

Ispitna pitanja iz Metalnih konstrukcija 2 i odgovori

1. Zavrtnjevi (vrste, oblik i dimenzije, podela prema tačnosti izrade, metrički navoj)

Vrste zavrtnjeva

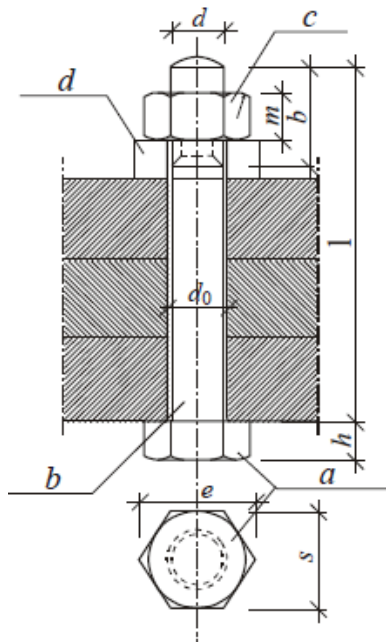
Prema kvalitetu materijala od koga se izvode mogu biti:

- obični zavrtnjevi
- visokovredni zavrtnjevi

Visokovredni zavrtnjevi mogu da budu:

- prednapregnuti
- neprednapregnuti

Oblik i dimenzije običnih zavrtnjeva



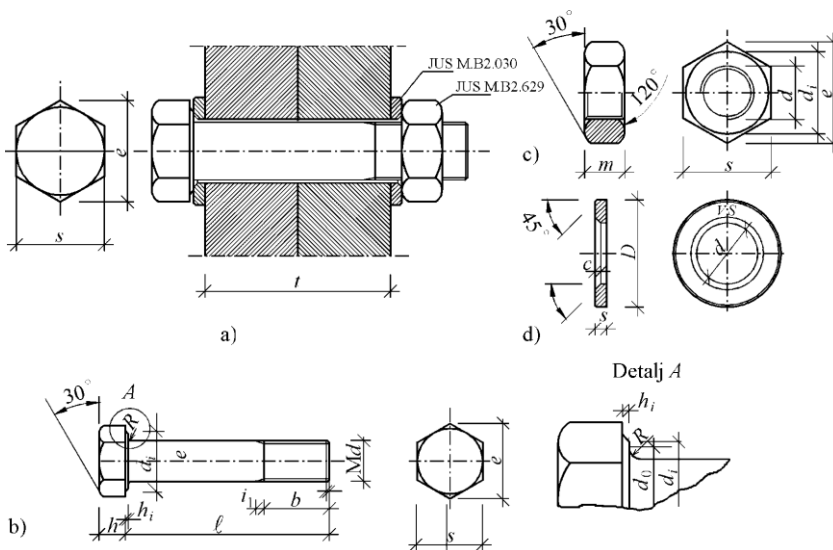
- a** šestougaona glava
- b** telo (vrat) zavrtnja
- c** navrtka
- d** podloška

Kod običnih zavrtnjeva podloška nije obavezna!

Zazor ($\Delta d = d_0 - d$) treba da bude:

- 1 mm za M12 i M14
- 2 mm za M16 M18 M 20 M22 i M24
- 3 mm za M27 i veće

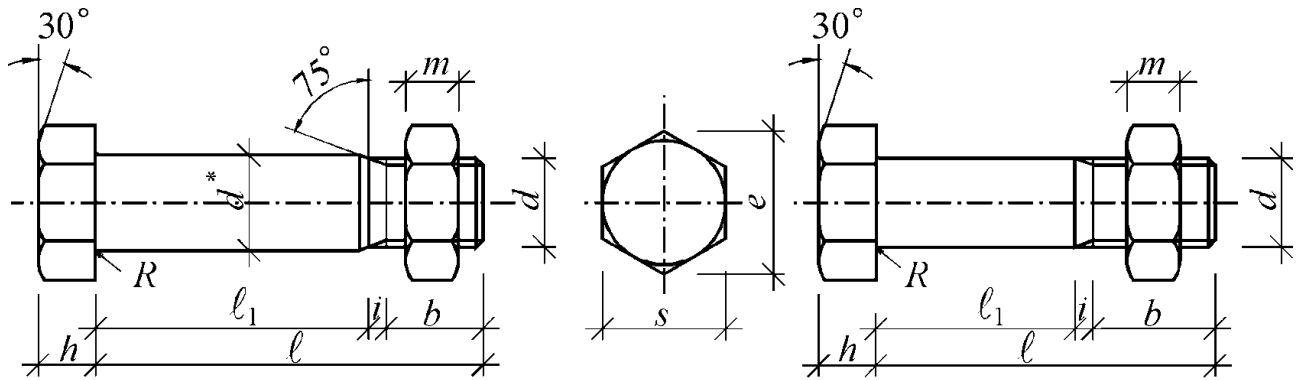
Oblik i dimenzije visokovrednih zavrtnjeva :



Gradjevinski zavrtnjevi nemaju navoj po celoj duzini jer to smanjuje nosivost. Kod zavrtnjeva klase čvrstoće 10.9 podloške su obavezne i ispod glave i ispod navrtke, dok kod klase 8.8 mora da se koristi podloška samo sa strane sa koje se vrši pritezanje (okretanje).

Podela prema tačnosti izrade

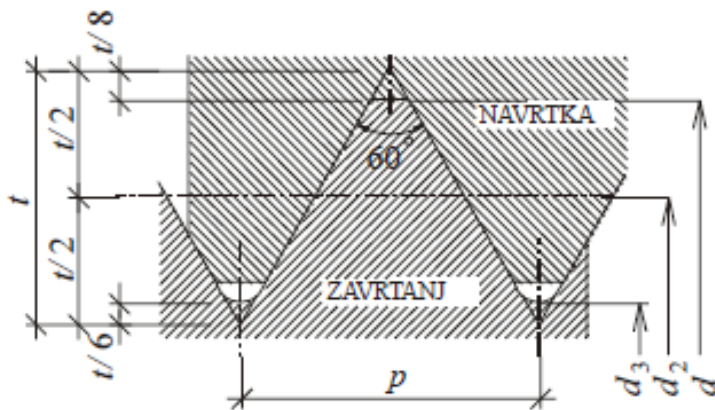
- **neobrađeni** (neupasovani) ili zavrtnjevi bez tačnog naleganja kod kojih je razlika između prečnika rupe i tela zavrtnja $\Delta d = d_0 - d \geq 1.0\text{mm}$
- **obrađeni** (upasovani) ili zavrtnjevi sa tačnim naleganjem, kod kojih se obradom na strugu postiže razlika između prečnika rupe i tela zavrtnja $\Delta d = d_0 - d \leq 0.3\text{mm}$



Kod obrađenih zavrtnjeva nominalni (nazivni) prečnik rupe mora da bude jednak prečniku zavrtnja!

Kod obrađenih zavrtnjeva nominalni prečnik tela (vrata) zavrtnja je veći od nominalnog prečnika dela sa navojem!

