

UDK 621.882.1.001.2:539.377

Preračun dinamično in termično obremenjenih nateznih vijakov

IGOR JANEŽIČ

Uvod

Oglejmo si nekaj osnovnih zahtev, ki jih je treba upoštevati pri izbiri vijaka. Vrsta in oblika vijaka sta odvisni od funkcionalnosti vijaka v vijalni zvezi in obremenitve. Za dimenzijo vijaka sta torej pri dani obremenitvi odločujoči pravilna izbira materiala vijaka in matice ter njuna tehnološka obdelava.

Material za vijake in matice mora ustrezati mehanskim, elastičnim, termičnim in kemičnim lastnostim določene konstrukcije. Pri dinamično obremenjenih vijakih pa imata še posebej velik pomen struktura materiala in površinska obdelava vijaka. Material, ki ga uporabimo za take vijake, mora zagotavljati mehanske lastnosti (σ_m , σ_r), saj te prevladujejo pri izbiri dimenzije vijaka. To je razvidno s slike 1.

Sile v vijaku

V vijalni zvezi, ki je obremenjena z zunanjo silo, morata biti zvezana elementa na stičnih površinah stisnjena z določeno silo. Zato mora biti vijak obremenjen s silo prednapetja F_v . Poleg sile prednapetja, ki pomeni mirujočo notranjo obremenitev vijaka, pa je zveza obremenjena še z zunanjo obratovalno dinamično silo F . S slike 2 je razvidno, da je vijak zaradi delovanja obeh sil dodatno obremenjen za vrednost

$$F_{vd} = F \frac{C_v}{C_v + C_p}$$

prirobek pa je razbremenjen s silo

$$F_{pd} = F \left(1 - \frac{C_v}{C_v + C_p} \right)$$

Vzrok za tako stanje sil v vijalni zvezi je elastičnost materiala vijaka in prirobka. Po Hookovem zakonu določimo vzmetni konstanti za vijak C_v in prirobek C_p , torej:

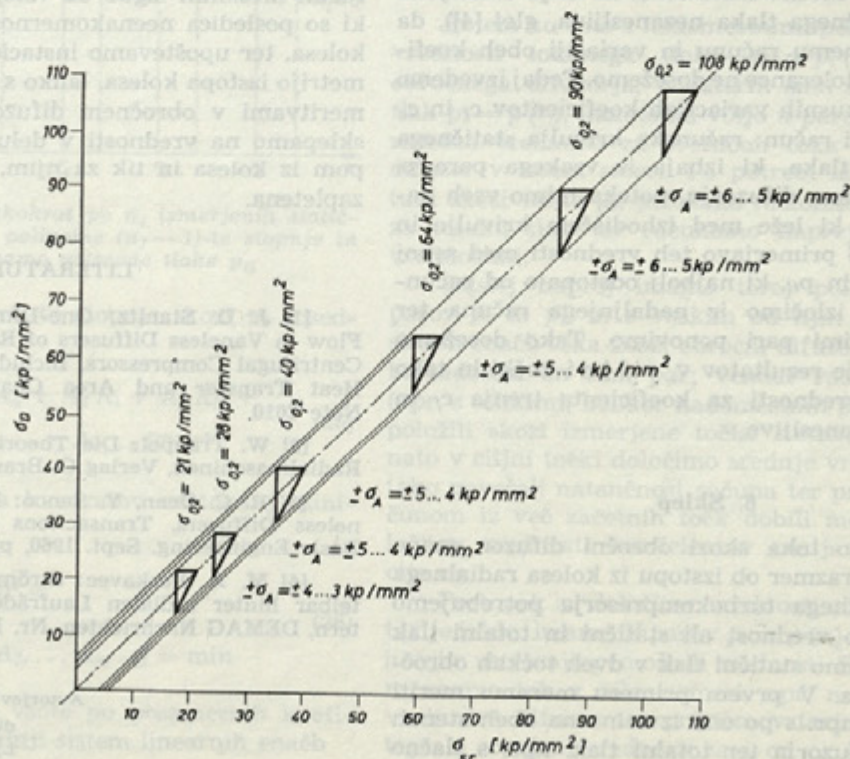
$$C_v = \frac{F_v}{\Delta l_{v,F_v}} = \frac{A_v \cdot E_v}{l_v} = \tan \beta_v$$

$$C_p = \frac{F_v}{\Delta l_{p,F_v}} = \frac{A_p \cdot E_p}{l_p} = \tan \beta_p$$

