

ženje silama F_3 , na torzijsko smicanje silama F_4 , a pri odgovarajućoj ugradnji (npr. na gumenu osovinu) i na torziju.

Proračunavanje gumenih opruga. U opruge opterećene na tlak ili na vlak ugrađuju se najčešće gumeni blokovi prema sl. 106. Formule za proračun zasnovane su na elementarnim postavkama iz nauke o čvrstoći, te glase:
Nosivost opruge

$$F = A \sigma,$$

deformacija (kontrakcija ili elongacija)

$$f = \frac{FL_0}{AE_m} = \frac{\sigma L_0}{E_m},$$

rad opruge (v. sl. 102, površina zatvorena krivuljom)

$$W = \int Fdf,$$

gdje su L_0 dužina opruge u neopterećenom stanju, A površina presjeka opruge, E_m srednji modul elastičnosti σ_v ili σ_p dozvoljena naprezanja već prema opterećenju.

Za opruge opterećene na smicanje prema sl. 106 vrijede izrazi: Nosivost opruge

$$F = A \tau_s,$$

deformacija (pomak)

$$f = \frac{Fh}{AG} = \frac{h\tau_s}{G},$$

rad opruge

$$W = \frac{Ff}{2} = \frac{A\tau_s^2 h}{2G},$$

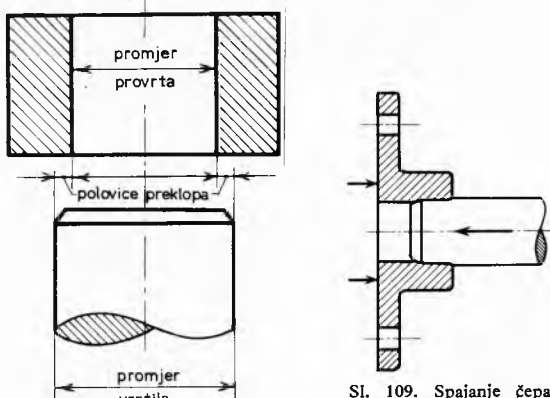
gdje je h visina bloka ili presjeka opruge kod mjesta uklještenja, τ_s dozvoljeno naprezanje na smik, G modul elastičnosti kod smicanja; ostale oznake otprije.

Neke srednje vrijednosti, koje se mogu smatrati samo kao smjernice kod proračunavanja, za gumu srednje tvrdoće iznose: statička čvrstoća $\sigma_L = 175 \dots 270 \text{ kp/cm}^2$ pri istezanju 400% ... 800%, modul smicanja $G = 3 \dots 12 \text{ kp/cm}^2$, modul elastičnosti na tlak $E = 18 \dots 100 \text{ kp/cm}^2$, naprezanje na tlak $\sigma_{p, dop} = 10 \dots 25 \text{ kp/cm}^2$, ali se češće računa s manjom vrijednošću $12 \dots 15 \text{ kp/cm}^2$.

Iscrpn podaci nalaze se u specijalnim priručnicima.

STEZNI SPOJEVI

Pod steznim se spojevima u strojarstvu općenito razumijevaju spojevi strojnih dijelova između kojih postoji prijelom, kao npr. na sl. 108, a izvode se prešanjem na temperaturama okoline, tzv. uzdužni stezni spojevi, ili navlačenjem ugrijanih vanjskih dijelova na unutrašnje, odnosno uvlačenjem ohlađenih unutrašnjih dijelova u vanjske, tzv. poprečni stezni spojevi.

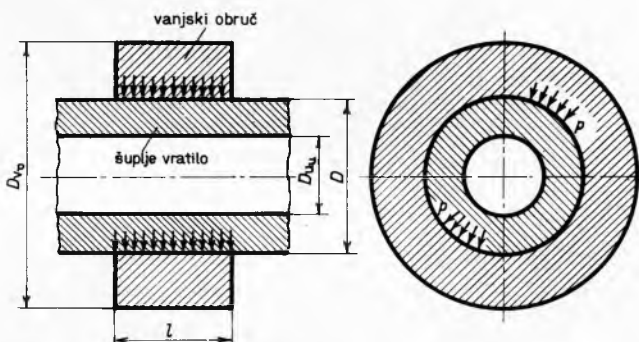


Sl. 108. Prijelom dijelova koji se spajaju steznim spojem

Sl. 109. Spajanje čepa s obrućem prešanjem na temperaturi okoline (uzdužni stezni spoj)

Za izvođenje *uzdužnih steznih spojeva* (sl. 109), a u nekim slučajevima i *poprečnih*, potrebno je oblikovanje rubova dijelova koje treba spojiti. Da bi se postupak olakšao, dijelovi koje treba spojiti ponekad se mažu mašću ili uljem.

