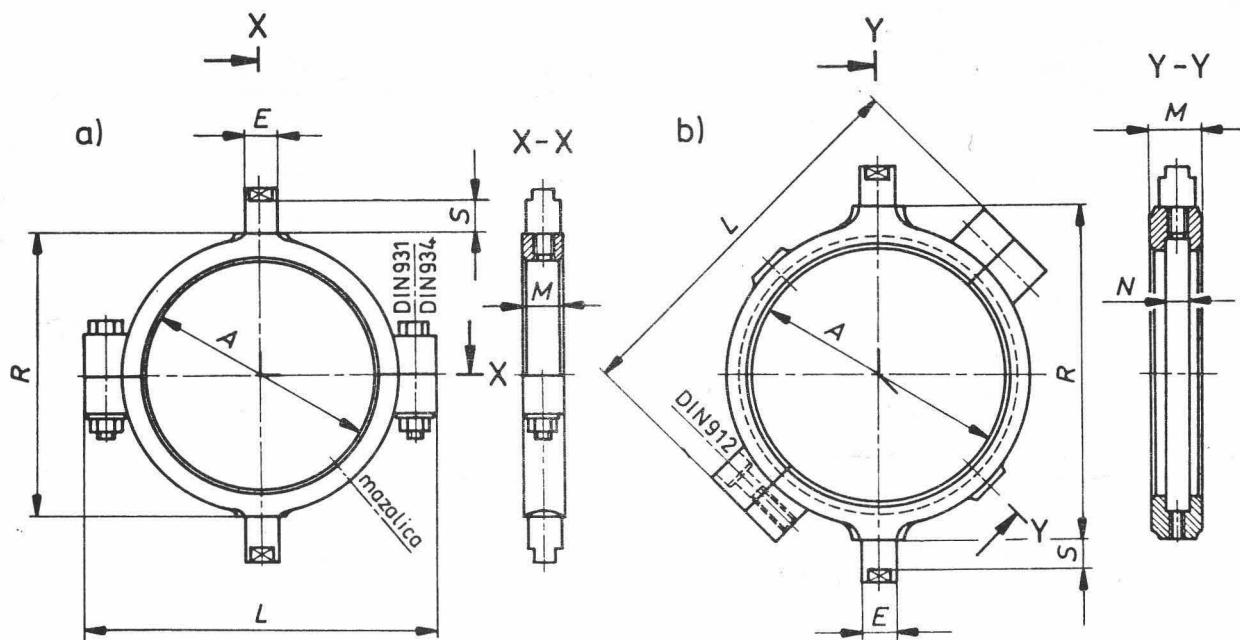


s_1 - stroke for eliminating air space between lamellae and straightening SINUS-lamella or ribbed springs
 s_2 - stroke for elastic deformation (bending) of the lever

Slika 19. Naglavak : a) normalno uključena spojka , b) kratkotrajno uključivanje



Slika 20. Ručna poluga (Fa. Ortlinghaus - Wermelskirchen)



Promjeri mm	Slika a					Slika b							
	A h9	60,5	70,5	85,5	95,5	112	122	146	172	172	207	252	282
E h11	10	10	10	10	20	20	20	20	20	20	25	25	25
L duljine mm	L_{-1}^{+3}	102	109	126	136	181	185	220	270	270	315	365	410
M h9	14	14	14	14	25	26	30	30	30	30	35	45	55
N h9	-	-	-	-	10	15	15	15	15	15	20	25	30
R f9	78	88	105	115	156	152	185	225	225	225	265	310	350
S ${}^0_{+0,5}$	10	10	10	10	20	20	20	20	20	20	25	25	25

Slika 21. Uključni prsten mehaničkih lamelnih spojaka (Fa. Stromag-Unna)

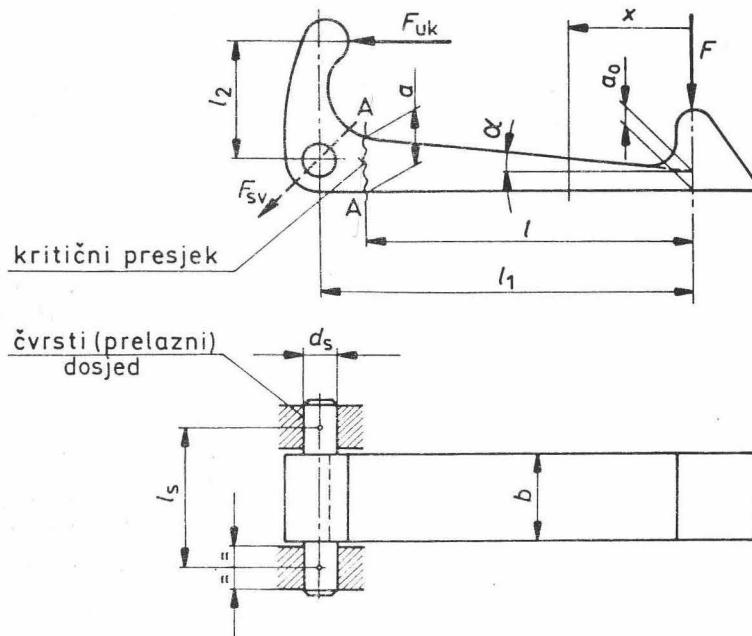
- a) prsten za male spojke
- b) prsten s utorom za velike spojke

5.1.2. PRORAČUN I KONSTRUKCIJA

Osnovni dio proračuna za sve tipove lamelnih spojki (mehaničke, hidrauličke, pneumatske ili elektromagnetske) je isti, kako je prethodno navedeno, izuzev dijela koji slijedi, te kao takav ulazi u glavni proračun. Iz prethodno iznesenih podataka specifični proračun mehaničke spojke svodi se na proračun polužnog mehanizma za uključivanje (poluge, naglavka sa uključnim prstenom i ručne poluge) i njegovo dimenzioniranje.