Metrički navoj i površina ispitnog preseka



d nominalni prečnik zavrtnja,

d_2 srednji prečnik navoja, $d_2 = d - 3/4t$

d_3 prečnik jezgra zavrtnja, $d_3 = d - 17/12t$

p korak navoja koji zavisi od prečnika zavrtnja (npr. za M12 $p=1,75$ mm),

t visina navoja koja zavisi od koraka navoja. $t = p/(2\tan 30^\circ)$

$A_s = \frac{\pi}{4} * \left(\frac{d_2+d_3}{2}\right)^2$ površina ispitnog preseka

Pored metričkog postoji i colovni navoj, ali kod nas nije zastupljen

2. Zavrtnjevi (označavanje, klase čvrstoće, prikazivanje na crtežima, ispitni presek)

Označavanje zavrtnjeva

Oznaka treba da sadrži informacije o:

- vrsti navoja (**M** ili "), ("=colovni navoj)
- prečniku zavrtnja (d),
- dužini zavrtnja (l),
- kvalitetu materijala od koga je izrađen (klasi čvrstoće)
- standardu po kome je zavrtnj izrađen.

Mdxl...k.č – (SRPS EN ISO 4017 ili SRPS EN 14399)

Primer: M20x100...5.6 – (SRPS EN ISO 4017)

Klase čvrstoće zavrtnjeva

Klasa čvrstoće definiše kvalitet čelika od kog su zavrtnjevi izrađeni, odnosno njegove mehaničke karakteristike:

- f_{ub} čvrstoća pri zatezanju
- f_{yb} granica razvlačenja.

Klasa čvrstoće se označava sa dva arapska broja razdvojena tačkom!

Značenje oznake klase čvrstoće

Broj na prvom mestu predstavlja stoti deo čvrstoće na zatezanje u MPa:

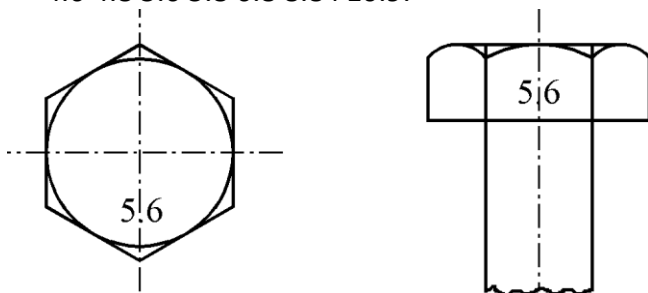
$$fu / 100$$

Broj na drugom mestu predstavlja desetostruki odnos granice razvlačenja i čvrstoće na zatezanje:

$$10 (fy / fu)$$

Zavrtnjevi se izrađuju u sledećim klasama čvrstoće:

4.6 4.8 5.6 5.8 6.8 8.8 i 10.9.



| Klasa čvrstoće | 4.6 | 4.8 | 5.6 | 5.8 | 6.6 | 8.8 | 10.9 |
|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| f_{yb} (N/mm ²) | 240 | 320 | 300 | 480 | 480 | 640 | 900 |
| f_{ub} (N/mm ²) | 400 | 400 | 500 | 500 | 600 | 800 | 1000 |

Prikazivanje zavrtnjeva na crtežima

Obični zavrtnjevi:

| Nazivni prečnik | M12 | M16 | M20 | M22 | M24 | M27 | M30 |
|------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Osnovne oznake za zavrtnjeve | | | | | | | |
| Obradjeni zavrtnjevi | | | | | | | |
| Montažni zavrtnjevi | | | | | | | |
| Montažne rupe i zavrtnjevi | | | | | | | |

Prednapregnuti visokovredni zavrtnjevi

| Vrsta zavrtnja | Zazor | M12 | M16 | M20 | M22 | M24 | M27 | M30 |
|---------------------------------|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Zavrtnjevi bez tačnog naleganja | $\Delta d \leq 1,0 \text{ mm}$ | | | | | | | |
| Zavrtnjevi sa tačnim naleganjem | $\Delta d \leq 0,3 \text{ mm}$ | | | | | | | |
| Dodatne oznake | | | | | | | | |
| Montažni zavrtnjevi | | | | | | | | |
| Montažne i rupe i zavrtnjevi | | | | | | | | |

3. Kategorije spojeva sa zavrtnjevima

Kategorije spojeva sa zavrtnjevima prema EC3:

Smičući spojevi

- **Kategorija A:** Spojevi kod kojih se opterećenje prenosi pritiskom po omotaču rupe i smicanjem zavrtnjeva
- **Kategorija B:** Spojevi otporni na proklizavanje pri graničnom stanju upotrebljivosti
- **Kategorija C:** Spojevi otporni na proklizavanje pri graničnom stanju nosivosti

Spojevi opterećeni na zatezanje

- **Kategorija D:** Spojevi sa neprednapregnutim zavrtnjevima
- **Kategorija E:** Spojevi sa prednapregnutim zavrtnjevima

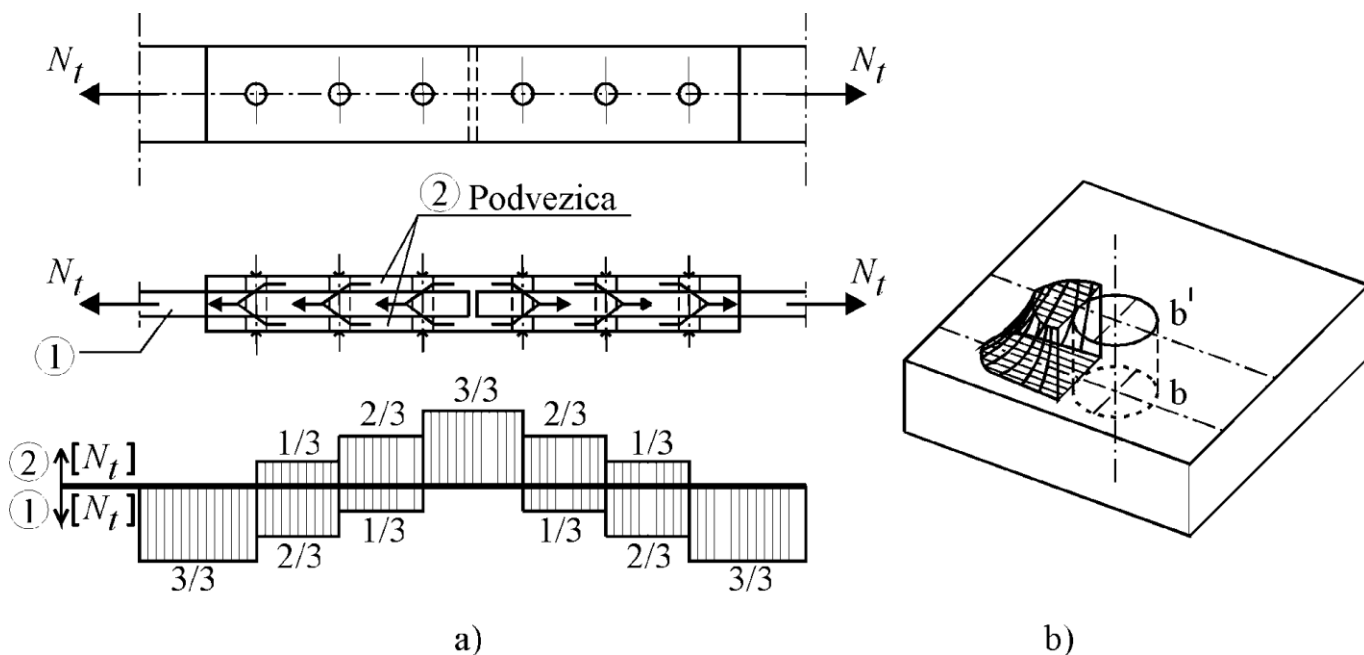
4. Ponašanje zavrtnjeva u smičućim spojevima