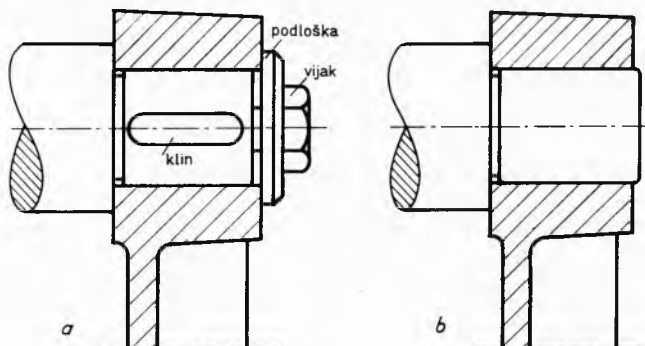
Cilj prethodnog grijanja, odnosno hlađenja dijelova pri izvođenju *poprečnih steznih spojeva*, jest da se toplinskim širenjem, odnosno stezanjem poveća promjer otvora u dijelu koji se navlači, odnosno smanji promjer dijela koji se uvlači, toliko da bi nestao prijelom i da bi se tada moglo izvršiti spajanje bez vladavanja trenja, što je neizbježno pri spajanju na temperaturama okoline. Operacije grijanja izvode se s pomoću kupki s vrućim uljem. Pri tome se dijelovi obično ne zagrijavaju iznad $350 \text{ }^\circ\text{C}$. Operacije povezane s hlađenjem izvode se s pomoću suhog leda ili tekućeg zraka. S tim rashladnim sredstvima mogu se postići temperature dijelova $-70 \dots -79 \text{ }^\circ\text{C}$, odnosno $-190 \dots -196 \text{ }^\circ\text{C}$. Obično se takvim grijanjem ili hlađenjem postiže učinak dovoljan za nesmetano spajanje. U slučaju da to nije dovoljno, može se kombinirati jedno s drugim (grijanje dijela koji se navlači s hlađenjem dijela koji se uvlači). Po navlačenju (uvlačenju) izmjenom topline s okolinom uspostavi se normalna temperatura dijelova. To je popraćeno s ponovnim uspostavljanjem prijeloma koji je postojao prije zagrijavanja, odnosno hlađenja. Posljedice su tog procesa deformacija dijelova spoja i time pritiska na dosjednim površinama (sl. 110). Ti pritisci uzrokuju otpor trenja pri spajanju potreban za opiranje spoja razrješavanju.



Sl. 110. Pritisci na dosjednim površinama steznog spoja šupljeg vratila s obrućem

Osim uzdužnih i poprečnih steznih spojeva, izravnim spajanjem dijelova, u ovu skupinu ubrajaju se i stezni spojevi s pomoću posebnih steznih elemenata. Spajanje s tim elementima vrši se uz njihovo prethodno zagrijavanje, slično kao i pri izvođenju poprečnih steznih spojeva.

