

Proračun čvrstoće prednapregnutog vijčanog spoja opterećenog statičkom i dinamičkom aksijalnom radnom silom

Neven Munjas¹, Danijel Kedveš²

¹ dr.sc.; Istarsko veleučilište, Riva 6, Pula, Hrvatska, nmunjas@iv.hr

² student; Istarsko veleučilište, Riva 6, Pula, Hrvatska, daniyel.kedves@gmail.com

Sažetak

U radu je prikazan proračun čvrstoće prednapregnutog vijčanog spoja opterećenog aksijalnom radnom silom, koja ovisno o načinu djelovanja može biti statička ili dinamička. Određene su elastične karakteristike vijka i podloge, poput krutosti i podatljivosti, pomoću dva različita pristupa te je prikazano određivanje sile prednaprezanja vijka na temelju najveće dopuštene sile u vijku za zadani razred čvrstoće. Na temelju sile prednaprezanja određen je moment pritezanja pomoću pojednostavljenog inženjerskog izraza. Za usvojenu radnu silu prema preporučenom obrascu postavljen je kriterij čvrstoće te je provjereno statičko naprezanje. Za slučaj kada je ista radna sila nanesena dinamički, provjerena je dinamička sigurnost. Procedura je verificirana putem primjera proračuna te su doneseni odgovarajući zaključci.

Ključne riječi: vijčani spoj; prednaprezanje; proračun čvrstoće; statičko opterećenje; dinamičko opterećenje

1. Uvod

U ovome se radu razmatra proračun čvrstoće prednapregnutog vijčanog spoja, koji je potreban kod analize priključaka čeličnih konstrukcija radi osiguranja njihove funkcionalnosti i sigurnosti u uvjetima eksploatacije. Vijčani spojevi su u većini slučajeva opterećeni vanjskim silama u uzdužnom smjeru koje nastoje da dodatno rastegnu vijak i rasterete podlogu. Unutarnje sile nastale pritezanjem matice također opterećuju vijak silom prednaprezanja.

Vanjsko opterećenje prema vrsti djelovanja određuje potreban proračun čvrstoće vijčanog

spoja: u prvome slučaju kada djeluje statična aksijalna radna sila, javljaju se statička normalna naprezanja u spoju; u drugome slučaju kada djeluje dinamička aksijalna radna sila, javljaju se dinamička normalna naprezanja, koje najčešće mogu biti pulzirajućeg dinamičkog karaktera. Za razliku od proračuna statičke čvrstoće, kod vijčanih spojeva koji su dulje vremena izloženi dinamičkim opterećenjima potrebno je odrediti dinamičku sigurnost, kako ne bi došlo do loma radi zamora materijala.

Radi mogućnosti pojave navedenih situacija u uvjetima rada, potrebno je kroz proračun analizirati sudjelujuće elemente u prijenosu samog opterećenja i definirati karakteristike vijka, podloge

i ukupnog spoja, radi izbora vijka i matice koji su općenito standardizirani prema dimenzijama i razredu čvrstoće. Nakon toga se mogu odrediti opterećenja kod pritezanja vijčanog spoja, koja se mogu usporediti s dostupnim podacima u normama za proračun. Pri tome mora biti zadovoljen kriterij čvrstoće, odnosno može se odrediti sigurnost vijčanog spoja, ovisno o načinu djelovanja radnog opterećenja.

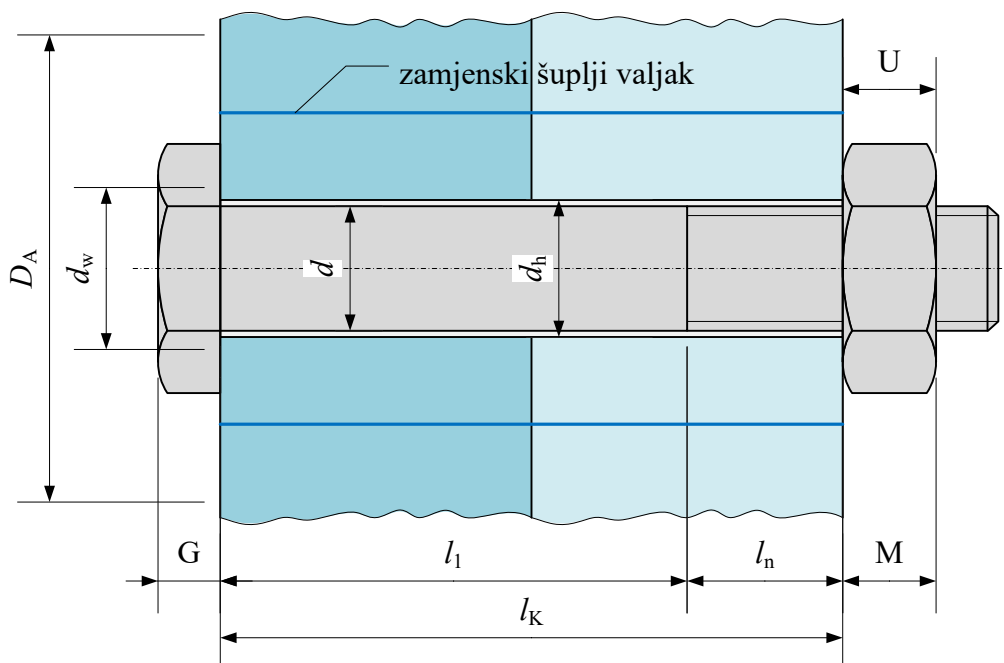
Cilj ovoga rada je prikazati proceduru proračuna vijčanog spoja opterećenog aksijalnom radnom silom, s naglaskom na različiti pristup i ograničenja u literaturi, kao npr. (Budynas i Nisbett, 2020) i (Decker i Kabus, 2011), što će biti objašnjeno u nastavku. Procedura će biti verificirana putem primjera proračuna, a dobiveni rezultati bit će uspoređeni s dostupnim normama za proračun, odnosno izvršit će se provjera čvrstoće vijčanog spoja.