Kod veza sa zavrtnjima ostvaruje se diskontinualno spajanje elemenata konstrukcije preko određenog broja tacaka. U takvim vezama sila se iz jednog elementa prenosi u drugi pomocu zavrtnjeva. Ravnoteza sila u elementima veze se uspostavlja naprežanjem zavrtnjeva na pritisak po omotacu rupe. Kako su naprežanja usled pritiska po omotacu rupe uspravna na osu zavrtnjeva i suprotnih smerova, ona na mestu promene smera naprežanja, odnosno u ravni spoja (smicanja) izazivaju smicanje tela zavrtnja.

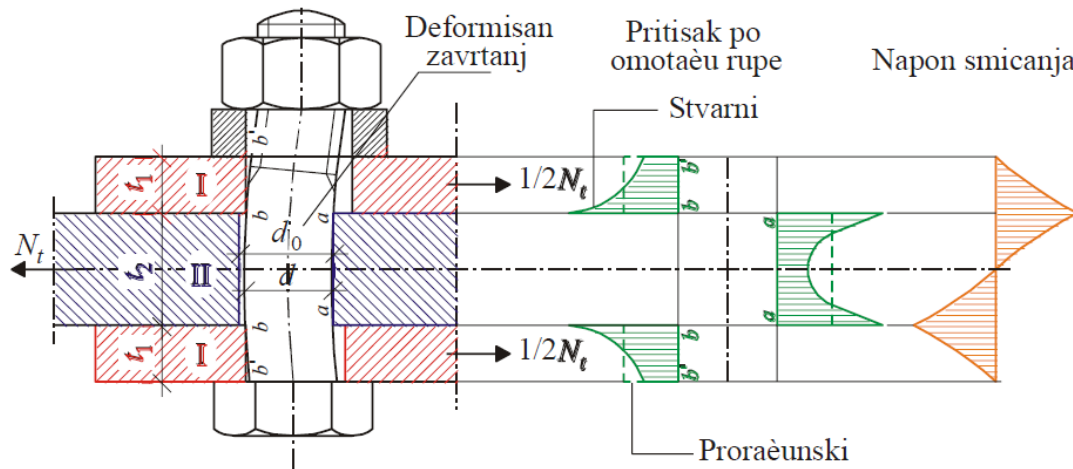
Sila deluje u tezistu elementa koji se povezuje (slika a). Na mestima zavrtnjeva, ona skrece ka tezistu drugog elementa u koji se prenosi smicanjem tela zavrtnja. Usled skretanja sile, neposredno uz ravan spoja, dolazi do povecanog napona pritiska po omotacu rupe, koji je zbog toga promenljiv po debljini lima. Osim toga, intenzitet ovog napona je promenljiv i u radialnom pravcu, pa stvarni dijagram napona ima oblik prikazan na slici b.

Ako se posmatra jedan zavrtnj moze se uociti da se prenosenje sile vrsi na sledeci nacin:

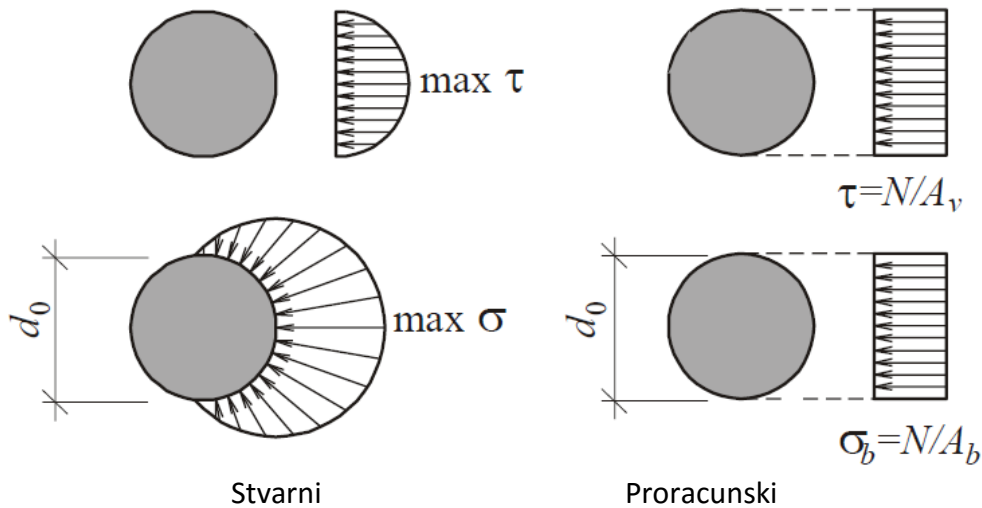
- Srednji element II vrsi pritisak po omotacu rupe na desnom delu tela zavrtnja preko površine a-a. Napon pritiska je promenljivog inteziteta duz zavrtnja.
- Sila prelazi u element I i vrsi pritisak po omotacu rupe na levoj strani tela zavrtnja preko površine b-b



Pri proračunu zavrtnjeva se, kao i u slučaju zakivaka usvaja konstantan raspored napona pritiska po omotaču rupe, kao i konstantan napon smicanja tela zavrtnja u ravni smicanja. Na taj način se značajno pojednostavljuje proračun, bez bitnih posledica na njegovu tačnost, a samim tim i na pouzdanost veze.



Stvarni i proračunski dijagram napona

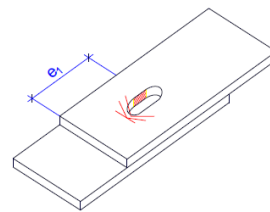


Kod veza izvedenih neobradjenim zavrtnjima, rupa je 1 ili 2 mm veća od tela zavrtnja. Zbog zazora između rupe i tela zavrtnja, svi zavrtnjevi ne mogu u isto vreme da ostvare kontakt sa limovima, usled čega se javlja savijanje zavrtnjeva u vezi.