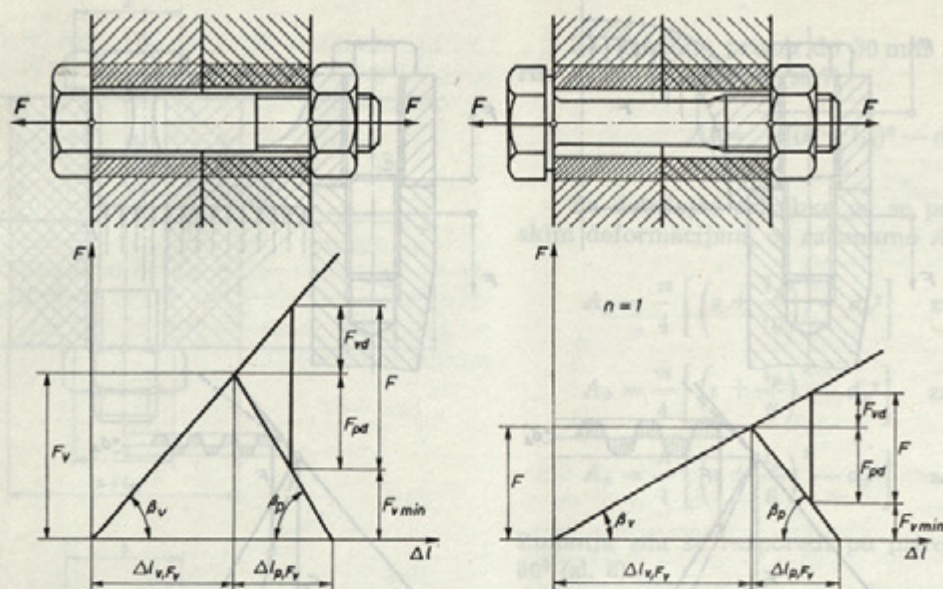
Dejanska sila med stičnima površinama (tesnilna sila) zvezanih delov pa je:

$$F_{v,min} = F_v - F \left(1 - \frac{C_v}{C_v + C_p} \right)$$

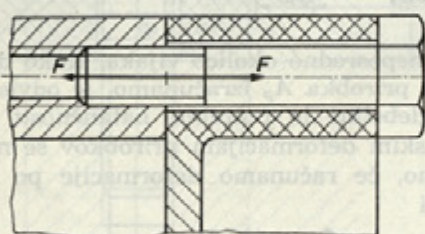
Velikost dodatne obremenitve vijaka F_{vd} pa ni odvisna samo od obremenitve in elastičnosti obeh zviti delov, ampak tudi od mesta vprijemanja obratovalne sile F . Kakšen je ta vpliv, vidimo na



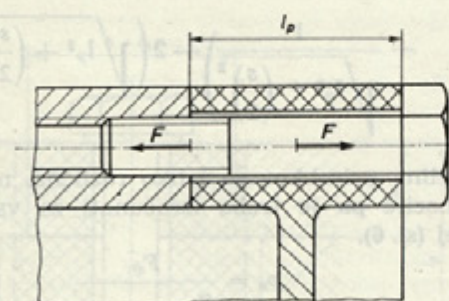
Slika 1



Slika 2



Slika 3



Slika 4

slikah 2 in 3, kjer sta razvidni dve skrajni meji vprijetanja zunanje sile. Večinoma pa gre za primer, kakršnega kaže slika 4, tj. takšnega, ko zunanja sila prijema na prirobniku nekje med skrajnima mejama.

Vpliv prijetanja sile F se kaže na spremembi vzmetne konstante, in sicer v odvisnosti od velikosti razbremenjenega dela. Ustrezajoči vzmetni konstanti za vijak in prirobnik dobimo iz enačb