2. Elastične karakteristike vijčanog spoja

Matični vijci (vijci s maticom) mogu imati po dužini različite presjeke različitih dužina koji sudjeluju u prijenosu opterećenja, odnosno vijci tada imaju različite elastične karakteristike po cijeloj svojoj dužini. Podloga, koja također sudjeluje u prijenosu opterećenja, ima drugu elastičnu karakteristiku. Elastične karakteristike vijka i podloge obično se izražavaju preko veličina kao što su krutost (eng. stiffness) c ili podatljivost (eng. compliance) δ . Podatljivost je recipročna vrijednost krutosti, tj. $\delta = 1/c$.

Postupak određivanja elastičnih karakteristika vijka i podloge razlikuje se u pristupu: u prvome pristupu prema (Budynas i Nisbett, 2020) i (Bhandari, 2010) se određuje krutost pojedinih dijelova u spoju, dok se u drugome pristupu prema (Decker i Kabus, 2011) i (Orlić i Cvitković, 1992) određuje podatljivost pojedinih dijelova u spoju. U oba pristupa, nakon što su poznate karakteristike svih dijelova u spoju, određuje se i ukupna elastična karakteristika spoja.

Slika 1 - Geometrija standardnog matičnog vijka



Izvor: autori

Krutost standardnog vijka u stegnutoj zoni, prema Sl. 1, može se odrediti prema (Budynas i Nisbett, 2020) pomoću izraza:

$$c_V = \frac{A_N \cdot A_S \cdot E_V}{A_N \cdot l_n + A_S \cdot l_1} \quad (1)$$

c_V - krutost vijka u stegnutoj zoni (N/mm)

A_N - površina presjeka struka vijka s vanjskim ili nazivnim promjerom d , $A_N = d^2\pi/4$ (mm²)

A_S - površina presjeka preko kojeg se prenosi naprezanje, koja se određuje pomoću srednjeg promjera navoja d_2 i promjera korijena navoja d_3 , $A_S = [(d_2 + d_3)/2]2\pi/4$ (mm²)

E_V - modul elastičnosti materijala vijka (N/mm²)

l_1 - dužina struka vijka (mm)

l_n - dužina tijela vijka s neuvrnutim dijelom navoja (mm)

Krutost podloge u stegnutoj zoni, prema Sl. 1, može se odrediti prema (Budynas i Nisbett, 2020) pomoću izraza:

$$c_P = \frac{0,5774 \cdot \pi \cdot E_P \cdot d}{2 \ln \left(5 \cdot \frac{0,5774 \cdot l_K + 0,5 \cdot d}{0,5774 \cdot l_K + 2,5 \cdot d} \right)} \quad (2)$$

c_P - krutost podloge u stegnutoj zoni (N/mm)

E_P - modul elastičnosti materijala podloge (N/mm²)

d - vanjski ili nazivni promjer vijka (mm)

l_K - ukupna debljina podloge (mm)

S druge strane, podatljivost standardnog vijka u stegnutoj zoni, prema Sl. 1, može se odrediti prema (Decker i Kabus, 2011) i (Orlić i Cvitković, 1992) pomoću izraza:

$$\delta_V = \frac{1}{E_V} \left(\frac{l_G}{A_N} + \frac{l_1}{A_N} + \frac{l_n}{A_n} + \frac{l_U}{A_U} + \frac{l_M}{A_N} \right) \quad (3)$$

δ_V - podatljivost vijka u stegnutoj zoni (mm/N)

l_G - dužina sudjelujućeg dijela glave vijka;

$l_G \approx 0,4d$ (mm)

A_n - površina presjeka preko navoja s promjerom $d_n = d_3$, $A_n = A_3 = d_3^2\pi/4$ (mm²)

l_U - dužina sudjelujućeg dijela vijka uvrnutog u maticu, $l_U \approx 0,5d$ (mm)

A_U - površina jezgre navoja vijka uvrnutog u maticu, $A_U \approx A_3$ (mm²)

l_M - dužina sudjelujućeg dijela matice, $l_M = l_G \approx 0,4d$ (mm)