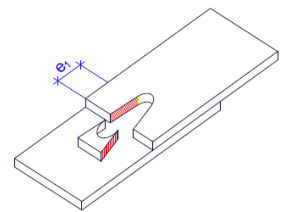
Vidovi loma kod smičućih spojeva

Postoje četiri potencijalna oblika loma:

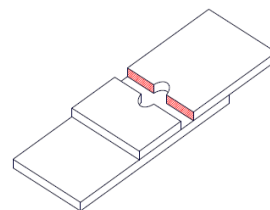
- Lom smicanjem tela zavrtnja;
- Lom gnječenjem omotača rupe;
- Lom neto preseka;
- Lom cepanjem lima.



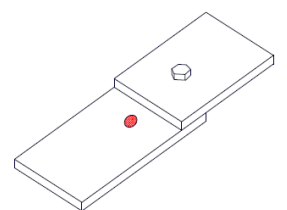
Lom gnječenjem omotača rupe



Lom cepanjem lima



Lom neto preseka



Lom smicanjem zavrtnja

Kontrole nosivost zavrtnjeva u smičućim spojevima

| Kategorija | Kriterijumi | Napomene |
|--|--|--|
| A –Spojevi kod kojih se opterećenje prenosi pritiskom po omotacu rupe | $F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$ | Ne zahteva se prednaprezanje. Koriste se zavrtnjevi klasa čvrstoća 4.6 do 10.9 |
| B –Spojevi otporni na proklizavanje pri granicnom stanju upotrebljivosti | $F_{v,Ed,ser} \leq F_{s,Rd,ser}$ $F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$ | Koriste se prednapregnuti zavrtnjevi klase čvrstoće 8.8 i 10.9 |
| C –Spojevi otporni na proklizavanje pri granicnom stanju nosivosti | $F_{v,Ed} \leq F_{s,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$ $\sum F_{v,Ed} \leq N_{net,Rd}$ | Koriste se prednapregnuti zavrtnjevi klase čvrstoće 8.8 i 10.9 |

$F_{v,Rd}$ – Proracunska nosivost na smicanje

$F_{b,Rd}$ – Proracunska nosivost na pritisak po omotacu rupe

$F_{s,Rd,ser}$ – Nosivost na trenje (proklizavanje) pri SLS

$\sum F_{v,Ed} \leq N_{net,Rd}$ – Zbir sila u spoju mora da bude manji od nosivosti na zatezanje.

$F_{s,Rd}$ – Proracunska nosivost na proklizavanje pri ULS

$F_{v,Rd}$ – Proracunska sila smicanja u zavrtnju

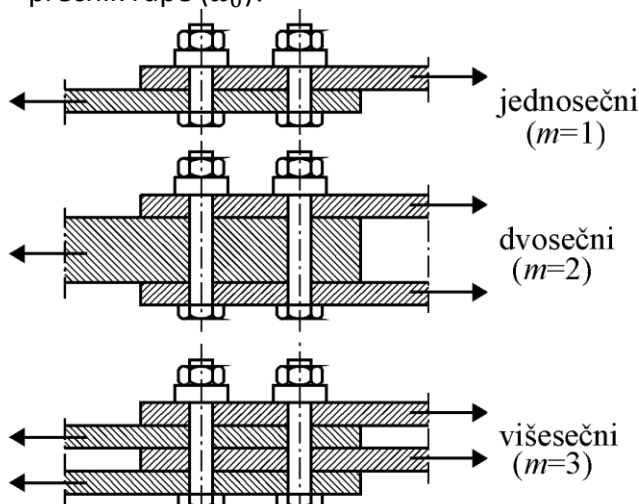
5. Nosivost zavrtnjeva na smicanje

Nosivost zavrtnjeva na smicanje - $F_{v,Rd}$

$$F_{v,Rd} = m \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{m2}}$$

- kada ravan smicanja **prolazi** kroz deo zavrtnja sa navojem:
 - A je površina ispitnog preseka zavrtnja A_s :
 - $\alpha_v = 0,6$ za klase čvrstoće 4.6, 5.6 i 8.8
 - $\alpha_v = 0,5$ za klase čvrstoće 4.8, 5.8, 6.8 i 10.9
- kada ravan smicanja **ne prolazi** kroz deo zavrtnja sa navojem:
 - A je površina bruto preseka zavrtnja ($A = d^2\pi/4$)
 - $\alpha_v = 0,6$ za sve klase čvrstoće
 - f_{ub} čvrstoća pri zatezanju zavrtnja;
 - γ_{m2} parcijalni koeficijent sigurnosti ($\gamma_{m2} = 1,25$);

Kod obrađenih zavrtnjeva, pri određivanju površine A , umesto prečnika zavrtnja (d) treba uzeti prečnik rupe (d_0)!



6. Nosivost zavrtnjeva na pritisak po omotaču rupe

Nosivost na pritisak po omotaču rupe - $F_{b.Rd}$

$$F_{b.Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_u d t}{\gamma_{m2}}$$

t debljina lima

d prečnik zavrtnja

f_u čvrstoća pri zatezanju (osnovnog materijala)

γ_{m2} parcijalni koeficijent sigurnosti ($\gamma_{m2}=1,25$)

$$\alpha_b = \min\left(\alpha_d; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1\right)$$

U pravcu prenosnja opterećenja:

$\alpha_d = e_1/3d_0$ za zavrtnjeve u krajnim redovima

$\alpha_d = \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}$ za zavrtnjeve u unutrašnjim redovima

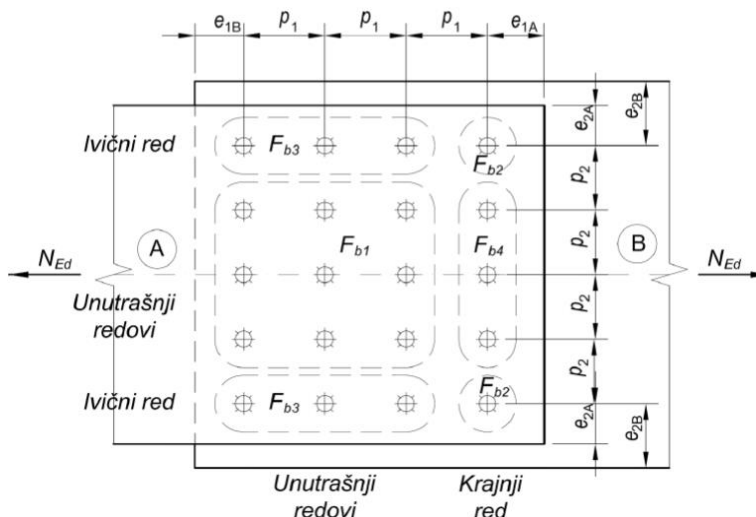
Upravno na pravac prenosnja sile:

$k_1 = \min\left(2.8 \frac{e_2}{d_0} - 1.7; 2.5\right)$ za zavrtnjeve u ivičnim redovima (za $e_2 \geq 1.5d_0 \rightarrow k_1 = 2.5$)

$k_1 = \min\left(1.4 \frac{p_2}{d_0} - 1.7; 2.5\right)$ za zavrtnjeve u unutrašnjim redovima (za $p_2 \geq 3d_0 \rightarrow k_1 = 2.5$)

Nosivost grupe zavrtnjeva na pritisak po omotaču rupe

- Zbog geometrije veze nosivost na pritisak po omotaču rupe nije ista za sve zavrtnjeve u spoju!
- Nosivost na pritisak po omotaču rupe treba posebno da se provjeri za svaki lim koji se nalazi u smičućem spoju!
- Ako je nosivost zavrtnja na smicanje $F_{v.Rd}$ veća ili jednaka od nosivosti na pritisak po omotaču rupe svakog pojedinačnog zavrtnja ($F_{bi.Rd}$), nosivost grupe zavrtnjeva na pritisak po omotaču rupe može da se odredi kao zbir proračunskih nosivosti pojedinačnih zavrtnjeva ($\sum F_{bi.Rd}$). U suprotnom, nosivost grupe zavrtnjeva (zakivaka) na pritisak po omotaču rupe treba da se odredi kao broj zavrtnjeva (n) pomnožen najmanjom nosivošću pojedinačnog zavrtnja ($\min F_{bi.Rd}$).