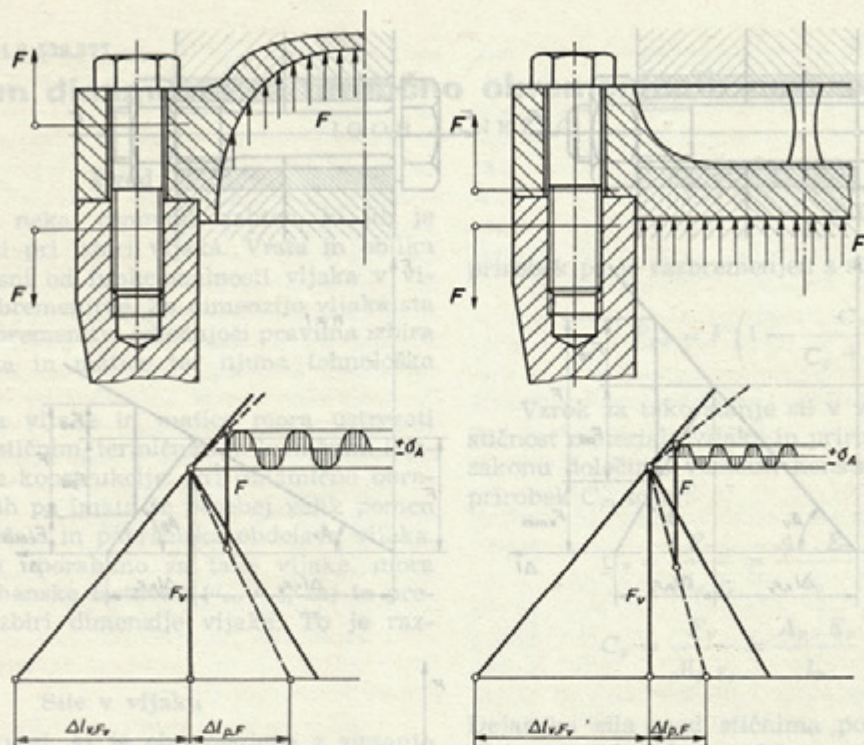
za vijak

$$C_{vr} = \frac{C_v \cdot C_p}{(1-n)C_v + C_p}$$

za prirobnik

$$C_{pr} = \frac{C_p}{n}$$

pri čemer je n faktor razbremenitve prirobnika in se giblje v območju $0 < n < 1$.



Zunanja sila F je dinamična. Vijak je pri taki zunanji obremenitvi obremenjen z neko konstantno statično silo F_v in spreminjajočo silo F_{vd} . Iz tega izhaja, da moramo tak vijak kontrolirati tudi glede amplitudne napetosti σ_A (sl. 5). Na velikost amplitudne napetosti σ_A pa vsekakor vplivata razbremenitev priroba (sl. 5) in oblika stebila vijaka (sl. 2).

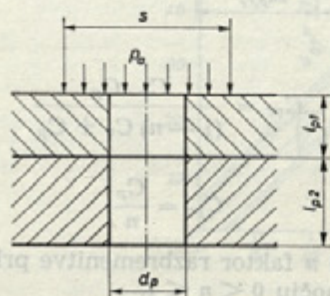
Pri preračunu dinamično obremenjenih vijakov moramo upoštevati tudi vpliv zareznihi učinkov. Da ta vpliv zmanjšamo, morajo biti vijaki površinsko skrbno obdelani, material pa mora imeti fino zrnato strukturo.

Velikost prereza

Prerez razteznostnega dela vijaka se spreminja, zaradi česar se spreminja tudi vzmetna konstanta C_v . Vzmetno konstanto izračunamo po enačbi:

$$\frac{1}{C_v} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_{vi}}$$

Tudi prirobek se deformira v elastičnem območju. Za elastično deformacijo pa v izračunih upoštevamo



Slika 6

samo neposredno okolico vijaka. Kako deformirani prerez priroba A_p izračunamo, je odvisno od njegove debeline in potrebne natančnosti preračuna. Dejanskim deformacijam prirobov se najbolj približamo, če računamo deformacije po Witskupa enačbi

$$\Delta l_{p, F_v} = \frac{2 p_a \left[1 - \left(\frac{1}{m} \right)^2 \right]}{E_p} \cdot \left[s - \frac{l_p^2}{1 - \frac{1}{m}} \left(\frac{1}{l_p} - \frac{1}{\sqrt{l_p^2 + \left(\frac{s}{2} \right)^2}} - 2 \left(\sqrt{l_p^2 + \left(\frac{s}{2} \right)^2} - l_p \right) \right] \right]$$