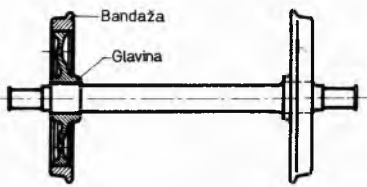
Svojstva i primjena steznih spojeva. Bez obzira na način steznog spajanja, njegov otpor trenja pri spajanju mora biti dovoljno velik da spriječi aksijalno pomicanje i zakretanje spojenih dijelova jednoga prema drugome. Taj je otpor veći od otpora trenja klizanja jednog dijela po drugome. Zbog toga su stezni spojevi strojnih dijelova čvrsti i otporni protiv potresa i omogućavaju prijenos udarnih i promjenljivih opterećenja. Dalja njihova prednost jest jednostavnost (sl. 111). Za prikazani stezni spoj



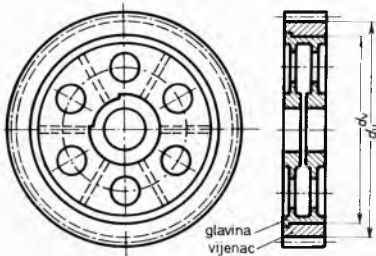
Sl. 111. Spoj ručice s čepom: a u izvedbi s klinom, vijakom i podložnom pločicom, b steznim spojem

nije potreban klin ni utor za njega, ni provrt za vijak, ni njegov navoj, ni vijak, ni podložna pločica, ni matica. Iz tog se primjera vidi da se primjenom steznog spoja može katkada postići prilična ušteda.

Dobra svojstva steznih spojeva čine ih prikladnim za spajanje rotacijskih dijelova, npr. vratila s rotorima turbina, turbo-kompresora i visokotlačnih ventilatora. Stezno se spajaju i bandaže na kotačima željezničkih vozila i kotači s osovinama (sl. 112),



Sl. 112. Stezni spojevi bandaže s vijencem kotača i kotača s osovinom na željezničkim vozilima



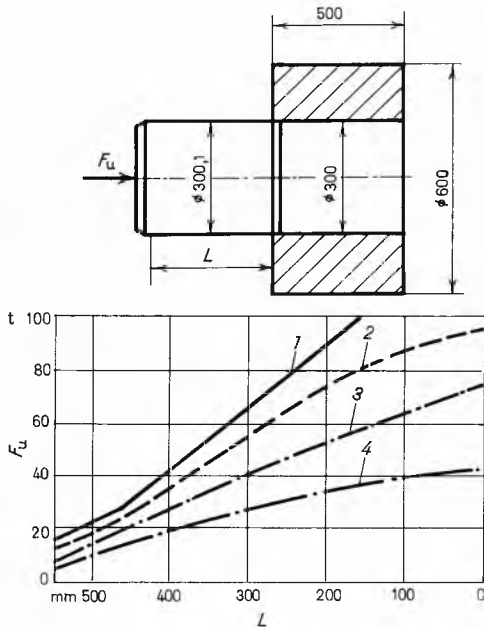
Sl. 113. Stezni spoj vijenca s glavinom velikog zupčanika izveden vrućim navlačenjem. d_v Promjer vijenca, d_u unutarnji promjer zubnog kola

a i vijenci velikih zupčanika s glavinama, odnosno s ramenima (sl. 113) itd.

Sile i druge pojave u steznim spojevima. Najmanji otpor razrješavanju steznog spoja koji je ostvaren nekim minimalnim tlakom p_{min} na dosjednoj površini A dijelova i koji mora biti barem toliko velik da održava ravnotežu s vanjskim opterećenjima — jest sila otpora trenja F_k općenito određena formulom

$$F_k = A p_{min} \mu_k,$$

gdje je μ_k koeficijent trenja klizanja.



Sl. 114. Ovisnost sile uprešavanja F_u pri izvođenju uzdužnog steznog spoja o dužini uprešavanja L . 1 Uprešavanje na suho, 2 upotrebom ulja, 3 upotrebom ulja i loja, 4 upotrebom loja

Za primjenu ove formule važno je, da li su vanjska opterećenja aksijalna, radijalna, ili se pri istovremenom djelovanju jednih i drugih radi o nekom rezultatnom opterećenju. Osim toga treba

voditi računa i o okolnosti da koeficijent trenja klizanja zavisi od toga, da li je u spoju prisutno mazivo i, ako jest, kakvo je. Kako od toga zavisi sila otpora trenja klizanja može se zaključiti iz sl. 114 na kojoj je prikazana zavisnost sile potrebne za ostvarenje uzdužnog spoja (sile uprešavanja F_u) od dužine uvlačenja L za slučaj uvlačenja bez i s pomoću različitih maziva.