U raspoloživi prostor unutar spojke (između unutarnje lamele i vratila) smješta se poluga, čiji odnos krakova ovisi o potrebnom razmaku lamela u isključnom stanju,

dimenzionalnoj snošljivosti uz konstrukcionu preporuku da vrh kraćeg kraka poluge pritišće tlačnu ploču na mjestu R_m za male spojke, a za velike spojke na mjestu $< R_m$. Razmak između lamela e uzima se 0,2...0,5 mm kod višelamelnih spojki, a kod spojki s jednom ili dvije lamele 0,5...1 mm. Ako su obloge lamela nemetalne odnosno organske, razmak je 0,5...1 mm za više lamela, a 0,8...1,5 mm za spojku s jednom i dvije lamele. Iz konstrukcije spojke potrebno je orijentaciono odrediti dimenzijske poluge i pripadajućeg svornjaka prema slici 22, sa kojima ulazimo u kontrolni proračun.



Slika 22. Poluga sa svornjakom

Najmanji broj poluga k uzima se 3 (ravnina odredena s tri točke), dok se iznimno mogu izvoditi spojke i s 4 (5) poluga, pri čemu se mora voditi računa o njihovom smještaju unutar spojke. Pri radu s 4 poluge javlja se problem podešavanja ravnomjernog zahvata svih poluga, što ima za posljedicu izradu poluga povećane točnosti dimenzija ili uparivanje poluga.

Analizom sila na polugi dobiva se sila kopčanja na jednu polugu $F_{uk} = F_{Un} / k$, a iz odnosa krakova poluge sila na nosu-kotačiću $F = F_{uk} \cdot l_2 / l_1$.

Naprezanje na savijanje u kritičnom presjeku (mjesto prelaska ravne linije u radijus) poluge iznosi:

$$\sigma_s = \frac{M_s}{W_{A-A}} = \frac{6 \cdot F \cdot l}{b \cdot a^2} < \sigma_{sdop} = \frac{Re(R_{p0,2})}{3 \dots 4}$$

Za izradu poluga koristi se najčešće opći konstrukcioni čelik (Č 0545, Č 0645, Č 0745) ili čelik za poboljšanje (Č 1330, Č 1530, Č 4130 ili Č 4730).

Svornjak oko kojeg se okreće poluga (labavi dosjed) opterećen je rezultantom sila koje djeluju na polugu: $F_{sv} = \sqrt{F_{uk}^2 + F^2}$

Svornjak je opterećen na savijanje i na dodirni pritisak:

$$\sigma_s = \frac{M_s}{W_s} = \frac{F_{sv} \cdot \frac{ls}{8}}{\frac{\pi \cdot d_s^3}{32}} < \sigma_{sdop}$$

$$p = \frac{F_{sv}}{d_s \cdot b} < p_{dop} = 10 \dots 15 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Elastična izvedba pluge sprečava povećano opadanje prenosivog okretnog momenta pri trošenju obloga lamela i omogućuje naknadno samopodešavanje spojke u dužim vremenskim razmacima. Deformaciju poluge od sile F na nosu poluge teško je točno odrediti računski, te se takav složeni profil zamjenjuje gredom promjenjive visine (linearna zavisnost), konstantne debljine, uklještene u presjeku A-A i opterećene silom F (slika 22.).

Deformaciju (progib) grede dobivamo iz slijedeće diferencijalne jednadžbe:

$$\frac{d^2w}{dx^2} = -\frac{M_s}{EI}$$

Moment savijanja: $M_s = -F \cdot x$

$$\text{Moment inercije: } I = \frac{b \cdot [a(x)]^3}{12} = \frac{b \cdot (a_0 + x \cdot \tan \alpha)^3}{12}$$

Konačni izraz za deformaciju (progib) ispod sile F tj. na mjestu $x = 0$ dobiva se rješavanjem gornje diferencijalne jednadžbe:

$$w = \frac{12 \cdot F}{E \cdot b \cdot \tan^2 \alpha} \left\{ \frac{1}{\tan \alpha} \cdot \ln a_0 + \frac{a_0}{6 \cdot \tan \alpha} - I \cdot \left[\frac{1}{l \cdot \tan \alpha + a_0} - \frac{a_0}{2 \cdot (l \cdot \tan \alpha + a_0)^2} \right] + \frac{1}{\tan \alpha} \cdot \ln(l \cdot \tan \alpha + a_0) - \frac{a_0}{6 \cdot \tan \alpha \cdot (l \cdot \tan \alpha + a_0)} \right\} \text{ [mm]}$$

Progib w preko odnosa krakova poluge odgovara duljini hoda matice za podešavanje $w' = w \cdot l_2 / l_1$. Navoj matice za podešavanje izvodi se kao fini navoj uspona $P = 1 \dots 1,5$ (2) mm, te ako se matica zaokrene za jedan okret (360°), sila na kraćem kraku poluge na čelnoj lameli n tj. sila kopčanja F_{uk} poraste u odnosu: $F_{uk} / F'_{uk} = w' / P$ i ona iznosi: $F'_{uk} = F_{uk} \cdot P / w'$. Analizom sila kopčanja dobiva se da je $F'_{uk} >> F_{uk}$, što ima za posljedicu povećanje naprezanja u polugi i svornjaku iznad dopuštene vrijednosti.