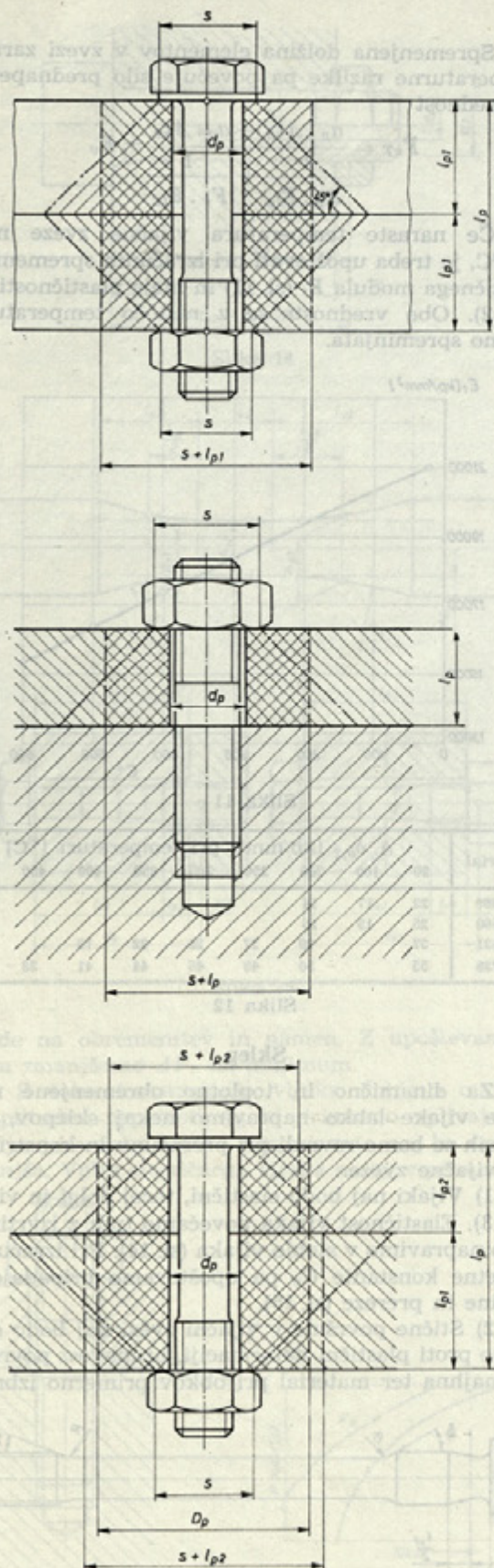
Debelina prirobov je lahko različna, njihove deformacije pa je treba izračunati za vsakega posebej (sl. 6).

$$p_a = \frac{F_v}{\frac{\pi}{4} (s^2 - d_p^2)}$$

Ta način računanja deformacij prirobov je dokaj zamuden, tako da dostikrat uporabljamo hitrejšje metode, ki so tudi še v mejah dopustnih napak. Pri teh metodah določamo deformirani prerez priroba A_p in iz enačbe

$$\Delta l = \frac{l F}{A E}$$

izračunamo njen skrčec pri znani zunanji sili.



Slika 7

Za debeline prirob do 30 mm izračunamo pre-rez A_p po Rötischerju (sl. 7).

$$A_p = \frac{\pi}{4} [(s + l_p)^2 - d_p^2]$$

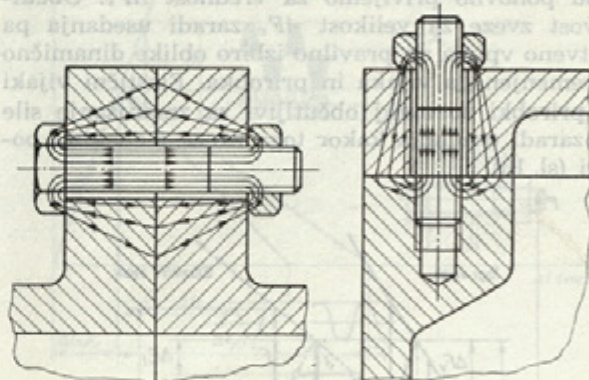
Za debelejšje prirobke pa se približamo dejan-skim deformacijam, če računamo A_p po enačbah:

$$A_p = \frac{\pi}{4} \left[\left(s + \frac{l_p}{10} \right)^2 - d_p^2 \right] \quad \text{za jeklo}$$

$$A_p = \frac{\pi}{4} \left[\left(s + \frac{l_p}{8} \right)^2 - d_p^2 \right] \quad \text{za sivo litino}$$

$$A_p = \frac{\pi}{4} \left[\left(s + \frac{l_p}{6} \right)^2 - d_p^2 \right] \quad \text{za Al-zlitine}$$

Zunanja sila se razporedi po prirobku pod kotom 80° (sl. 8).



Slika 8

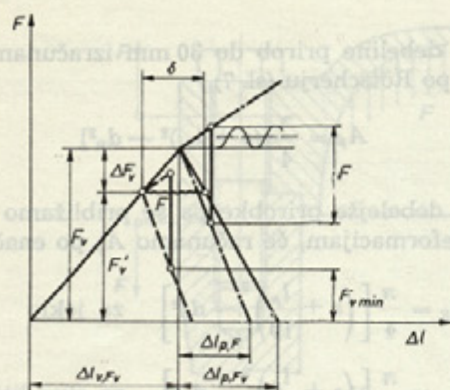
Usedanje in rahljanje zveze

Obravnavali smo sile v vijaku, ki se pojavljajo zaradi privijanja vijaka in zunanje obremenitve, ne da bi upoštevali kakršnekoli druge vplive, ki bi lahko povzročili spremembo sile v vijaku ali celotni zvezi.