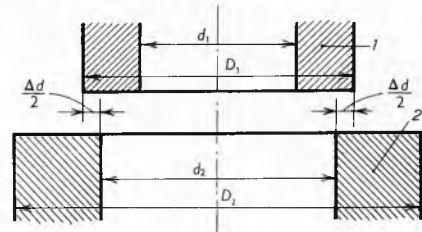
Da u steznom spoju ne bi nastupile plastične deformacije, tlak na dosjednim površinama dijelova ne smije prekoračiti neku maksimalnu dopustivu vrijednost p_{max} . Tlak je na dosjednim površinama steznog spoja općenito zavisin od veličine prijklopa, te se u ispravnom steznom spoju proračunski prijklop (natezna mjera) mora nalaziti unutar stanovitih granica p_{max} i p_{min} . Područje unutar tih granica jest polje tolerancije dosjeda. Njegova gornja granica određena je zahtjevom da p_{max} ne smije uzrokovati naprezanja materijala vanjskog obruča veća od dopuštene veličine od $0,9 \sigma_R$, gdje je σ_R granica razvlačenja materijala.

Smjernice za proračun steznih spojeva. Relativna deformacija čepa i obruča ε , s obzirom na početni promjer čepa iznosi (sl. 115)

$$\varepsilon = \frac{D_1 - d_2}{D_1} = \frac{\Delta d}{D_1}.$$

Specifični tlak na površini između čepa i obruča u nategnutom stanju p zavisi od dozvoljenih naprezanja u čepu $\sigma_{1 dop}$ i u obruču $\sigma_{2 dop}$:

$$p \leq \sigma_{1 dop} \left[\frac{1 - (d_1/D_1)^2}{2} \right]; \quad p \leq \sigma_{2 dop} \left[\frac{1 - (d_2/D_2)^2}{2} \right].$$



Sl. 115. Uz proračun steznih spojeva. 1 Čep, 2 obruč

Po Hookeovom zakonu za čep i obruč vrijedi odnos

$$\frac{\varepsilon}{p} = \frac{1}{E_1} \left[\frac{1 + (d_1/D_1)^2}{1 - (d_1/D_1)^2} - \frac{1}{m_1} \right] + \frac{1}{E_2} \left[\frac{1 + (d_2/D_2)^2}{1 - (d_2/D_2)^2} + \frac{1}{m_2} \right],$$

gdje su E_1 i E_2 moduli za čep i za obruč, m_1 i m_2 Poissonovi brojevi za čep i za obruč (za metale je $m = \frac{10}{3}$, približe v. *Nauka o čvrstoći*). Natezna mjera je

$$\Delta d = D_1 p \left(\frac{\varepsilon}{p} \right).$$

Temperaturne razlike potrebne kod navlačenja (poprečni stezni spoj). Ako se sa T_0 označi temperatura okoline, sa T_1 temperatura ohlađenog čepa, sa T_2 temperatura zagrijanog obruča, onda hlađenje čepa za temperaturnu razliku $T_0 - T_1$ uzrokuje suženje čepa za

$$d_1 = a_1 D_1 (T_0 - T_1),$$

dok zagrijavanje obruča za temperaturnu razliku $T_2 - T_0$ uzrokuje njegovo proširenje za

$$d_2 = a_2 d_2 (T_2 - T_0).$$

U ova dva izraza a_1 i a_2 jesu koeficijenti toplinske dilatacije materijala čepa i obruča.

Ukupna promjena promjera treba biti veća od tražene natezne mjere, tj. $\Delta d_1 + \Delta d_2 > \Delta d$.