Grupa 1: Unutrašnji zavrtnjevi F_{b1} ($\alpha_{d,1}$, $k_{1,1}$)

Grupa 2: Ugaoni zavrtnjevi F_{b2} ($\alpha_{d,2}$, $k_{1,2}$)

Grupa 3: Unutrašnji ivični zavrtnjevi F_{b3} ($\alpha_{d,1}$, $k_{1,2}$)

Grupa 4: Krajnji unutrašnji zavrtnjevi F_{b4} ($\alpha_{d,2}$, $k_{1,1}$)

Proračun nosivosti grupe zavrtnjeva na pritisak po omotaču rupe:

$$F_{v.Rd} \geq \max(F_{b1}, F_{b2}, F_{b3}, F_{b4}) \rightarrow F_{b.Rd} = n_1 F_{b1} + n_2 F_{b2} + n_3 F_{b3} + n_4 F_{b4}$$

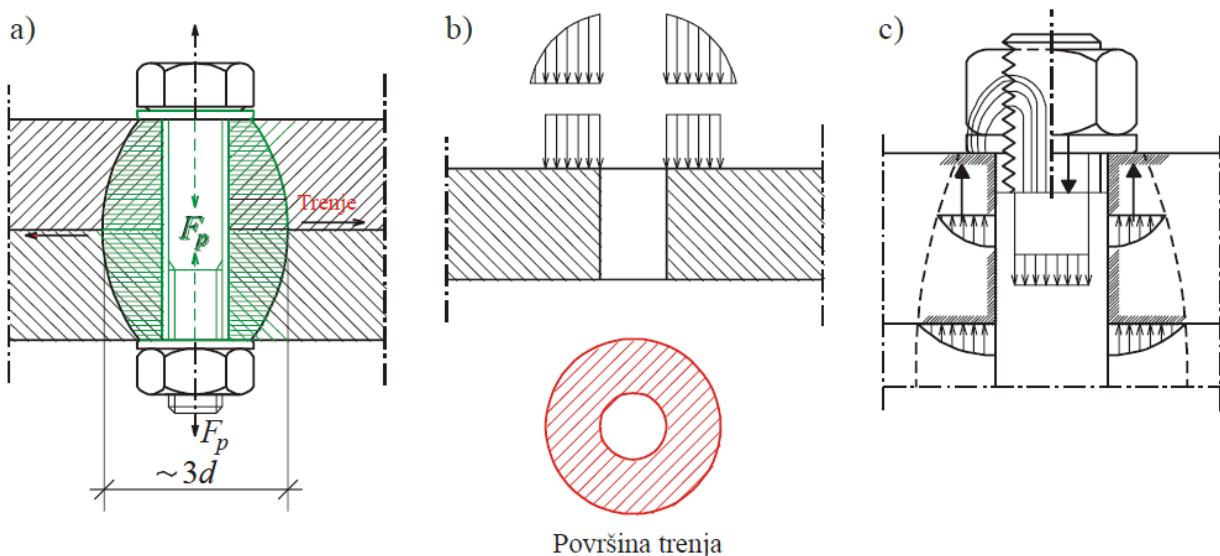
$$F_{v.Rd} < \max(F_{b1}, F_{b2}, F_{b3}, F_{b4}) \rightarrow F_{b.Rd} = n \min(F_{b1}; F_{b2}; F_{b3}; F_{b4})$$

7. Ponašanje prednapregnutih zavrtnjeva u smičućim spojevima

- Osnovni problem kod veza sa običnim zavrtnjevima je zazor između tela zavrtnja i rupe.
- Deformacije veza sa običnim zavrtnjevima su relativno velike zbog poništenja zazora.
- Obični zavrtnjevi nisu pogodni za veze u dinamički opterećenim konstrukcijama.
- Prednaprežanjem se u zavrtnjevima javlja sila zatezanja, a u kontaktnom spoju napon pritiska;
- Prenošenje sila se ostvaruje trenjem;
- Sila trenja između limova zavisi od napona pritiska i hrapavosti (trenja) kontaktnih površi;
- Koncentracija napona u neto preseku je manja nego kod veza sa neprednapregnutim zavrtnjevima;

Tok sila kod prednapregnutih zavrtnjeva:

Sila zatezanja koja se unosi u zavrtnanj prednaprežanjem, izaziva pritisak u elementima između glave i navrtke zavrtnja (slika a). Na površinama elemenata, ispod podlozних pločica, javljaju se veliki kontaktni naponi pritiska (slika b). Ovaj napon se rasprostire kroz elemente spoja i širi se pod određenim uglom, tako da u sredini debljine paketa veze deluje na kružnoj površi čiji je prečnik približno jedna $3d$. Intenzitet ovog napona pritiska se menja i radijalno u odnosu na zavrtnanj, a svoj maksimum doseže neposredno uz zavrtnanj (slika c). Na kontaktu između dva elementa usled napona pritiska javlja se sila trenja, koja prihvata smicu sile i sprečava međusobno pomeranje elemenata u spoju. Na taj način se, aktiviranjem sile trenja, smicuca sila iz jednog elementa prenosi u drugi. To je sustinska razlika u radu tarnih u odnosu na smicuće spojeve kod kojih se sila smicanja prihvata smicanjem zavrtnjeva i pritiskom po omotacu rupe.