V večini primerov ima pomembno vlogo za celotno konstrukcijo tesnilna sila $F_{v,min}$ med zvitimi elementi (npr. pokrovi valjev itd.). Če želimo imeti kontaktne površine stisnjene, mora biti $F_{v,min} > 0$ tudi pri maksimalni zunanji sili.

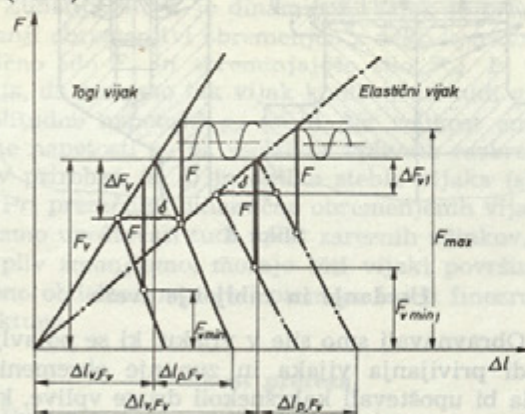
Lahko pa ugotovimo, da na $F_{v,min}$ ne vplivata samo F in F_v , ampak tudi usedanje materiala na vseh stičnih površinah zveze z vijakom. Usedanje materiala pa pomeni plastično deformacijo hrapavostnih vrhov stičnih površin v vijačni zvezi, ki so obremenjene s silama F in F_v . To usedanje materiala povzroča, da se F_v zmanjša za vrednost ΔF_v , s čimer se zmanjša tudi $F_{v,min}$ (sl. 9). ΔF_v izrazimo torej v odvisnosti od hrapavosti obremenjenih stičnih površin.

$$\Delta F_v = \delta \frac{C_{vr} \cdot C_{pr}}{C_{vr} + C_{pr}}$$



Slika 9

Zaradi ΔF_v se lahko zveza zrahlja oziroma postane tesnilna sila $F_{v, \min} = 0$. To preprečimo tako, da v poprejšnjem preračunu upoštevamo omenjeno ugotovitev oziroma vsako vijajno zvezo po določenem času ponovno privijemo za vrednost ΔF_v . Občutljivost zveze za velikost ΔF_v zaradi usedanja pa bistveno vpliva na pravilno izbiro oblike dinamično obremenjenega vijaka in prirobnika. Elastični vijaki in prirobki so manj občutljivi za zmanjšanje sile F_v zaradi usedanja kakor toga zveza z enakimi pogoji (sl. 10).



Slika 10

Iz povedanega izhaja, da je treba za izračun maksimalne sile $F_{\max}$ v vijaku izračunati tudi ΔF_v :

$$F_{\max} = F + \Delta F_v + F_{v, \min} \leq \sigma_v \cdot A_{v, \min}$$

Pri dimenzioniranju nateznega vijaka je treba poleg nateznih sil upoštevati še torzijski moment M_t , ki ga povzroča sila trenja med navoji pri privijanju vijaka do sile prednapetja F_v .

$$M_t = F_v \cdot \frac{d_2}{2} \tan(\alpha + \rho')$$

Toplotna obremenitev vijajne zveze

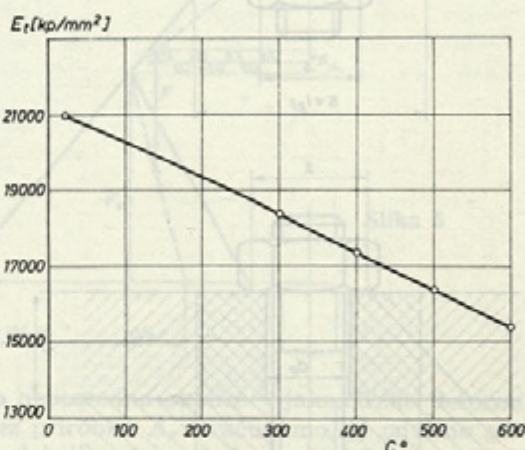
Vijajne zveze so dostikrat pod vplivom temperaturnih sprememb. Zaradi te spremembe se spremeni tudi dolžina vijaka in prirobnika, tako da je:

$$\Delta l_T = \alpha_p l_p t_p - \alpha_v l_v t_v$$

Spremenjena dolžina elementov v zvezi zaradi temperaturne razlike pa povečuje silo prednapetja za vrednost

$$F_{vT} = \frac{\alpha_p \cdot \Delta t_p - \alpha_v \cdot \Delta t_v}{\frac{1}{A_p \cdot E_{tp}} + \frac{1}{F_v \cdot E_{tv}}} + F_v$$

Če naraste temperatura vijajne zveze nad 100 °C, je treba upoštevati pri izračunih spremembo elastičnega modula E_t (sl. 11) in meje plastičnosti σ_p (sl. 12). Obe vrednosti se z rastočo temperaturo močno spreminjata.