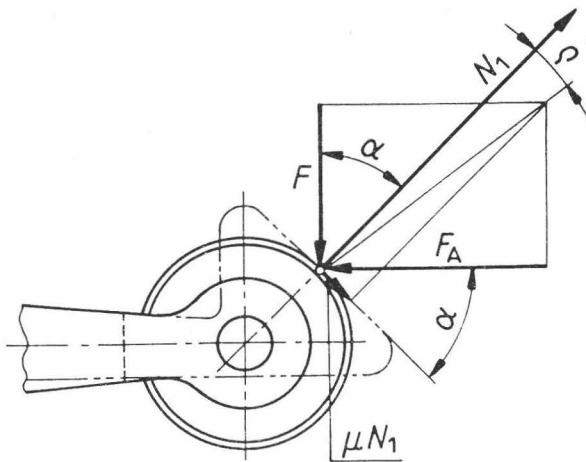
U praksi se matica za podešavanje nikad ne zaokrene za puni krug, već za kut $\varphi \approx (50^\circ) 10^\circ \dots 15^\circ$, te sila kopčanja po jednoj poluzi poraste za iznos: $\Delta F_{uk} = F'_{uk} \cdot \varphi / 360^\circ$. Stoga je potrebno kontrolirati čvrstoću poluge kod povećanog naprezanja izazvanog stupnjem podešavanja. Kod stupnja podešavanja od ΔF_{uk} naprezanje u poluzi poraste na vrijednost:

$$\sigma_s' = \sigma_s + \frac{\Delta F_{uk}}{F_{uk}} \cdot \sigma_s = \sigma_s \cdot \left(1 + \frac{\Delta F_{uk}}{F_{uk}} \right) \leq \sigma_{sdop}$$

Potrebna ručna sila F_A za uključivanje spojke na naglavku odnosno prstenu za kopčanje dobiva se iz uvjeta ravnoteže sila na nosu - kotačiću poluge (slika 23.):

$$N_I \cdot \cos \alpha - F - \mu \cdot N_I \cdot \sin \alpha = 0$$

$$N_I \cdot \cos \alpha - F + \mu \cdot N_I \cdot \sin \alpha = 0$$



Slika 23. Sile na nosu - kotačiću poluge

Sredivanjem gornjih izraza dobiva se:

$$F = N_I \cdot (\cos \alpha - \mu \cdot \sin \alpha)$$

$$F_A = N_I \cdot (\cos \alpha + \mu \cdot \sin \alpha)$$

odnosno sila po jednoj polugi:

$$F_A = \frac{F \cdot (\sin \alpha + \mu \cdot \cos \alpha)}{\cos \alpha - \mu \cdot \sin \alpha} = F \cdot \frac{\tan \alpha + \mu}{1 - \mu \cdot \tan \alpha} = F \cdot (\tan \alpha + \mu)$$

Najčešće se spojke izvode s 3 poluge i kut nagiba kosine nosa naglavka $\alpha = 45^\circ$ i $\mu = 0,1$ proizlazi ukupna sila uključivanja na prstenu:

$$F_A' = k \cdot F_A \cdot (\tan \alpha + \mu) = 3,3 \cdot F_A$$

Iz ergonomskih uvjeta sila $F_{ručna}$ na vrhu poluge uzima se 100...200 N, a u vjetom ravnoteže ručne poluge (slika 20.) dobiva se potrebna dužina ručice:

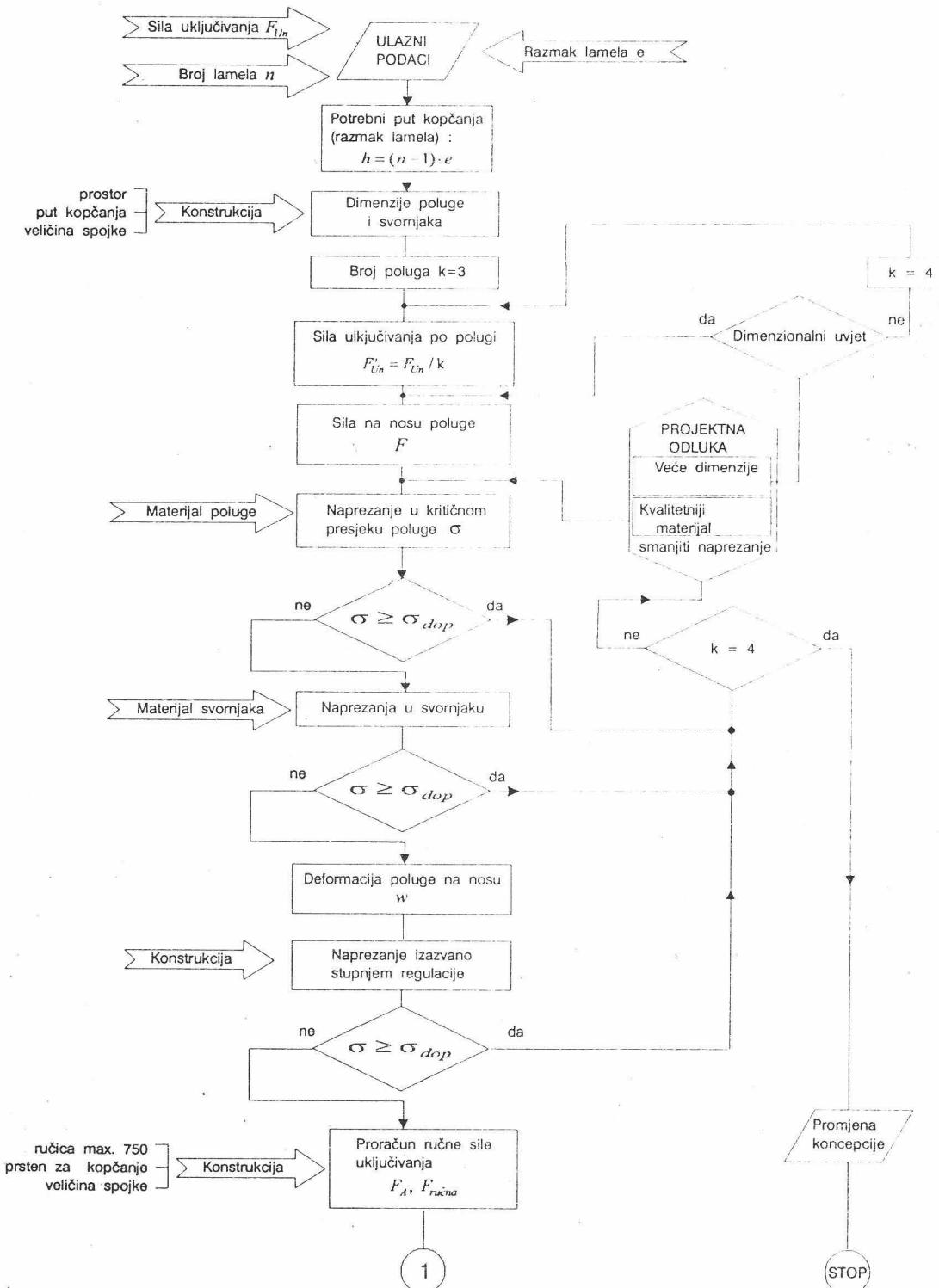
$$F_A' \cdot R' = F_{ručna} \cdot R$$

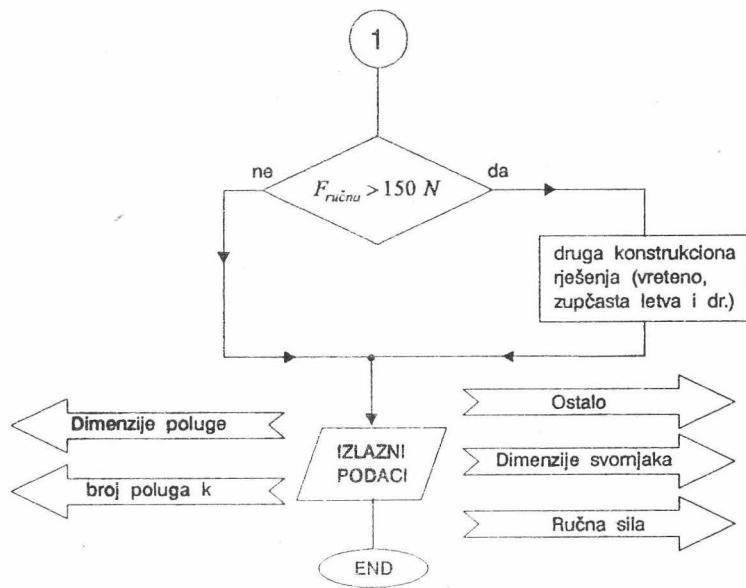
$$R = \frac{F_A' \cdot R'}{F_{ručna}} \leq R_{dop} = 750 \text{ mm}$$

Kod spojka za prijenos velikih momenata, ali nedovoljnog prostora za rukovanja kod poluga dužih od 750 mm, mogu se upotrijebiti druga konstruktivna rješenja (vreteno, hidraulički ili pneumatski cilindar i dr.) čime povećavamo silu na vrhu poluge.

Tok konstrukcije i proačuna za mehaničku spojku slijedi u nastavku, te kao takav ulazi u glavni poračun lamelnih spojki.

Mehanička spojka:

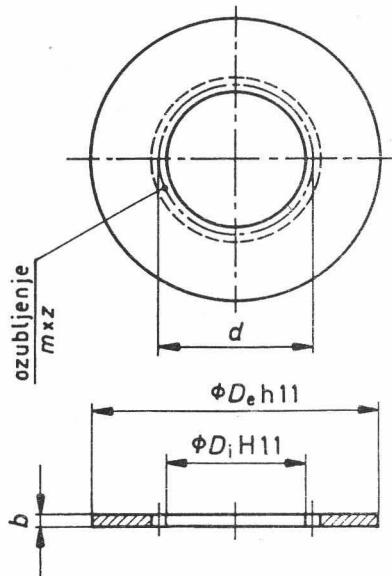




TABLICA LAMELA (prema Fa. Ortlinghaus Wermelskirchen)

"Sinus"-unutarnja čelična lamela s grebenima

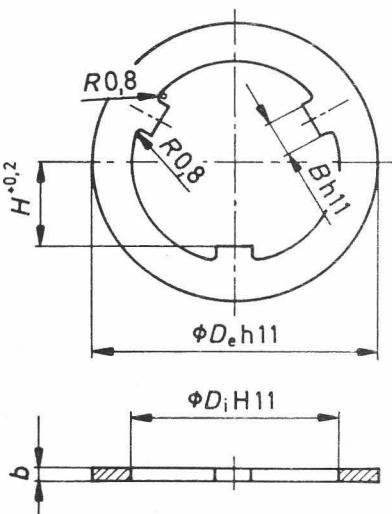
TIP: 1-100-..



Oznaka veličine	D _e	D _i	H	B	b	Broj grebena	SINUS-visina
07	54	33,2	13,5	8	1		0,25
11	67	48,2	19,6				0,16
15	78	58,2	24,4				0,18
19	88	65,2	27,9				0,25
23	98	70,2	30,1				0,2
25	110	70,2	30,1				0,25
27	108	75,2	32,6				0,3
31	123	82,2	36,1	11,75			
35	132	92,2	41,1				
39-1			45,1	9,75			0,35
39-2	141	100,2	47,1			6	
43-1			50,1			3	
43-2	162	112,2	53,6	11,75			
47	178	129,2	57,6			6	0,4

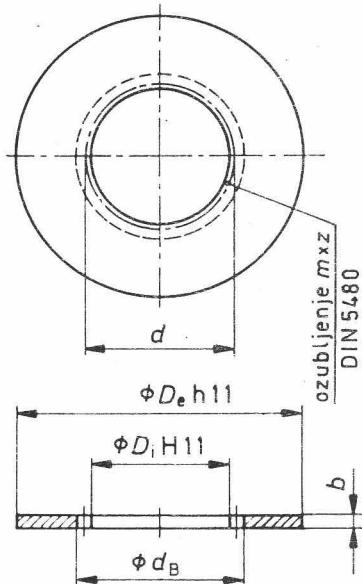
"Sinus"-unutarnja čelična lamela s ozubljenjem

TIP: 1-200-..