Dodirna površina steznog spoja iznosi $A = D_1 \pi l$, gdje je l dužina dosjeda, a prema tome se prijenosna sila steznog spoja, u skladu s prvim izrazom u ovom poglavlju, može izraziti u obliku $F = \mu A p$ ili

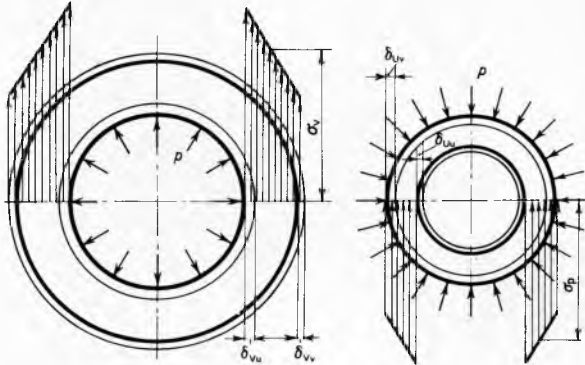
$$F = \mu D_1 \pi l p,$$

gdje su oznake već objašnjene, dok koeficijent trenja μ na plohi između čepa i obruča u nategnutom stanju iznosi $0,05 \dots 0,19$ (za polutvrđi čelik cca 0,16).

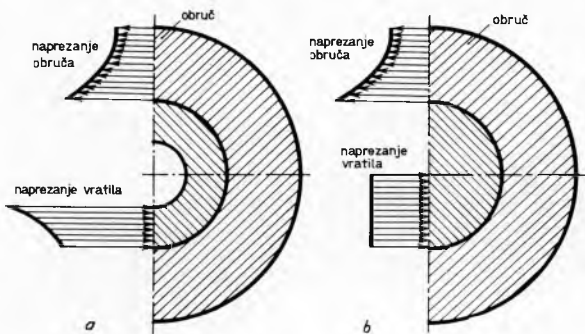
Stezni spoj može prenositi moment okretanja

$$M_t = \frac{F d_2}{2}$$

Izvođenje steznih spojeva. Pri izvođenju steznih spojeva treba imati na umu da u njihovim elementima nastaju velika naprezanja (sl. 116 i 117), što može biti uzrok razaranju dijelova, ako se spajanje izvodi neoprezno, tj. izvedeni stezni spoj može napuknuti ili se sasvim prelomiti.

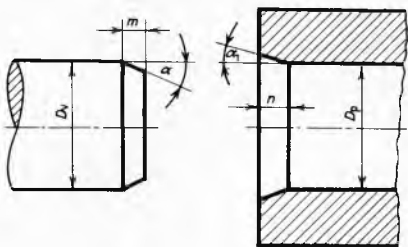


Sl. 116. Raspodjela naprezanja i deformacija u steznom spoju šupljeg vratila s obručom. σ_r , σ_t Srednje vlačno, odnosno srednje tlačno naprezanje; δ_{vu} , δ_{vv} deformacije na unutarnjoj, odnosno vanjskoj površini obruča; δ_{vu} , δ_{vv} deformacije na unutarnjoj, odnosno vanjskoj površini vratila

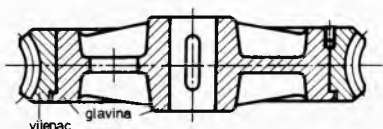


Sl. 117. Naprezanje dijelova u steznom spoju: a šupljeg vratila i obruča, b punog vratila i obruča

Oblikovanje rubova dijelova za uzdužni stezni spoj potrebno je da se spriječi struganje dosjednih površina, do čega bi inače došlo pri spajanju i što bi imalo za posljedicu znatno uglašavanje



Sl. 118. Oblikovanje rubova dijelova pri spajanju steznim spojem



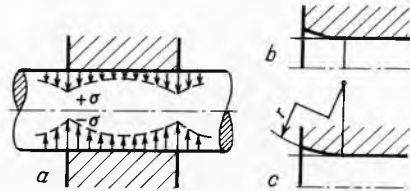
Sl. 119. Stezni spoj vijenca pužnog kola s glavinom

i time smanjivanje prijeklopa. Najčešće se to oblikovanje (sl. 118) sastoji u zakošenju rubova dijelova koji se uvlače. Osim toga, naročito kad se radi o strojnim dijelovima s većim dimenzi-

jama, često se proširuju i rubovi provrta dijela koji se navlači. Preporučljive dimenzije tih zakošenja jesu $\alpha = 5 \dots 15^\circ$; $m = 0,01 D + 2 \text{ mm}$; $n = 2 \dots 3 \text{ mm}$; $\alpha_1 = 3 \dots 10^\circ$.