8. Nosivost prednapregnutih zavrtnjeva na proklizavanje

Nosivost zavrtnjeva na proklizavanje - $F_{s.Rd}$

$$F_{s.Rd} = \frac{k_s n \mu}{\gamma_{m3}} F_{p.C}$$

n – broj tarnih ravni

μ – koef. Trenja za tarne površi

$F_{p.C}$ – sila pritezanja zavrtnja

γ_{m3} – parcijalni koef. sigurnosi

k_s – koef. koji zavisi od velicine i tipa rupa za zavrtnjeve

Sila pritezanja zavrtnja - $F_{p.C}$

$$F_{p.C} = 0.7 f_{ub} A_s$$

Vrednosti sile pritezanja standardnih zavrtnja klase čvrstoće 8.8 i 10.9 $F_{p.C}$ [kN] su prikazane u tabeli:

| | | Precnik zavrtnja | | | | | | | |
|-----------------------|------|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | M12 | M16 | M20 | M22 | M24 | M27 | M30 | M36 |
| A_s mm ² | | 84.3 | 157 | 245 | 303 | 353 | 459 | 561 | 817 |
| Fp.C | 8.8 | 47 | 88 | 137 | 170 | 198 | 257 | 314 | 458 |
| | 10.9 | 59 | 110 | 172 | 212 | 247 | 321 | 393 | 572 |

Kontrolisano unošenje sile pritezanja (prednaprezanja) zavrtnja se ostvaruje pomoću: momentnog ključa, momentnog impulsa, indikatorske podloške, merenja ugla obrtanja...

Merenje momenta uvrtnja momentnim ključem

$$M_u = F_{p.C} * d * k$$

M_u moment uvrtnja

$F_{p.C}$ sila prednaprezanja

d prečnik zavrtnja

k koeficijent trenja između navrtke i navoja zavrtnja (0,13-0,17)

9. Nosivost zavrtnjeva na zatezanje

Nosivost zavrtnjeva na zatezanje

Zavisí od kvaliteta materijala (f_{ub}) i dimenzije zavrtnja, odnosno površine ispitnog preseka (A_s).

$$F_{t.Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{m2}}$$

$k_2 = 0.63$ za zavrtnjeve sa uspustenom glavom

$k_2 = 0.9$ u ostalim slučajevima

$$F_{t.Rd} = \frac{0.9 f_{ub} A_s}{\gamma_{m2}}$$

Nosivost na zatezanje je ista za kategorije D i E!

Nosivost na zatezanje je ista za obrađene i neobrađene zavrtnjeve!

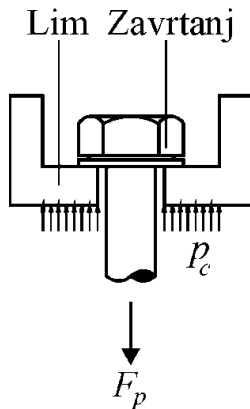
Prednosti spojeva kategorije E

- Spojevi kategorije E sa prednapregnutim zavrtnjevima se koriste kod dinamički opterećenih konstrukcija.
- Deformabilnost veze je znatno manja.
- Smanjuju se naponske razlike u zavrtnjevima, što je povoljno sa stanovišta zamora materijala.
- Sprečava se nekontrolisano odvrtnje zavrtnjeva.
- Kod zategnutih spojeva nije potrebna obrada površina!

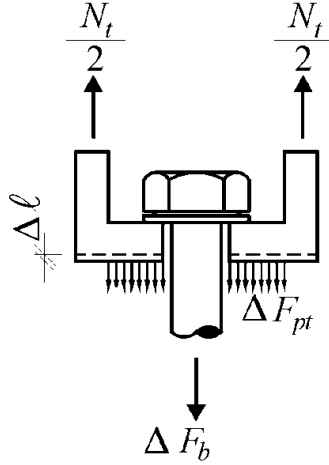
10. Ponašanje prednapregnutih zavrtnjeva u zatežućim spojevima

Prednapregnuti visokovredni zavrtnjevi su zbog velike nosivosti, a narocito zbog male deformabilnosti spoja, najpovoljnija spojna mehanicka sredstva za prijem sile zatezanja.

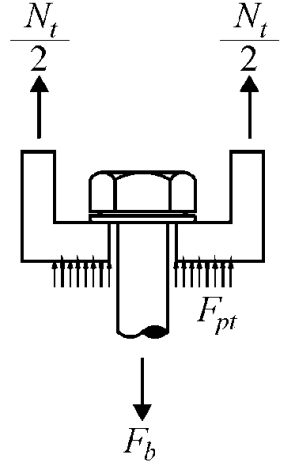
Prednaprezanje



Zatezanje



Odlepljivanje



Prednaprezanjem se u zavrtnju javlja sila zatezanje (F_p), a u spoju kontaktni napon pritiska (p_c). Iz uslova ravnoteze sila moze se napisati da je : $F_p = F_c = \int_A p_c dA$, gde je A deo kontaktne površine na kojoj se javlja pritisak. Kad spoljaska sila zatezanja (N_t) deluje na prednapregnuti spoj (slika b) ona nastoji da "odlepi" elemente spoja i izaziva istovremeno smanjenje kontaktne sile pritiska u limu (ΔF_{pt}) i povecanje sile zatezanja u zavrtnju (ΔF_b). Iz uslova ravnoteze i kompatibilnosti pomeranja moze da se odredi dodatne sile zatezanja koja se javlja u zavrtnju:

$$\Delta F_b = N_t / (1 - \frac{K_{pt}}{K_b}), \text{ gde su :}$$

K_{pt} –krutost lima na pritisak

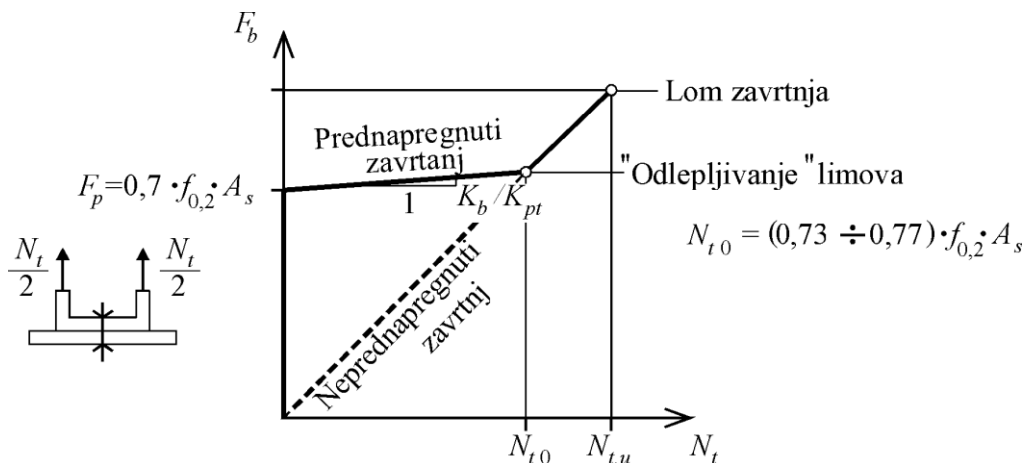
K_b –krutost zavrtnja na zatezanje

$$N_t = N_{t0} \approx (0.73 - 0.77) f_{ub} A_s$$

$$\frac{K_{pt}}{K_b} \approx 15 - 20$$

Nakon odlepljivanja dodatnu silu zatezanja prihvataju samo visokovredniji zavrtnanj, jer je potpuno ponisten kontakti pritisak izmedju limova u spoju. Prema tome, za sile zatezanja koje su vece od sile "odlepljivanja" ($N_t > N_{t0}$) prednapregnuti zavrtnjevi se ponasaju isto kao i neprednapregnuti, pa im je i granicna nosivost ista, naravno pod uslovom da su izradjeni od materijala istog kvaliteta.