Slika 11

Material	$\delta_v, \delta_{\theta, 2}$ [kp/mm²] pri temperaturi [°C]									
	20	100	200	250	300	350	400	450	500	
C. 0360	22	17	14							
C. 0460	25	19	16							
C. 1431	37		29	27	25	23	19			
C. 4730	55		50	48	46	44	41	38	35	

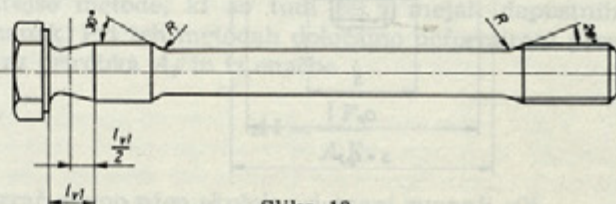
Slika 12

Sklep

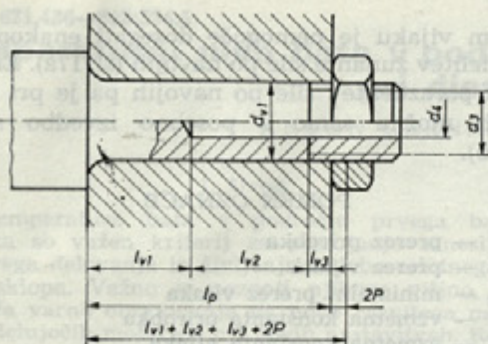
Za dinamično in toplotno obremenjene natezne vijake lahko napravimo nekaj sklepov, po katerih se bomo ravnali pri preračunu in konstrukciji vijajne zveze.

1) Vijaki naj bodo elastični, torej dolgi in vitki (sl. 13). Elastičnost vijaka povečamo tudi z izvrtino, ki jo napravimo v steblo vijaka (sl. 14). Pri izračunu vzmetne konstante C_v pa upoštevamo pripadajoče dolžine in prereze (sl. 15).

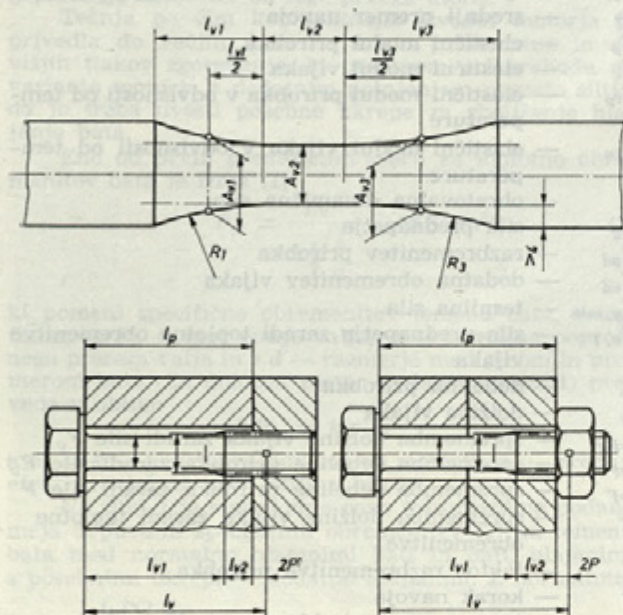
2) Stične površine v vijajni zvezi naj bodo odporne proti plastični deformaciji, hrapavost površin pa majhna ter material prirobnikov primerno izbran