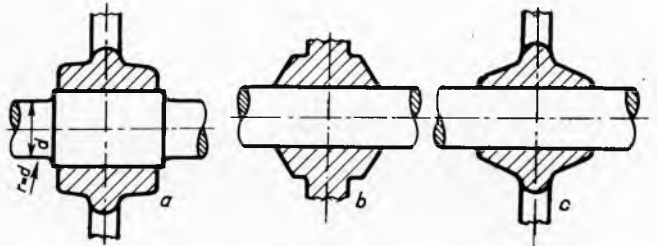
Osim boljeg održavanja prijeklopa i time sigurnosti steznog spoja prethodnim oblikovanjem njegovih dijelova, postiže se i smanjenje tlaka potrebnog za njegovo izvođenje i olakšanje montaže. Jedan drugi način takvog oblikovanja prikazan je na sl. 119.

Oblikovanje provrta dijelova koji se navlače može biti potrebno i kod izvođenja poprečnih steznih spojeva. Naročito je to slučaj, kad se radi o spojevima vratila s glavinama. Zbog velike čvrstoće steznog spoja, njegovi se dijelovi, naime, ponašaju kao cjelina, pa na naglim prijelazima s glavine na vratilo nastaju koncentracije naprezanja (sl. 120), koje smanjuju čvrstoću oblika



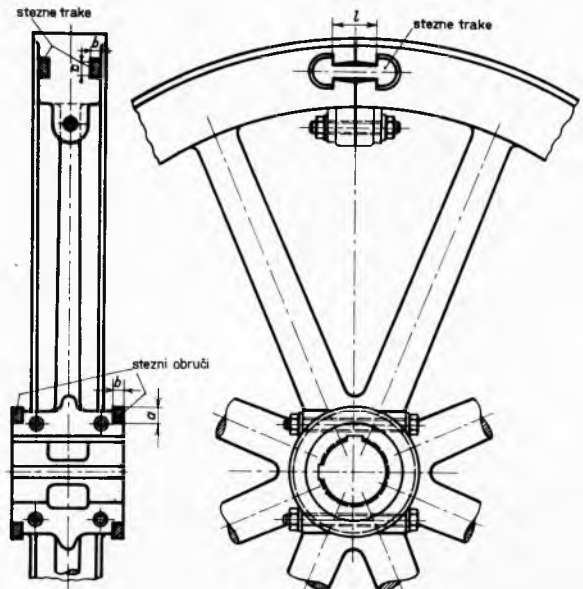
Sl. 120. Raspodjela naprezanja u vratilu spojenom steznim spojem: a raspodjela vlačnog (+σ) i tlačnog (-σ) naprezanja; b, c zakošenje, odnosno zaobljenje rubova provrta za postizavanje povoljnije raspodjele naprezanja

i povećavaju sklonost lomu. Protumjere tome su duga zakošenja (sl. 120 b) ili zaobljenja (sl. 120 c) s velikim polumjerom na rubovima provrta. Slično se postiže i drugim načinima oblikovanja glavine, a i vratila (sl. 121).



Sl. 121. Nekoliko oblika dijelova steznih spojeva glavine s vratilom za povećanje čvrstoće oblika

Stezni elementi upotrebljavaju se za izvođenje steznih spojeva koji obično služe za osiguranje od oslabljenja, najčešće pri spajanju podijeljenih strojnih elemenata, poglavito dvodijelnih



Sl. 122. Stezni spoj glavine i vijenca dvodijelnog zamašnjaka steznim obručima i trakama

zamašnjaka (sl. 122), remenica, zupčanika i sličnih dvodijelnih elemenata. To su stezni obruči (npr. na glavini zamašnjaka na sl. 122) i stezne trake ili spojnice (npr. na vijencu tog zamašnjaka).

Pri izvođenju spoja ti se elementi prethodno moraju ugrijati.

Stezni obruči obično imaju oblik kružnog prstena s kvadratnim presjekom.

Svaki od tih spojeva izvodi se obično s dva stezna obruča. Za navlačenje obruča na dijelove koje treba spojiti, stezni obruči imaju naročita udubljenja na vijencu i na glavini (sl. 122).