Poređenje prednapregnutih i neprednapregnutih zavrtnjeva u spojevima opterećenim na zatezanje (kategorije spojeva D i E)



Nosivost zavrtnjeva u spojevima kategorije D i E na zatezanje je ista!

Razlika je u deformabilnosti spoja i naponskim razlikama u zavrtnju usled spoljašnjeg opterećenja.

(umesto $f_{0,2}$ treba da stoji f_{ub})

11. Nosivost na probijanje lima ispod glave ili navrtnje zavrtnja u zatežućem spoju

Nosivost na probijanje smicanjem lima ispod glave ili navrtke zavrtnja – $B_{p,Rd}$

$$B_{p,Rd} = \frac{0.6\pi d_m t_p f_u}{\gamma_{m2}}$$

t_p debljina lima ispod glave zavrtnja ili navrtke (usvaja se manja vrednost)

d_m srednja vrednost prečnika opisanog i upisanog kruga glave zavrtnja ili navrtke (usvaja se manja vrednost)

f_u čvrstoća pri zatezanju, osnovnog materijala;

γ_{m2} parcijalni koeficijent sigurnosti ($\gamma_{m2}=1,25$)

Može da bude merodavna kod spoljašnjih limova male debljine!

12. Kombinovano naprezanje zavrtnjeva

Kod zavrtnjeva koji su istovremeno opterećeni na smicanje i zatezanje pored pojedinačnih kontrola nosivosti na smicanje i zatezanje potrebno je proveriti i interaktivno dejstvo smicanja i zatezanja!

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1.4F_{t,Rd}} \leq 1.0$$

$F_{v,Ed}$ proračunska vrednost sile smicananja u zavrtnju;

$F_{t,Ed}$ proračunska vrednost sile zatezanja u zavrtnju;

$F_{v,Rd}$ proračunska nosivost zavrtnja na smicanje;

$F_{t,Rd}$ proračunska nosivost zavrtnja na zatezanje;

Kombinovano naprezanje prednapregnutih zavrtnjeva

Spojevi kategorije B:

$$F_{s,Rd,ser} = \frac{k_s n \mu (F_{p.C} - 0.8 F_{t,Ed,ser})}{\gamma_{m3,ser}}$$

Spojevi kategorije C:

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s n \mu (F_{p.C} - 0.8 F_{t,Ed})}{\gamma_{m3}}$$

$F_{t,Ed}$ proračunska vrednost sile zatezanja u zavrtnju za ULS

$F_{t,Ed,ser}$ proračunska vrednost sile zatezanja u zavrtnju za SLS

$F_{s,Rd}$ proračunska nosivost zavrtnja na proklizavanje pri ULS

$F_{s,Rd,ser}$ proračunska nosivost zavrtnja na proklizavanje pri SLS

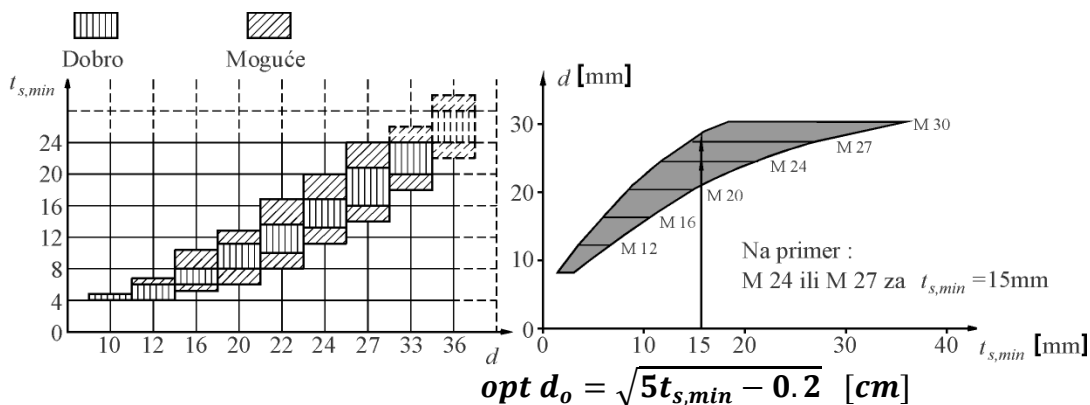
$F_{p.C}$ sila pritezanja

$\gamma_{m3}=1,25$ parcijalni koeficijent za ULS

$\gamma_{m3,ser}=1,10$ parcijalni koeficijent za SLS

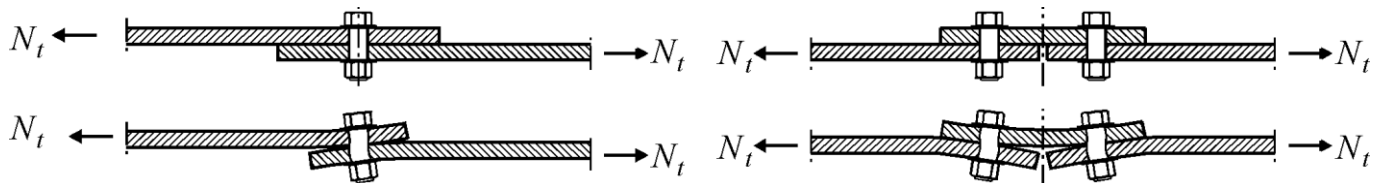
13. Konstruisanje veza sa zavrtnjevima

- Veze treba da budu simetrične;
- Na jednom delu poprečnog preseka (nožica ili rebro) se koriste zavrtnjevi istog prečnika;
- Preporučuje se da rastojanje između prvog i poslednjeg zavrtnja u preavcu delovanja sile ne bude veće od $15d$ (maksimum 6 zavrtnjeva u jednom redu); U suprotnom se redukuje nosivost!
- Krajnja i ivična rastojanja, kao i međusobni razmaci zavrtnjeva treba da budu u okviru propisanih granica;
- Minimalan zavrtnanj je M12 (Kod tankozidnih HOP min M6);
- Veze na preklop sa jednim zakivkom nisu dopuštene;
- Kod veza na preklop sa jednim redom zavrtnjeva obavezne su podloške i ispod glave i ispod navrtke, a nosivost na pritisak po omotaču rupe se redukuje ($F_{b,Rd} = 1,5tdf_u/\gamma_{m2}$)!
- Pravilnim izborom precnika zavrtnja dobija se uravnotežen odnos nosivosti na smicanje i pritisak po omotacu rupe.