Podatljivost podloge u stegnutoj zoni, prema Sl. 1, može se odrediti prema (Decker i Kabus, 2011) i (Orlić i Cvitković, 1992) pomoću dijela površine koja sudjeluje u prijenosu opterećenja, koja ima oblik zamišljenog šupljeg valjka (čahure). Površina presjeka zamjenskog šupljeg valjka u području $d_w \leq D_A \leq d_w + l_K$ glasi:

$$A_P = \frac{(d_w^2 - d_h^2)\pi}{4} + \frac{\pi}{8} d_w (D_A - d_w) [(x+1)^2 - 1] \quad (4)$$

A_P - površina presjeka zamjenskog šupljeg valjka (mm²)

d_w - promjer oslonca glave vijka/matice na podlogu, $d_w \approx 1,5d$ (Budynas i Nisbett, 2020, str. 440) (mm)

d_h - promjer rupe za vijak (mm)

D_A - promjer područja utjecaja jednog vijčanog spoja na podlogu, $D_A \approx 3d$ (Bhandari, 2010, str. 254) (mm)

x - pomoćna proračunska veličina,

$$x = \sqrt[3]{l_K \cdot d_w / D_A^2} \quad (-)$$

Podatljivost podloge u stegnutoj zoni, prema Sl. 1, može se odrediti prema (Decker i Kabus, 2011) i (Orlić i Cvitković, 1992) pomoću izraza:

$$\delta_P = \frac{l_K}{E_P \cdot A_P} \quad (5)$$

δ_P - podatljivost podloge u stegnutoj zoni (mm/N)

Prema obliku izraza (1) i (2) s jedne strane, odnosno (3) i (5) s druge strane, može se uočiti da navedene krutosti ne predstavljaju recipročne vrijednosti podatljivosti, i obrnuto, kako bi se očekivalo. Različite elastične karakteristike spoja koje se dobiju korištenjem navedenih izraza pridodaju se različitoj definiciji sudjelujućih dijelova u spoju.

Faktor krutosti spoja (eng. stiffness constant of the joint) ili omjer sila je bezdimenzijska veličina koja opisuje ukupnu elastičnu karakteristiku spoja, koja se može izraziti pomoću krutosti ili podatljivosti vijka i podloge (vrijede recipročne vrijednosti $c_V = 1/\delta_V$ i $c_P = 1/\delta_P$):

$$\Phi = \frac{c_V}{c_V + c_P} = \frac{\delta_P}{\delta_V + \delta_P} \quad (6)$$

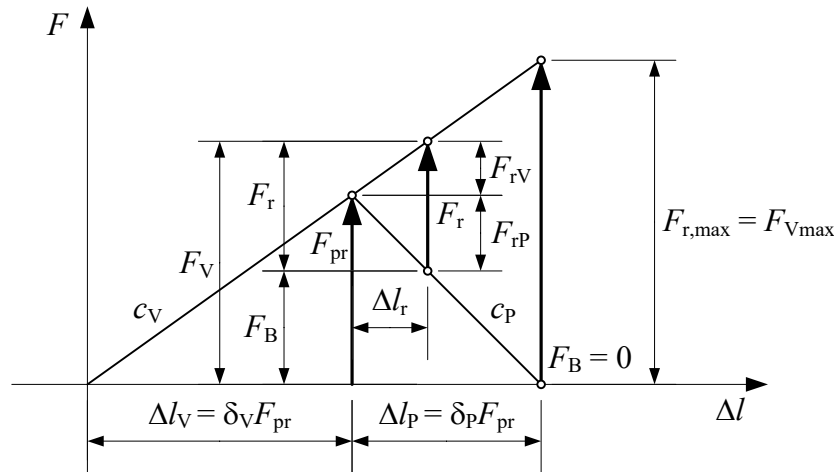
Φ - faktor krutosti spoja ili omjer sila

3. Prednapregnuti vijčani spoj opterećen statičkom aksijalnom radnom silom

Odnos sila i deformacija prednapregnutog vijčanog spoja uglavnom se opisuje pomoću dijagrama

sila i deformacija (eng. force-deformation diagram) na Sl. 2, gdje se prikazuju karakteristike vijka i podloge u prednapregnutom spoju, ali i radna opterećenja spoja, kao npr. prema (Jelaska, 2005), (Bhandari, 2010), (Decker i Kabus, 2011) i (Orlić i Cvitković, 1992).

Slika 2 - Dijagram sila i deformacija u vijčanom spoju



Izvor: autori

Iz sličnosti trokuta prema Sl. 2 krutosti vijka i podloge se mogu izraziti u obliku:

$$c_v = \frac{F_{pr}}{\Delta l_v} = \frac{F_{rv}}{\Delta l_r}, \quad c_p = \frac{F_{pr}}{\Delta l_p} = \frac{F_{rp}}{\Delta l_r} \quad (7)$$

F_{pr} - sila prednaprezanja ili predopterećenja (N)
 F_{rv} - dodatna sila u vijku (N)
 F_{rp} - sila rasterećenja podloge (N)
 Δl_r - dodatno rastezanje vijka/skraćenje podloge radi radne sile (mm)
 Δl_v - rastezanje vijka (mm)
 Δl_p - skraćenje podloge (mm)