Oznaka veličine	DIN	Ozubljenje			D _i	D _e	b	SINUS-visina
		Zxm	xm	d				
11	5480	24x2	+0,1	48	46	67	1	0,12
15		28x2	+0,1	56	54	77		0,15
23		22x3	-0,35	66	64	95		
25		24x3	+0,15	72	69	100	1,2	
27		24x3	+0,15	72	69	108		0,2
31		26x3	-0,35	78	76	123	1,45	0,15
32		21x4	-0,8	84	82	123		0,3
39		38x2,5	-	95	90	141		0,35
43		44x2,5	-	110	105	162	2,3	
47		41x3	-	123	119	178		0,4
51	867	45x3	-	135	130	195		0,35
55		48x3	-	144	140	225		0,4
59		55x3	-	165	160	250	3	0,45
63		60x3	-	180	175	270		0,25
66		65x3	-	195	190	300		
69		52x4	-	208	204	318	3,5	0,3
72		61x4	-	244	238	342		
75		68x4	-	272	268	380	4	
78		60x5	-	300	295	428		0,35
81		72x5	-	360	355	518	5	0,4
84		70x6	-	420	412	575		
87		75x6	-	450	442	665		
90		83x6	-	498	490	742	6	0,5
92		100x6	-	600	592	903	7	

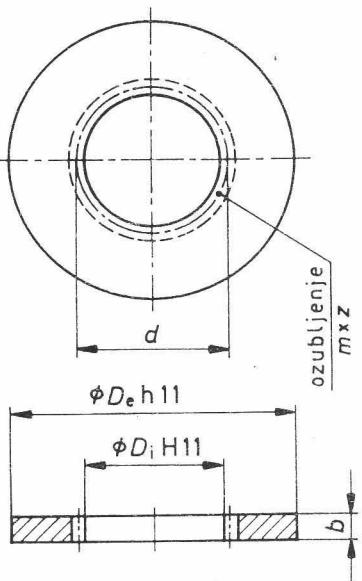
"Sinus"-unutarnja čelična lamela s ozubljenjem po DIN 5480
TIP: 1-300-..



Oznaka veličine	Ozubljenje			D	D _i	b	SINUS- visina
	d _B *xmz	xm	d				
15	145,5x3x48	+0575	67,5	85	65	1	0,12
23	80x2x39	-0,1	78	100	76,4	1,2	0,12
27	88x2x42	-0,9	84	111	84	1,2	0,18
32	102,4x2x51	+0,9	102	126	98,4	1,45	0,18
39	114,4x2x57	+0,9	114	141	110,4	2	0,25
43	130x3x42	-0,35	126	162	124	2	0,25
47	145,5x3x48	+0,9	144	178	139,5	2,3	0,3
51	159x3x51	-1,35	153	195	153	2,5	0,3
55	183x3x60	+0,15	180	225	177	3	0,35
59	196x4x48	+0,2	192	245	188	3	0,35
63	220x4x54	+0,2	216	275	212	3	0,4
66	245x4x60	-0,3	240	300	237	3,5	0,4
69	261x4x63	-2,3	252	321	253	3,5	0,45
72	287x5x54	-2,25	270	348	270	4	0,45
75	311,5x5x60	-3	300	380	301,5	4,5	0,5
78	351x5x69	-0,25	345	428	341	5	0,55
79	385x5x75	-2,25	375	472	375	5,5	0,6
81	429x5x84	-1,75	420	524	419	6,5	0,65

*)d_B=podnožni promjer glavčine d_f

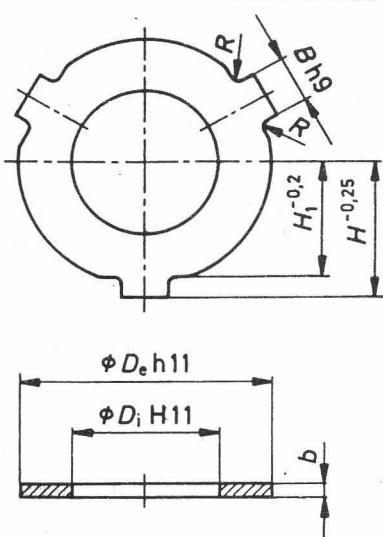
Unutarnja lamela s ozubljenjem po DIN 867 iz perlitnog lijeva
TIP: 1-400-..



Oznaka veličine	Ozubljenje		D _i	D _e	b
	zxm	d			
47	41x3	123	119	178	6
55	48x3	144	140	225	8
63	60x3	180	175	270	12
69	52x4	208	204	318	
75	68x4	272	268	280	
78	60x5	300	295	428	
81	72x5	360	355	518	18
84	70x6	420	412	575	20
86				665	
90	83x6	498	490	742	
96	87x8	696	680	1000	25

Vanjska čelična lamela s grebenima

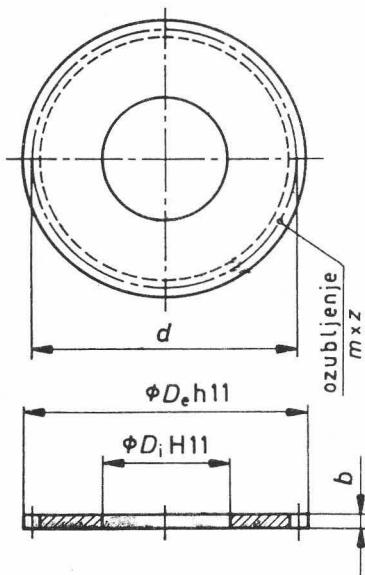
TIP: 2-100-..