Pri izvođenju spojeva glavine s vratilom steznim prstenovima, prstehovi se navlače kad je glavina već montirana na vratilo. Da bi stezni prstenovi djelovali na vratilo preko glavine, dosjed tih dijelova mora biti čvrst. Stezanje dijelova tim obručima nastaje pojavom tlaka na dosjednim površinama uslijed hlađenja poslije navlačenja.

Sile i naprezanja u spoju steznim obručem prikazane su na sl. 123. Iz stanja mirovanja prikazanog na sl. 123 a može se zaključiti da jedan obruč tlačí dijelove spoja prethodnom silom $F_p = Dlp$, gdje je D promjer, l dužina dosjeda, a p tlak koji tlačí na dosjednu površinu, i da ta sila uzrokuje deformacije δ_1 (deformaciju na unutrašnjoj površini obruča) i δ_2 (deformaciju dijela u spoju).

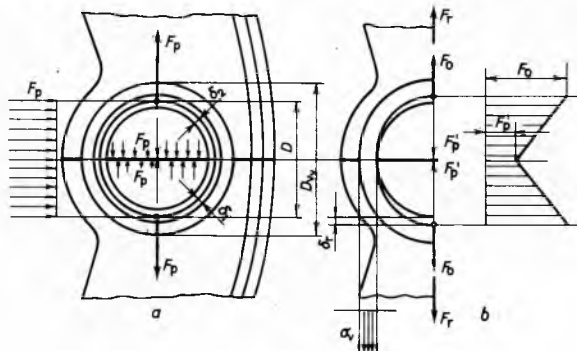
U pogonu (stanje prikazano na sl. 123 b) uslijed djelovanja centrifugalne sile pojavljuju se prethodnoj sili suprotna sila rada F_r i deformacije δ_r steznog obruča i dijelova u spoju. Pojava te sile uzrokuje smanjenje stezne sile spoja od veličine F_p na veličinu F_p' , tako da tada ukupna sila F_0 koja djeluje na spoj nije više rezultanta sile F_r i F_p , već sile F_r i F_p' . Prema tome sila rada ne smije doseći veličinu ukupne sile, jer bi onda bilo $F_p' = 0$, tj. došlo bi do odvajanja dijelova u steznom spoju.

Zbog toga se u proračune spojeva steznim obručima uvodi faktor sigurnosti $S = \frac{F_0}{F_r}$; vrijednosti $S \geq (1,3 \dots 1,8)$. Pri tome se za F_r uzima dio centrifugalne sile koji otpada na stezni obruč. (Računa se da je glavina opterećena sa 65%, a vijenac sa 35% od centrifugalne sile.) Veličina F_0 je opterećenje spoja koje odgovara potrebnom maksimalnom prijeklopu.

Vlačna naprezanja σ_v materijala steznog obruča ne smiju prekoračiti granicu razvlačenja. Taj uvjet kontrolira se formulom

$$\sigma_v = \frac{F_0}{(D_{vv} - D)l} \leq \sigma_R,$$

gdje je F_0 opterećenje spoja koje odgovara maksimalnom prijeklopu, a značenje je ostalih oznaka već spomenuto (v. i sl. 123).

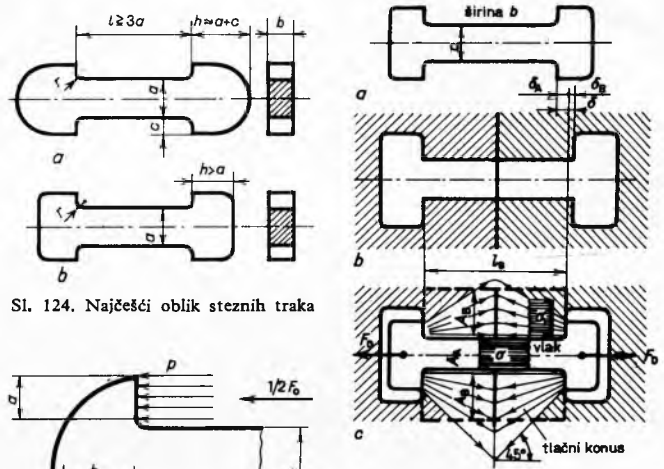


Sl. 123. Sile i naprezanja u steznom spoju vijenca zamašnjaka pomoću steznih obruča: a u stanju mirovanja, b u pogonu

Vijci s kojima glavine u steznim spojevima moraju biti stegnute (npr. na sl. 122) ne uzimaju se u obzir u proračunu, kao da ništa ne nose, već služe samo kao privremeni rezervni spoj za slučaj loma steznog obruča, i moraju biti dovoljno jaki. Stezni obruči izrađuju se od žilavih čelika.