Slika 13



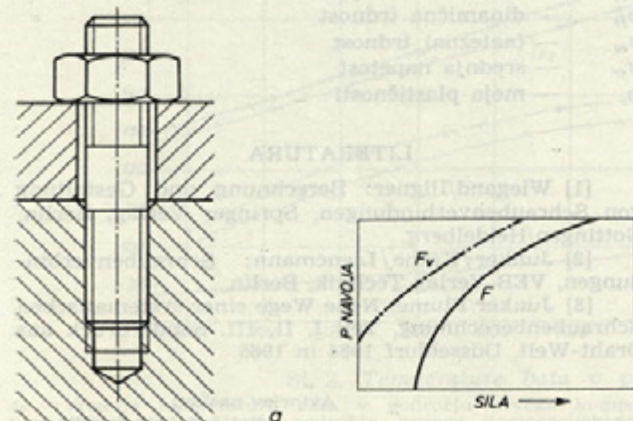
Slika 14



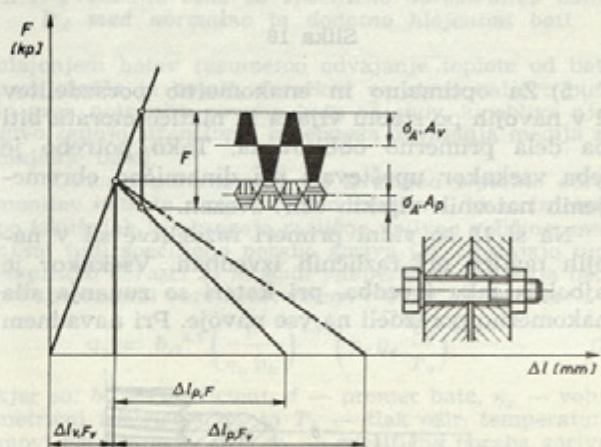
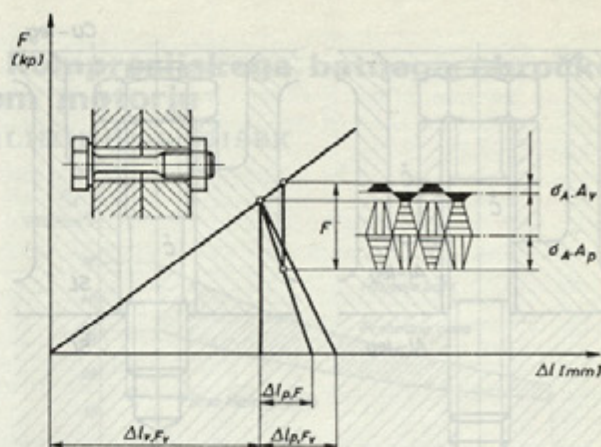
Slika 15

glede na obremenitev in namen. Z upoštevanjem tega zmanjšamo ΔF_v na minimum.

S tako konstrukcijo vijaka dobimo majhne amplitudne napetosti σ_A , ki primarno vplivajo na življenjsko dobo vijaka v zvezi, zato naj bo σ_A čim manjša. Vpliv elastičnega vijaka na σ_A v primerjavi



a

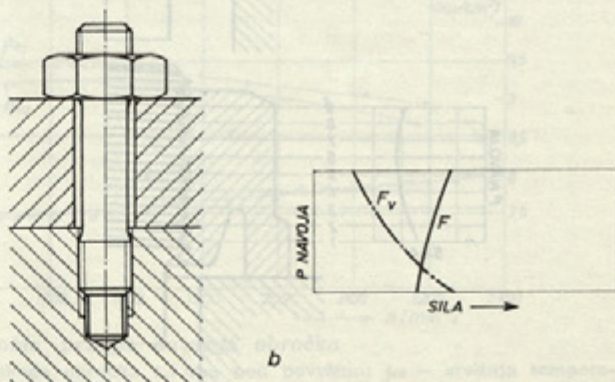


Slika 16

z neelastičnim vijakom z enakimi pogoji obremenitve je razviden s sl. 16.

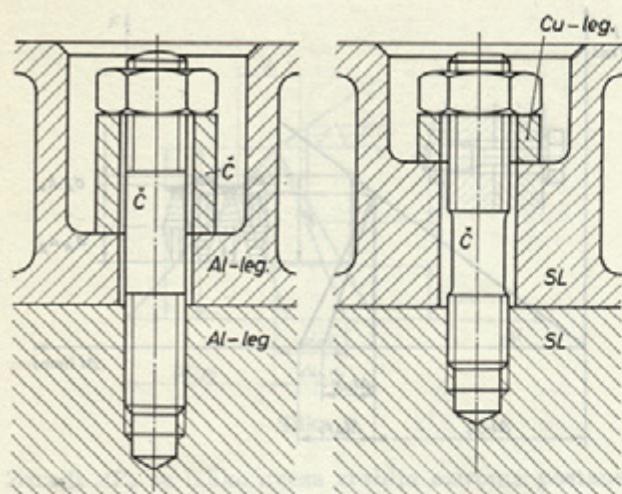
3) Zarezni učinki na steblu vijaka zelo močno vplivajo na trajno trdnost vijaka. Prehodi med premeri stebila vijaka naj bodo izpeljani z velikim polmerom, površina pa brušena (sl. 13).