Oznaka veličine	D _e	D _i	B	H	H ₁	b	R	Broj grebena
07	54,5	34	10	31	25,8	1	1,45	3
11	69,8	50	12	38,5	33,3			
15	79,8	60	12	44	38,3			
19	89,8	68	12	49,5	43,3			
23-1								
23-2	100	72	12	55	48,5			
25	111,5	72	19	61	53,8			
27	109,8	78	12	61	53,2			
31	124,8	84	12	68,5	61			
35	134,8	95	12	73,5	65,9			
39	144,5	102	19,7	78,5	70,5		1,8	4
43	164,5	118	19,7	88,5	80,5			
47	181,5	132	19,7	97	89			

Vanjska čelična lamela s ozubljenjem po DIN 867 i spiralnim kanalima

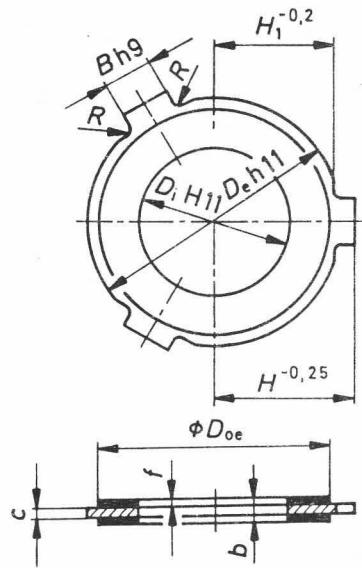
TIP: 2-200-..



Oznaka veličine	Ozubljenje			D _e	D _i	b
	zxm	xm	d			
31	32x4*	+0,8	128	133,2	92	1,45
39-1	36x4*	+1,8	144	151,2	102	
39-2	60x2,5	-	150	153	102	
43	68x2,5	-	170	173	118	1,8
47	62x3	-	186	188	132	
51	68x3	-	204	208	145	
55	78x3	-	234	236	155	
59	88x3	-	264	268	175	2,3
63	95x3	-	285	287	189	
66	105x3	-	315	320	205	2,5
69	84x4	-	336	340	220	
72	90x4	-	360	365	255	3,5
75	100x4	-	400	404	285	
78	90x5	-	450	455	315	4
81	108x5	-	540	545	375	
84	100x6	-	600	605	440	5
86	115x6	-	690	695	520	
90	128x6	-	768	775	520	6

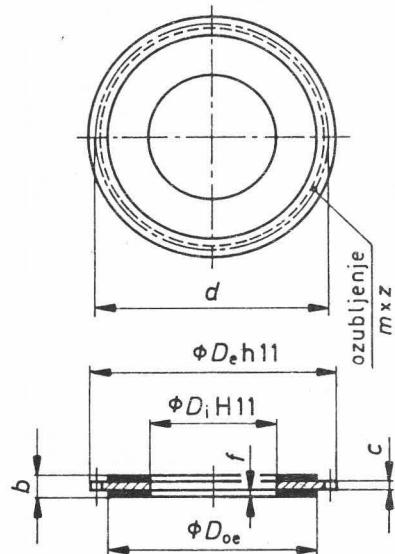
*) ozubljenje po DIN 5480

Vanjska lamela sa sinteroblogom i s grebenima, za rad nasuho
TIP: 2-300-..



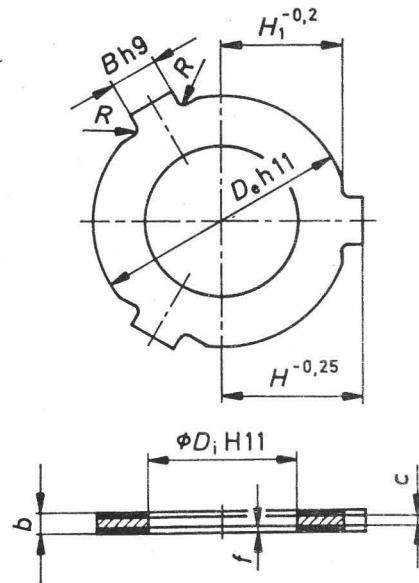
Oznaka veličine	D _e	D _{oe}	D _i	b	c	f	B	H	H ₁	R	Broj greb.
11	69,8	65	50	2,2	1,2	0,5		38,5	33,3		3
15	79,8	76	60				12	44	38,3		8
23	100	96	72	2,4		≈0,5		55	48,5		
25-1		107	78	2,2		≈0,4	19	61	53,8		
25-2	111,5	108	72					12	68,5	61	
31	124,8	121	84		1,45	≈0,5		78,5	70,5		
39	144,5	139	102		2,4		19,7	88,5	80,5		
43	164,5	160	118					97	89		
47	181,5	176	132					107	97,5		
51	199,5	193	145	3,5	2	0,75					8

Vanjska lamela sa sinteroblogom s ozubljenjem
TIP: 2-400-..



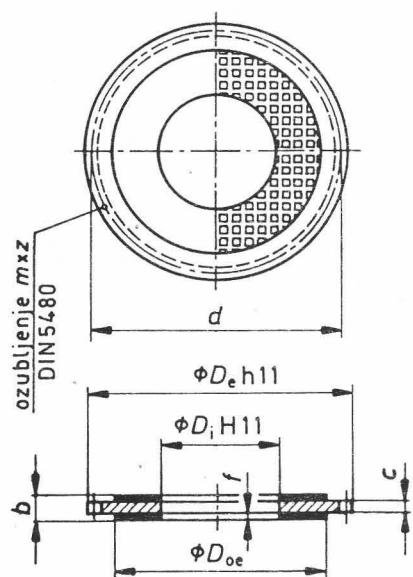
Oznaka veličine	Ozubljenje			D _e	D _{oe}	D _i	b	f	c
	DIN	zxm	xm						
11	5480	24x3	-0,15	72	74,4	66	52	1,8	0,4
15		27x3	+0,35	81	84,4	76	58,5		1
23		25x4	+0,148	100	104,2	94	72	2	1,2
25		26x4	+0,8	104	109,2	98	77		
27		28x4	+0,8	112	117,2	106	78		
31		32x4	+0,8	128	133,2	121	92		
39		36x4	+1,8	144	151,2	139	102	2,4	≈0,5
43	867	68x2,5	-	170	173	160	118		
47		62x3	-	186	188	176	132		
51		68x3	-	204	208	193	145	3,5	2
55		78x3	-	234	236	223	155		
59		88x3	-	264	268	248	175		
63		95x3	-	285	287	268	189		
66		105x3	-	315	320	298	205		
69		84x4	-	336	340	316	220	5	
72		90x4	-	360	365	340	255		3,5
75		100x4	-	400	404	378	285	5,5	
78		90x5	-	450	455	426	315	7	
81		108x5	-	540	545	516	375	8	
84		100x6	-	600	605	573	440		1
86		115x6	-	690	695	663	470		5
90		115x6	-	768	775	740	520	10	6
92		132x7	-	924	930	900	625	11	7

Vanjska lamela sa sinteroblogom i grebenima
TIP: 2-500-..