Na sličan način može se odrediti i sila rasterećenja podloge:

$$F_{rp} = F_r - F_{rv} = F_r - F_r \frac{c_v}{c_v + c_p} = F_r - F_r \frac{\delta_p}{\delta_v + \delta_p} = F_r (1 - \Phi) \quad (10)$$

Preostala sila brtvljenja između spajanih dijelova podloge glasi:

$$F_B = F_{pr} - F_{rp} = F_{pr} - F_r (1 - \Phi) \quad (11)$$

Radna sila, tj. aksijalno radno opterećenje prednapregnutog vijčanog spoja prema Sl. 2 se može zapisati:

$$F_r = F_{rv} + F_{rp} \quad (8)$$

F_r - radna sila, tj. aksijalno radno opterećenje (N)

Dodatna sila u vijku iz prethodnog izraza može se izraziti pomoću izraza (6) i (7) kako slijedi:

$$F_{rv} = F_r \frac{c_v}{c_v + c_p} = F_r \frac{\delta_p}{\delta_v + \delta_p} = F_r \Phi \quad (9)$$

F_B - sila brtvljenja između spajanih dijelova podloge (N)

Ukupna sila u vijku tada se može zapisati:

$$F_V = F_{pr} + F_{rV} = F_{pr} + F_r \cdot \Phi = F_B + F_r \quad (12)$$

F_V - cjelokupno opterećenje vijka (N)

Vlačno naprezanje u vijku prema kriteriju čvrstoće (Decker i Kabus, 2011) mora biti manje ili jednako dopuštenom napreznju:

$$\sigma_V = \frac{F_V}{A_S} \leq \sigma_{dop}, \quad \sigma_{dop} = 0,8 \cdot R_{p0,2} \quad (13)$$

σ_V - vlačno naprezanje u vijku (N/mm²)

σ_{dop} - dopušteno vlačno naprezanje u vijku (N/mm²)

$R_{p0,2}$ (ili R_e) - granica razvlačenja materijala vijka (N/mm²)

Radna sila se može povećavati do vrijednosti $F_r = F_{r,max}$, što odgovara najvećoj sili u vijku ($F_{Vmax} = F_{r,max}$), kada sila brtvljenja postaje jednaka nuli ($F_B = 0$), prema Sl. 2. Tada dolazi do odvajanja stegnutih dijelova podloge i do propusnosti spoja (Bhandari, 2010).

Iz sličnosti trokuta prema Sl. 2 se može izraziti krutost vijka u sljedećem obliku:

$$c_V = \frac{F_{pr}}{\Delta l_V} = \frac{F_{r,max}}{\Delta l_V + \Delta l_P} = \frac{F_{Vmax}}{\Delta l_V + \Delta l_P} \quad (14)$$

$F_{r,max}$ - najveća radna sila u vijku (N)

F_{Vmax} - najveća sila u vijku (N)

Najveća sila u vijku iz prethodnog izraza može se izraziti pomoću krutosti ili podatljivosti vijka i podloge pomoću izraza (7) te odnosa $c_V = 1/\delta_V$ i $c_P = 1/\delta_P$ kako slijedi:

$$F_{Vmax} = F_{pr} \frac{\Delta l_V}{\Delta l_V + \Delta l_P} = F_{pr} \frac{c_V + c_P}{c_P} = F_{pr} \frac{\delta_V + \delta_P}{\delta_V} \quad (15)$$

Najveće vlačno naprezanje u vijku prema kriteriju čvrstoće mora biti manje ili jednako dopuštenom napreznju:

$$\sigma_{Vmax} = \frac{F_{Vmax}}{A_S} \leq \sigma_{dop}, \quad \sigma_{dop} = 0,8 \cdot R_{p0,2} \quad (16)$$

σ_{Vmax} - najveće vlačno naprezanje u vijku (N/mm²)

Za prednapregnute vijke može se usvojiti najveća sila u vijku prema (Kraut, 1997) u rasponu:

$$F_{Vmax} = (1,3 \dots 1,6) F_r \quad (17)$$

Za određivanje potrebnog momenta pritezanja kod vijčanih spojeva s normalnim metričkim navojem može se koristiti pojednostavljeni inženjerski izraz, prema (Jelaska, 2005):

$$T_{pr} \approx 0,17 \cdot F_{pr} \cdot d \quad (18)$$

T_{pr} - moment pritezanja (Nmm, Nm)

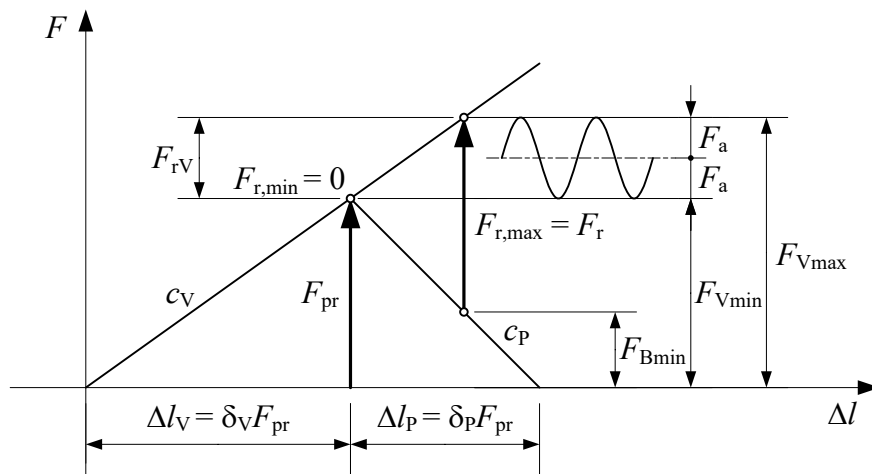
Za točnije određivanje momenta pritezanja trebalo bi koristiti složenije izraze, što neće biti razmatrano u ovome radu.