4) Pri toplotno obremenjenih vijčnih zvezah je možno delno kompenzirati dodatne sile, ki se pojavljajo v vijaku s primerno izvedbo (sl. 17) in ustrezno izbiro materiala (sl. 18).



b

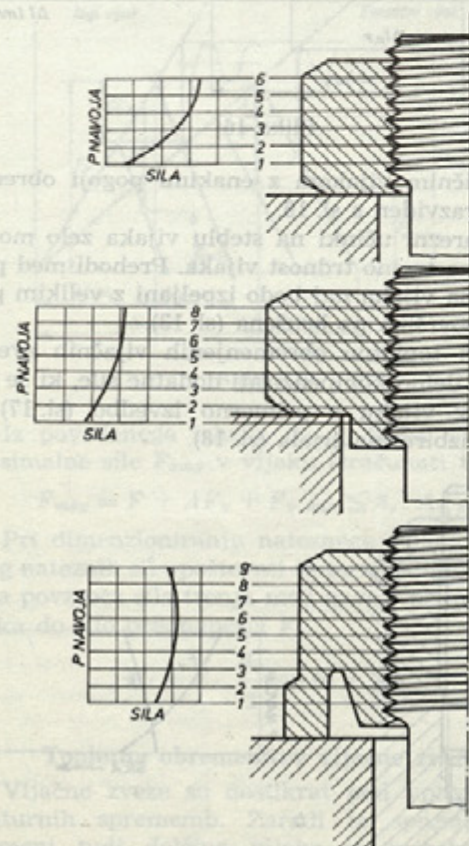
Slika 17



Slika 18

5) Za optimalno in enakomerno porazdelitev sil v navojih po steblu vijaka in matice morata biti oba dela primerno oblikovana. Tako potrebo je treba vsekakor upoštevati pri dinamično obremenjenih nateznih vijakih ozir. zvezah.

Na sl. 19 so vidni primeri razdelitve sil v navojih matice pri različnih izvedbah. Vsekakor je najboljša taka izvedba, pri kateri se zunanja sila enakomerno porazdeli na vse navoje. Pri navadnem



Slika 19

stojnem vijaku je nemogoče dosegati enakomerno porazdelitev zunanje sile po navojih (sl. 17a). Enakomerna porazdelitev sile po navojih pa je pri takih vijakih možna samo s posebno izvedbo stebila (sl. 17b).

POMEN OZNAČB

A_p	— prerez prirobka
A_v	— prerez vijaka
$A_{v,min}$	— minimalni prerez vijaka
C_p	— vzmetna konstanta prirobka
C_v	— vzmetna konstanta vijaka
C_{pr}	— sprememba vzmetne konstante prirobka
C_{vr}	— sprememba vzmetne konstante vijaka
d_2	— srednji premer navoja
E_p	— elastični modul prirobka
E_v	— elastični modul vijaka
E_{tp}	— elastični modul prirobka v odvisnosti od temperature
E_{tv}	— elastični modul vijaka v odvisnosti od temperature
F	— obratovalna dinamična sila
F_v	— sila prednapetja
F_{pd}	— razbremenitev prirobka
F_{vd}	— dodatna obremenitev vijaka
$F_{v,min}$	— tesnilna sila
$F_{v,T}$	— sila prednapetja zaradi toplotne obremenitve vijaka
l_p	— debelina prirobka
l_v	— dolžina vijaka
l_{vF_v}	— sprememba dolžine vijaka zaradi sile F_v
l_{pF_v}	— sprememba debeline prirobka zaradi sile F_v
l_{pF}	— sprememba debeline prirobka zaradi sile F
l_T	— sprememba dolžine vijaka zaradi toplotne obremenitve
n	— faktor razbremenitve prirobka
P	— korak navoja
t_p	— temperatura prirobka
t_v	— temperatura vijaka
Δt_p	— sprememba temperature prirobka
Δt_v	— sprememba temperature vijaka
a	— kot navojnice
α_p	— prevodnost prirobka
α_v	— prevodnost vijaka
δ	— plastična deformacija hrapavosti površine
ρ	— torni kot
σ_A	— amplitudna napetost
σ_D	— dinamična trdnost
σ_m	— (natezna) trdnost
σ_{sr}	— srednja napetost
σ_p	— meja plastičnosti

LITERATURA

- [1] Wiegand/Illgner: Berechnung und Gestaltung von Schraubenverbindungen, Springer Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg.
- [2] Junker/Köthe/Lienemann: Schraubenverbindungen, VEB Verlag Technik, Berlin.
- [3] Junker/Blume: Neue Wege einer systematischen Schraubenberechnung, Teil I, II, III. Sonderdruck aus Draht-Welt, Düsseldorf 1964 in 1965.

Avtorjev naslov:

dipl. ing. Igor Janežič,
Fakulteta za strojništvo
v Ljubljani