Oznaka veličine	D _e	D _i	B	H	H ₁	b	c	f	R	Broj grebena
07	54,5	34	10	31	25,8					3
11	69,8	50		38,5	33,3					
15	79,8	60		44	38,3					
19	89,8	68		49,5	43,3					
23	100	72		55	48,5					
25	111,5	72	19	61	53,8					
27	109,8	78		61	53,2					
31	124,8	84	12	68,5	61					
35	134,8	95		73,5	65,9	1,8	1,2	0,3		
39	144,5	102		78,5	70,5					
43	164,5	118	19,7	88,5	80,5	1,9	1,2	0,35	≈1,5	
47	181,5	132		97	89					6

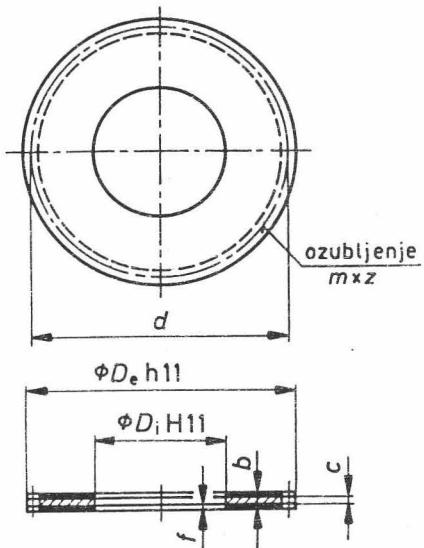
Vanjska lamela sa sinteroblogom s ozubljenjem po DIN 5480, za rad u ulju
TIP: 2-600-..



Oznaka veličine	Ozubljenje			D _e	D _{oe}	D _i	b	f	c
	d _B *xm*xz	xm	d						
15	90x1,5x60	-0,825	90	89,7	83	70	1,7	0,35	1
23	106x2x51	+0,9	102	105,6	98	82	1,7	0,35	1
27	119x3x39	-0,65	117	118,4	109	90	2	0,4	1,2
32	134x3x44	-0,65	132	133,4	124	104	2,2	0,38	1,45
39	152x4x36	+1,8	144	151,2	139	116	2,4	0,48	1,45
43	172x4x42	-0,2	168	171,2	160	132	2,8	0,5	1,8
47	190x5x36	+2,25	180	189	176	147	3	0,6	1,8
51	207x5x39	+3,25	195	206	193	161	3,5	0,6	2,3
55	237x5x45	+3,25	225	236	223	185	3,7	0,6	2,5
59	257x5x51	-1,75	255	256	243	198	4	0,75	2,5
63	287x5x57	-1,75	285	286	273	223	4,5	0,85	2,8
66	315x6x51	+1,2	306	313,8	298	248	4,5	0,85	2,8
69	334x6x54	+1,7	324	332,8	319	163	5	0,85	3,3
72	363x6x60	-1,8	360	361,8	346	285	5	0,85	3,3
75	400x8x48	+3,6	384	398,4	378	315	5,5	0,85	3,8
78	448x8x54	+3,6	432	446,4	426	355	6,5	1	4,5
79	492x8x60	+1,6	480	490,4	470	390	7	1	5
81	544x8x66	+3,6	528	542,4	522	432	7	1	5

*) d_B=podnožni promjer df kućišta

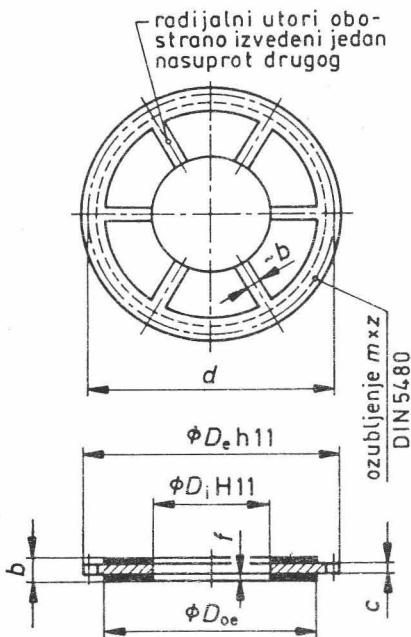
Vanjska lamela sa sinteroblogom sa ozubljenjem po DIN 867
TIP: 2-700-..



Oznaka veličine	Ozubljenje			D_e	D_i	b	c	f
	$z \times m$	xm	d					
31	32x4*	+0,8	128	133,2	92	1,5	0,9	
39-1	36x4*	+1,8	144	151,2	102	1,8		0,3
39-2	60x2,5	-	150	153	102	1,8		
43	68x2,5	-	170	173	118	1,9		
47	62x3	-	186	188	132	1,9		
55	78x3	-	234	236	155	2,3	1,5	0,4

*) ozubljenje po DIN 5480

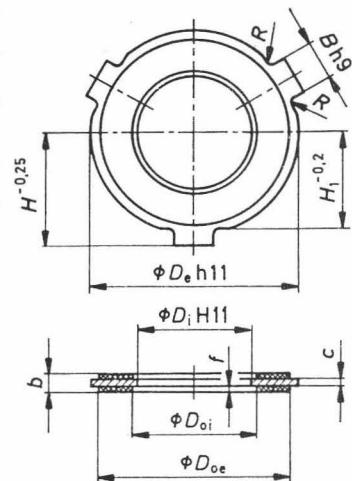
Vanjska lamela s organskom oblogom (bez azbesta) sa radijalnim utorima, za rad nasuho
TIP: 2-800-..