4. Prednapregnuti vijčani spoj opterećen dinamičkom aksijalnom radnom silom

Prema (Orlić i Cvitković, 1992) u dinamički opterećenim konstrukcijama treba težiti što manjoj vrijednosti dinamičke komponente sile F_{rV} . Razlog tome je manja dinamička otpornost materijala vijka u odnosu na statičku. Veća sila F_{rV} dovodi do većih dinamičkih napreznja u vijku, a to znači i do ranijeg loma uslijed zamora materijala.

Kod vijčanih spojeva opterećenih dinamičkom aksijalnom radnom silom, najčešći je slučaj promjene radne sile između 0 i nominalne vrijednosti F_r (ishodišno ili pulzirajuće dinamičko vlačno opterećenje), tj. kada je najmanja radna sila $F_{r,min} = 0$ i najveća radna sila $F_{r,max} = F_r$. Tada je dinamička komponenta dodatnog opterećenja vijka jednaka dvostrukoj amplitudnoj sili u vijku, tj. $F_{rV} = 2 \cdot F_r$, prema Sl. 3.

Slika 3 - Dijagram sila i deformacija u vijčanom spoju - pulzirajuće dinamičko radno opterećenje



Izvor: autori

Dinamičko naprezanje, prema (Orlić i Cvitković, 1992), proizvodi dinamička komponenta sile F_a u presjeku površine A_3 :

$$\sigma_D = \frac{F_a}{A_3} = \pm \frac{F_{rv}}{2A_3} \leq \pm R_a \quad (19)$$

σ_D - dinamičko naprezanje u vijku (N/mm^2)
 F_a - amplitudna sila u vijku, $F_a = \pm F_{rv}/2$ (N/mm^2)
 R_a - amplituda dinamičke čvrstoće navoja vijka (N/mm^2)

Amplituda dinamičke čvrstoće navoja vijka R_a vezana je uz postupak izrade navoja, odnosno na nju utječu tehnološki faktori. Kada je npr. navoj izrađen valjanjem, i nakon toga podvrgnut termičkoj obradi poboljšavanja, amplituda dinamičke čvrstoće glasi:

$$R_a = 0,75 \cdot \left(\frac{180}{d} + 52 \right) \quad (20)$$

Postignuta dinamička sigurnost vijčanog spoja mora biti veća od preporučene vrijednosti:

$$S_D = \frac{R_a}{\sigma_D} > 1,5 \quad (21)$$

S_D - dinamička sigurnost vijčanog spoja (-)

Potrebno je izvršiti također kontrolu dinamičke nosivosti vijka, odnosno povećanje naprezanja radi dodatne sile u vijku F_{rv} mora biti manje ili jednako naprezanju koje odgovara 10% granice razvlačenja $R_{p0,2}$ (ili R_e) materijala vijka, prema (Decker i Kabus, 2011):

$$\sigma_{rv} = \frac{F_{rv}}{A_S} \leq 0,1 \cdot R_{p0,2} \quad (22)$$

σ_{rv} - dinamičko naprezanje radi dodatne sile u vijku (N/mm^2)

Dodatna sila u vijku na temelju prethodnog izraza mora biti:

$$F_{rv} \leq 0,1 \cdot R_{p0,2} \cdot A_S \quad (23)$$

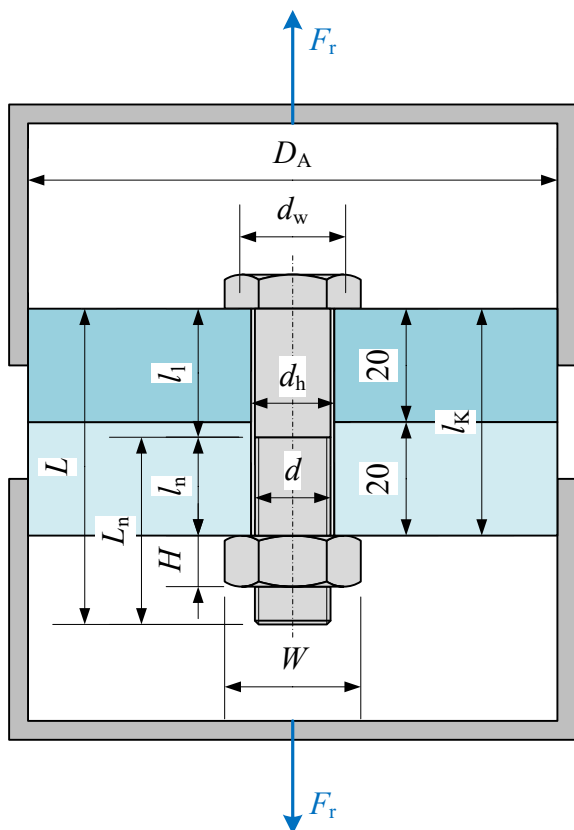
5. Primjeri

5.1 Proračun vijčanog spoja opterećenog statičkom aksijalnom radnom silom

Odabran je prednapregnuti vijčani spoj opterećen statičkom aksijalnom radnom silom. Spoj se sastoji od dvije kružne čelične ploče ($E_p = 207 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$) debljine 20 mm (ukupna debljina podloge je tada $l_k = 40 \text{ mm}$), standardnog matičnog vijka ($E_p = 207 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$) dimenzije M12 i razreda čvrstoće 8.8. Neka je hvatište aksijalne radne sile F_r ,

je na vanjskoj površini spajanih dijelova, kao što je prikazano na Sl. 4.

Slika 4 - Prednapregnuti vijčani spoj opterećen aksijalnom radnom silom



Izvor: autori

Krutost podloge u stegnutoj zoni prema izrazu (2) iznosi:

$$c_p = \frac{0,5774 \cdot \pi \cdot E_p \cdot d}{2 \ln \left(5 \cdot \frac{0,5774 \cdot l_K + 0,5 \cdot d}{0,5774 \cdot l_K + 2,5 \cdot d} \right)} = 2235192,1 \text{ N/mm} \quad (25)$$

Faktor krutosti spoja ili omjer sila je tada prema izrazu (6):

$$\Phi = \frac{c_v}{c_v + c_p} = 0,188 \quad (26)$$

S druge strane, podatljivost standardnog vijka u stegnutoj zoni prema izrazu (3) iznosi:

$$\delta_v = \frac{1}{E_v} \left(\frac{2 \cdot 0,4 \cdot d + l_1}{A_n} + \frac{l_n + 0,5 \cdot d}{A_3} \right) = 2,81 \cdot 10^{-6} \text{ mm/N} \quad (27)$$

Provjerom područja primjene formule $d_w = 18 \text{ mm} \leq D_A = 36 \text{ mm} \leq d_w + l_K = 58 \text{ mm}$ te uz pomoćnu proračunsku veličinu $x = \sqrt[3]{l_K \cdot d_w / D_A^2} = 0,822$, površina presjeka zamjenskog šupljeg valjka prema izrazu (4) iznosi:

Geometrija vijčanog spoja prema Sl. 4, za zadanu ukupnu debljinu podloge, može se odrediti prema (Budynas i Nisbett, 2020, Tab. 8-7 i A-31) i (Deccker i Kabus, 2011, Tab. 10.1) kako slijedi: dužina vijka $L = 55 \text{ mm}$, dužina struka vijka $l_1 = 25 \text{ mm}$, dužina navoja $L_n = 30 \text{ mm}$, dužina tijela vijka s neuvrnutim dijelom navoja $l_n = 15 \text{ mm}$, standardna matica $W \times H = 18 \times 10,8 \text{ mm}$, vanjski promjer vijka $d = 12 \text{ mm}$, srednji promjer navoja $d_2 = 10,863 \text{ mm}$, promjer korijena navoja $d_3 = 9,853 \text{ mm}$, površina presjeka struka vijka $A_n = 113,1 \text{ mm}^2$, površina presjeka preko kojeg se prenosi naprezanje $A_s = 84,3 \text{ mm}^2$ i površina presjeka preko navoja $A_n = A_3 = 76,2 \text{ mm}^2$.

Neka je vanjski promjer ploče $D_A = 3d = 36 \text{ mm}$, promjer oslonca glave vijka/matice na podlozi $d_w = 1,5d = 18 \text{ mm}$ i promjer rupe za vijak $d_h = 13 \text{ mm}$ (vijak M12, fina kvaliteta, prema (Orlić i Cvitković, 1992, Tab. 6)).

Krutost standardnog vijka u stegnutoj zoni prema izrazu (1) iznosi:

$$c_v = \frac{A_n \cdot A_s \cdot E_v}{A_n \cdot l_n + A_s \cdot l_1} = 518824 \text{ N/m} \quad (24)$$

$$A_p = \frac{(d_w^2 - d_h^2)\pi}{4} + \frac{\pi}{8} d_w (D_A - d_w) [(x+1)^2 - 1] = 416,88 \text{ mm}^2 \quad (28)$$

Podatljivost podloge u stegnutoj zoni je tada prema izrazu (5):

$$\delta_p = \frac{l_k}{E_p \cdot A_p} = 4,64 \cdot 10^{-7} \text{ mm/N} \quad (29)$$