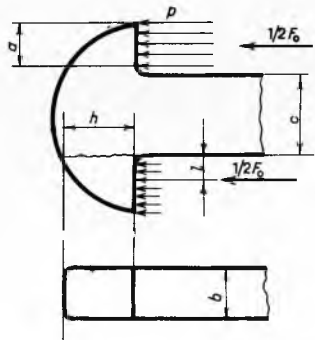
Stezne trake najčešće imaju oblike prikazane na sl. 124. Za spajanje steznim trakama u dijelovima spoja prethodno se naprave udubljenja s oblikom koji odgovara obliku traka. Dimenzije tih udubljenja moraju biti dovoljno velike da se prethodno ugrijana traka može nesmetano uložiti. Pojave koje nastaju u izvedenom spoju po ohlađivanju stezne trake na temperaturu

okoline prikazane su na sl. 125 i sl. 126. Odatle se vidi da deformacija δ_A trake uzrokuje u posljednjoj vlačno naprezanje σ_v , a deformacija δ_B dijelova tlačno naprezanje σ_p svakog od njih. Pri tome silnice u tim dijelovima stvaraju tzv. tlačni konus, tako da mu izvodnice leže pod kutom od 45° prema osi spoja. Osim toga tlak na dosjednoj površini spoja uzrokuje naprezanje σ_s glave trake na savijanje.



Sl. 124. Najčešći oblik steznih traka

Sl. 125. Deformacije, naprezanja i sile u spoju steznom trakom. a Stezna traka, b strojni dio, c sile i naprezanja u spoju



Sl. 126. Djelovanje pritiska na dosjednoj površini spoja steznom trakom i naprezanje glave trake na savijanje

tome se, uzvešći u obzir oznake iz sl. 124, 125 i 126 dobije

$$\sigma_v = \frac{F_0}{2bc} \leq 0,5\sigma_R.$$

Pri kontroli naprezanja glave trake na savijanje s pomoću izraza $\sigma_s = \frac{M}{W}$, uzima se da ono ne smije prekoračiti veličinu 60% od granice razvlačenja materijala trake

$$\sigma_s = \frac{0,5 F_0 l}{b h^2 / 6} \leq 0,6\sigma_R,$$

a pri kontroli specifičnog dodirnog tlaka uzima se da on ne smije prekoračiti veličinu 70% od granice razvlačenja, tj.

$$p = \frac{0,5 F_0}{ab} \leq 0,7\sigma_R.$$

U tim izrazima veličina sile F_0 je ona koja odgovara maksimalnom steznom prijeklopu.

Za određivanje temperaturnih razlika potrebnih kod ugrijavanja steznih traka mogu poslužiti već prije spomenuti izrazi, uz odgovarajuće izmjene, prilagođene slučaju steznih traka.

E. Oberšmit

OSOVINE I VRATILA

Osovine i vratila strojni su elementi koji nose druge dijelove stroja (kao što su kotači, remenice, zupčanici, poluge) i pri tome rotiraju u ležajima. Za razlikovanje osovina od vratila mjerodavna je njihova funkcija: osovine su opterećene samo na savijanje, a vratila na torziju ili istovremeno na savijanje i torziju. Međusobne razlike tih elemenata često i nema, i zato u praksi i jedni i drugi često se zovu osovinama.

Opterećenja osovina na savijanje potječu od njihove vlastite težine, težine strojnih elemenata koji su na njima montirani, djelovanja vanjskih sila, a kod vratila još i od djelovanja obodnih sila koje stvaraju momente torzije i istovremeno pritišću vratilo.