Oznaka veličine	Ozubljenje			D_e	D_{oe}	D_i	b	f	c
	$d_B \times xmz$	xm	d						
15	90x1,5x60	-0,825	90	89,7	83	70	2,3	0,65	1
23	106x2x51	+0,9	102	105,6	98	82	2,3	0,65	1
27	119x3x39	-0,65	117	118,4	109	90	2,7	0,75	1,2
32	134x3x44	-0,65	132	133,4	124	104	3	0,78	1,45
39	152x4x36	+1,8	144	151,2	139	116	3,4	0,98	1,45
43	172x4x42	-0,2	168	171,2	160	132	3,9	1,05	1,8
47	190x5x36	+2,25	180	189	176	147	4,2	1,2	1,8
51	207x5x39	+3,25	195	206	193	161	4,8	1,25	2,3
55	237x5x45	+3,25	225	236	223	185	5,2	1,35	2,5
59	257x5x51	-1,75	255	256	243	198	5,6	1,55	2,5
63	287x5x57	-1,75	285	286	273	223	6,3	1,65	3
66	315x6x51	+1,2	306	313,8	298	248	6,3	1,65	3
69	334x6x54	+1,7	324	332,8	319	163	7	1,75	3,5
72	363x6x60	-1,8	360	361,8	346	285	7	1,75	3,5
75	400x8x48	+3,6	384	398,4	378	315	7,8	1,9	4
78	448x8x54	+3,6	432	446,4	426	355	9	2,25	4,5
79	492x8x60	+1,6	480	490,4	470	390	10	2,5	5
81	544x8x66	+3,6	528	542,4	522	432	10	2,5	5

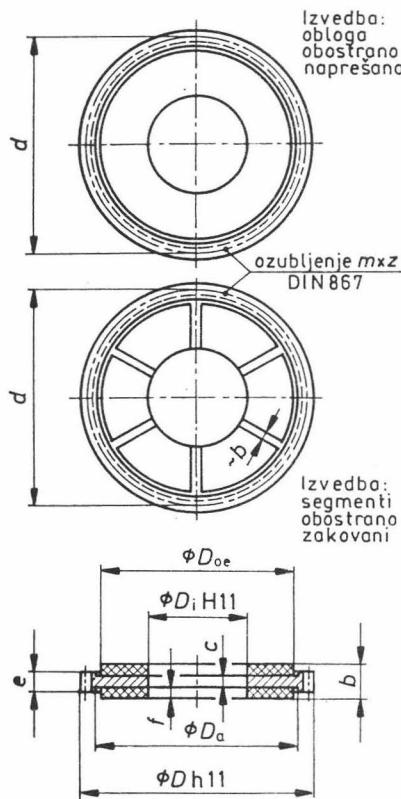
*) d_B = podnožni promjer d_f kućišta

**Vanjska lamela s organskom oblogom (bez azbesta) i grebenima
TIP: 2-900-..**



Ozn. vel.	D _e	D _{oe}	D _{oi}	D _i	b	c	f	B	H	H ₁	R	Br. gr.
11	69,8	67	52	50	3,2	1,2	1		38,5	33,3		3
15	79,8	77	62	60				12	44	38,3		8
23	100	97		74	72	3,4			55	48,5		
25-1		111,5	108				≈1	19	61	53,8		
25-2				80	80	3	≈0,75					
31	124,8	121	86	84	3,4	1,45	≈1	12	68,5	61		
39	144,5	141	104	102	4,5	1,45	≈1,5		78,5	70,5		
43	164,5	161	120	118	5	2	1,5	19,7	88,5	80,5		15

**Vanjska lamela s organskom oblogom (bez azbesta) s ozubljenjem po DIN 867 za rad nasuho
TIP:1-1000-..**



Ozn. veli.	Ozubljenje			D _e	D _a	D _{oe}	D _i	b	c	e	f	Br. seg.	
	zm	xm	d										
31	32x4*)	+0,8	128	133,2	—	121	84	3,4	1,45	1,45	≈1	—	
39-1	36x4*)	+1,8	144	151,2	—	140	102	4,5	1,45	1,45	≈1,5	—	
39-2	60x2,5	—	150	153	—			5,5	2,5	2,5	1,5	—	
43	68x2,5	—	170	173	—	161	118	5	1,8	1,8	1,6	—	
47	62x3	—	186	188	—	176	132	5,5	2,5	2,5	—	—	
55	78x3	—	234	236	—	225	155	6	3	3	1,5	—	
59	88x3	—	264	268	—	250	175	6	3	3	—	12	
63-1				273		270	189	15	5	12	5	8	
63-2	95x3	—	285	287	—			6	3	3	1,5	—	
69-1				321		318	220	18	6	12	6	8	
69-2	84x4	—	336	340	—			9	4	4	2,5	—	
75-1				384		380	285	21	6	12	7,5	12	
75-2	100x4	—	400	404	—			11	3	10,5	4	16	
78-1				455		431	315	24	8	15	8	12	
78-2	90x5	—	450	455	—			11	3	10,5	4	16	
81-2	108x5	—	540	545	521	518	375	26	10	18	8		
81-2								15	5	14,5	5		
84-1	100x6	—	600	605	578	575		30	10	20	10		
84-2								15	5	14,5	5		
86-1	115x6	—	690	695	668	665		30	10	20	10		
86-2								15	5	14,5	5		
90-1				768	775	746	742	35	15	25	10		
90-2	128x6	—						15	5	14,5	5		

*) Ozubljenje po DIN 5480