Faktor krutosti spoja ili omjer sila je tada prema izrazu (6):

$$\Phi = \frac{\delta_p}{\delta_v + \delta_p} = 0,142 \quad (30)$$

Razlika u vrijednostima faktora krutosti spoja ili omjera sila u izrazima (26) i (30) može se pridodati različitom odabiru sudjelujućih dijelova u spoju. Ako se u izrazu (3) zanemari utjecaj sudjelujućeg dijela glave vijka l_G , dijela vijka uvrnutog u maticu l_U i dijela matice l_M mijenja se podatljivost standardnog vijka u stegnutoj zoni kako slijedi:

$$\delta_v = \frac{1}{E_v} \left(\frac{l_1}{A_n} + \frac{l_n}{A_3} \right) = 2,02 \cdot 10^{-6} \text{ mm/N} \quad (31)$$

Faktor krutosti spoja ili omjer sila tada prema izrazu (6) iznosi:

$$\Phi = \frac{\delta_p}{\delta_v + \delta_p} = 0,187 \quad (32)$$

Prethodni izraz praktički odgovara vrijednosti izraza (26). Prema tome može se zaključiti da proračun vijčanog spoja prema (Budynas i Nisbett, 2020) općenito daje različitu elastičnu karakteristiku spoja u odnosu na proračun prema (Decker i Kabus, 2011) i (Orlić i Cvitković, 1992), koji uzimaju u obzir sve sudjelujuće dijelove u spoju, prema preporukama njemačkih inženjera VDI 2230.

Stoga se može usvojiti podatljivost standardnog vijka $\delta_v = 2,81 \cdot 10^{-6} \text{ mm/N}$ i faktor krutosti spoja tj. omjer sila $\Phi = 0,142$. Navedene vrijednosti su dobivene na temelju proračuna koji uzima u obzir sve sudjelujuće dijelove u spoju.

Za standardni vijak M12 razreda čvrstoće 8.8 prema (Decker i Kabus, 2011, Tab. 10.2) granica razvlačenja se može usvojiti $R_{p0,2} = 640 \text{ N/mm}^2$. Prema izrazu (16) dopušteno vlačno naprezanje u vijku je tada $\sigma_{dop} = 0,8 \cdot R_{p0,2} \approx 500 \text{ N/mm}^2$, a najveća dopuštena sila u vijku iznosi:

$$F_{vmax} \leq \sigma_{dop} \cdot A_s = 42,15 \text{ kN} \quad (33)$$

Prema tome može se usvojiti najveća dopuštena sila u vijku $F_{vmax} = 42 \text{ kN}$. Sila prednaprezanja se može odrediti sređivanjem izraza (15), odnosno:

$$F_{pr} = F_{vmax} \frac{\delta_v}{\delta_v + \delta_p} = 36 \text{ kN} \quad (34)$$

Moment pritezanja kod vijčanih spojeva s normalnim metričkim navojem može se odrediti prema pojednostavljenom inženjerskom izrazu (18) te iznosi:

$$T_{pr} \approx 0,17 \cdot F_{pr} \cdot d = 73,4 \text{ Nm} \quad (35)$$

Sila prednaprezanja i moment pritezanja mogu se usporediti s dostupnim podacima u nacionalnom dodatku nacrtu norme nHRN EN 1993-1-8:2008/NA, Tab. 1, koji služe za proračun priključaka čeličnih konstrukcija. U njemu su za vijak dimenzije M12 razreda čvrstoće 8.8 navedene vrijednosti:

- nazivna sila predopterećenja ili prednaprezanja: $F_{pr} = 35 \text{ kN}$;
- nanoseni moment pritezanja za ostvarenje nazivne sile predopterećenja: $T_{pr} = 70 \text{ Nm}$.

Važno je napomenuti da vrijednosti navedene u normi predstavljaju najmanje vrijednosti sile prednaprezanja i momenta pritezanja za vijak dimenzije M12 razreda čvrstoće 8.8. Te vrijednosti se mogu povećati ako se ne postigne odgovarajuće nalijeganje površina koje se spajaju.

Prema tome dobivena sila prednaprezanja, koja iznosi $F_{pr} = 36 \text{ kN}$ zadovoljava. Ona je za 2,9% veća od nazivne sile prednaprezanja, što se može pridodati odabiru dopuštenog naprezanja u vijku kao ulaznog podatka, odnosno pripadnom faktoru sigurnosti. Dobiveni moment pritezanja, koji iznosi $T_{pr} = 73,4 \text{ Nm}$ također zadovoljava. On je za 4,9% veći od momenta pritezanja potrebnog za ostvarenje nazivne sile prednaprezanja, što ukazuje da bi trebalo koristiti složenije izraze za određivanje momenta pritezanja, a to zahtjeva poznavanje

svih parametara pritezanja (neće biti razmatrano u ovome radu).

Statička aksijalna radna sila se može usvojiti prema izrazu (17):

$$F_r = F_{V_{\max}} / 1,5 = 28 \text{ kN} \quad (36)$$

Dodatna sila u vijku prema izrazu (9) iznosi:

$$F_{rV} = F_r \Phi = 4 \text{ kN} \quad (37)$$

Ukupna sila u vijku tada iznosi prema izrazu (12):

$$F_V = F_{pr} + F_{rV} = 40 \text{ kN} \quad (38)$$

Vlačno naprezanje u vijku prema izrazu (13) iznosi:

$$\sigma_V = \frac{F_V}{A_S} = 474,5 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{\text{dop}} \quad (39)$$

Budući da je vlačno naprezanje u vijku manje od dopuštenog naprezanja, zadovoljen je kriterij čvrstoće.

5.2 Proračun vijčanog spoja opterećenog dinamičkom aksijalnom radnom silom

Ako se postavi da prethodno određena dodatna sila u vijku $F_{rV} = 4 \text{ kN}$ predstavlja dinamičku silu u vijku, može se izvršiti kontrola dinamičke sigurnosti vijčanog spoja iz Pogl. 5.1.

Amplituda dinamičke čvrstoće navoja vijka R_a može se odrediti prema izrazu (20), odnosno:

$$R_a = 0,75 \cdot \left(\frac{180}{d} + 52 \right) = 50 \text{ N/mm}^2 \quad (40)$$

Dinamičko naprezanje koje proizvodi dinamička komponenta sile prema izrazu (19) iznosi:

$$\sigma_D = \pm \frac{F_{rV}}{2A_3} = \pm 26 \text{ N/mm}^2 < R_a \quad (41)$$

Postignuta dinamička sigurnost vijčanog spoja prema izrazu (21) iznosi:

$$S_D = \frac{R_a}{\sigma_D} = 1,92 > 1,5 \quad (42)$$

Budući da je dinamičko naprezanje manje od dinamičke čvrstoće, odnosno dinamička sigurnost vijčanog spoja veća je od preporučene vrijednosti, vijčani spoj zadovoljava u zadanim uvjetima opterećenja.

Dodatna sila u vijku F_{rV} radi kontrole dinamičke nosivosti vijka mora biti prema (22) unutar preporučene vrijednosti:

$$F_{rV} \leq 0,1 \cdot R_{p0,2} \cdot A_S = 5,4 \text{ kN} \quad (43)$$

Dodatna sila u vijku $F_{rV} = 4 \text{ kN}$ je prema tome manja od preporučene vrijednosti, što zadovoljava uvjet dinamičke nosivosti.

6. Zaključak

Izvršen je proračun čvrstoće prednapregnutog vijčanog spoja, opterećenog statičkom i dinamičkom aksijalnom radnom silom. U radu su prikazani načini određivanja ukupnih elastičnih karakteristika spoja pomoću krutosti ili podatljivosti, primjenom dva različita pristupa. Prema prikazanim rezultatima oni ne daju istu vrijednost ukupne elastične karakteristika spoja, odnosno prema tome se dobije različita ukupna sila u vijku. Stoga je usvojena elastična karakteristika spoja koja uključuje sve sudjelujuće dijelove u spoju. Provedena je analiza statičke i dinamičke čvrstoće vijčanog spoja sa slučaj najveće dopuštene sile u vijku.

Prikazani postupci mogu se koristiti kod proračuna drugih vijčanih spojeva koji se sastoje od npr. elastičnih (podatljivih) vijaka, koji se izvode sa smanjenim presjekom struka. U tome slučaju je potrebno prepraviti izraze za krutost ili podatljivost vijka, ovisno o pristupu koji se koristi. Ostatak proračuna čvrstoće trebao bi biti sličan prikazanoj proceduri.

Kod analize drugih konstrukcija ili spojeva u proračunu se mogu promijeniti parametri poput materijala i dopuštenih naprezanja. Drugi konstrukcijski oblici vijčanog spoja odnosno drugi položaj hvatišta radne sile (kada bi djelovala unutar podloge) zahtijevao bi drugu definiciju ukupne elastične karakteristike vijčanog spoja, radi druge raspodjele sile u nosivim elementima.

Popis literature i izvora

Bhandari, V. B. (2010). *Design of Machine Elements*. New Delhi: Tata McGraw Hill Education Private Limited

Budynas, R. G. i Nisbett, J. K. (2020). *Shigley's Mechanical Engineering Design*. New York: McGraw-Hill Education

Decker, K.-H. i Kabus, K. (2011). *Maschinenelemente*. München: Carl Hanser Verlag

Jelaska, D. (2005). *Elementi strojeva (skripta)*. Split: Sveučilište u Splitu, FESB

Kraut, B. (1997). *Krautov strojarski priručnik*. Zagreb: AXIOM

nHRN EN 1993-1-8:2008/NA (2013). Zagreb: Hrvatski zavod za norme (HZN)

Orlić, Ž. i Cvitković, J. (1992). *Prednapregnuti vijčani spojevi (skripta)*. Rijeka: Zavod za osnove konstruiranja, Tehnički fakultet

Abstract

This paper presents the strength analysis of a preloaded bolted joint loaded with an axial external force, which, depending on the mode of action, can be static or dynamic. The elastic characteristics of the bolt and the member, such as stiffness and compliance, have been determined using two different approaches, and the determination of the bolt preload based on the maximum allowable bolt force for a given strength class is presented. Based on the preload, the tightening torque is determined using a simplified engineering expression. A strength criterion was set for the external force adopted according to the recommended form, and the static stress was checked. When the same external force is applied dynamically, the dynamic safety is checked. The procedure was verified with an example, and appropriate conclusions were adopted.

Keywords: bolted joint; preload; strength analysis; static load; dynamic load