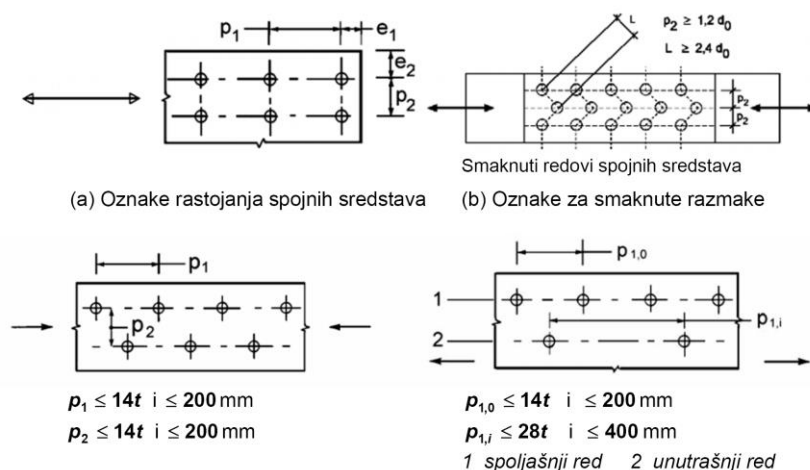
$$6.324 \sqrt{\frac{t_{s,min}}{1 + 0.3} - 1} \leq d \leq 6.324 \sqrt{\frac{t_{s,min}}{1 - 0.3} - 1}$$

Veze na preklop sa jednim zavrtnjem



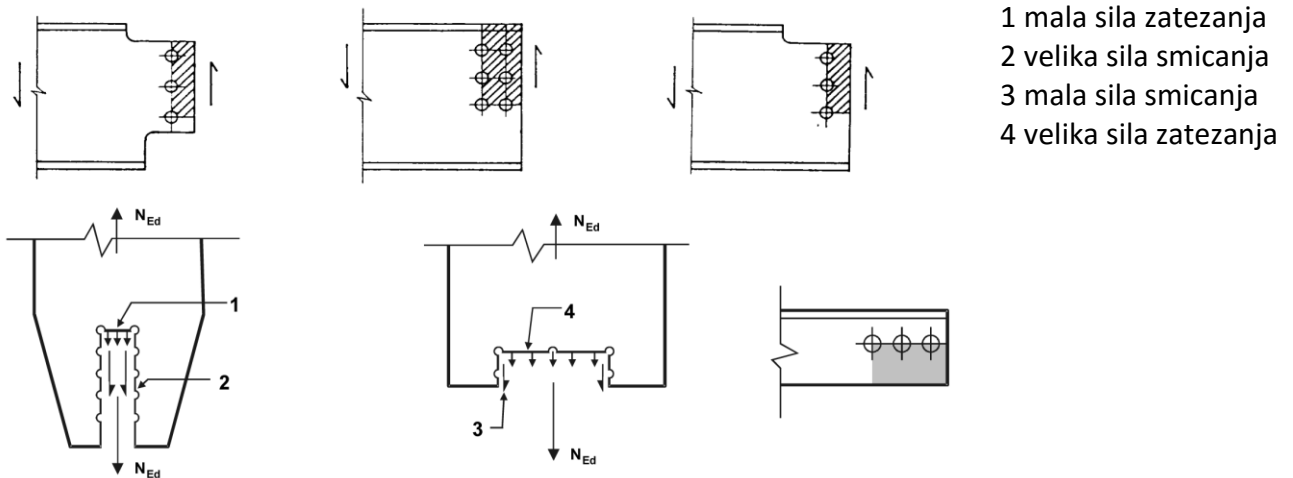
Usled ekscentričnosti dolazi do savijanja spojnog sredstva!
Pored smicanja i savijanja u zavrtnju se javlja i zatezanje!

Raspored zavrtnjeva u vezi – označavanje



14. Nosivost na cepanje bloka

Cepanje (kidanje) osnovnog materijala se javlja na mestu veze ostvarene pomoću grupe zavrtnjeva, koja se nalazi uz ivicu elementa opterećenog smicanjem i/ili zatezanjem! Karakteristično je za zglobne veze nosača, kao i za veze zategnutih elemenata.



Nosivost na cepanje bloka

Za simetrične grupe zavrtnjeva izložene centričnom opterećenju:

$$V_{eff,1,Rd} = \frac{f_u A_{nt}}{\gamma_{m2}} + \frac{\left(\frac{f_y}{\sqrt{3}}\right) A_{nv}}{\gamma_{m0}}$$

Za grupe zavrtnjeva izložene ekscentričnom opterećenju:

$$V_{eff,2,Rd} = \frac{0.5 f_u A_{nt}}{\gamma_{m2}} + \frac{\left(\frac{f_y}{\sqrt{3}}\right) A_{nv}}{\gamma_{m0}}$$

A_{nt} neto površina izložena zatezanju,

A_{nv} neto površina izložena smicanju,

f_y granica razvlačenja osnovnog materijala,

f_u čvrstoća pri zatezanju, osnovnog materijala.

15. Zavarivanje (definicija, primena, prednosti i nedostaci, osnovni pojmovi)

Šta je zavarivanje?

- Tehnološki postupak spajanja istih ili sličnih metala;
- Na visokim temperaturama tope se osnovni i dodatni materijal, dolazi do njihovog mešanja i sjedinjavanja (fizičkog i hemijskog);
- Hladjenjem ove mešavine dolazi do očvršćavanja i nastaje šav kao materijalni kontinuitet;
- Zavarivanjem nastaje kontinualan spoj;

Primena zavarivanja u građevinskim konstrukcijama

- Izrada osnovnih elemenata konstrukcije (I, U, L-profil, sandučasti profili, kružni profili...);
- Izrada sklopova specifičnih konstrukcija (ortotropne ploče kod mostova,...);
- Izrada veza između elemenata konstrukcije; (samostalno ili u kombinaciji sa zavrtnjevima)
- Ojačanje elemenata konstrukcije (adaptacije i sanacije);

Prednosti zavarivanja

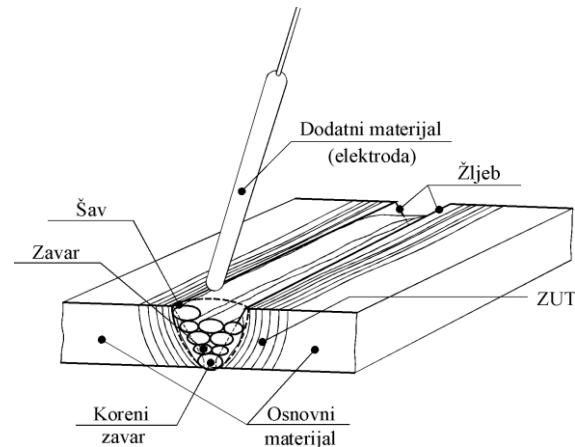
- Materijalan kontinuitet (pravilan tok sila);
- Smanjenje ukupne težine konstrukcije (lakše veze, mogućnost variranja debljine elemenata);
- Brza izrada u radionici (nema bušenja);
- Nema slabljenja elemenata rupama za spojna sredstva;
- Manja deformabilnost veza, a samim tim i konstrukcije;
- Velike mogućnosti konstrukcijskog oblikovanja;
- Vodonepropusnost spojeva
- Estetski aspekt;

Nedostaci

- Kvalifikovana radna snaga;
- Kontrola kvaliteta spojeva u radionici i na gradilištu;
- Osetljivost na klimatske uslove na gradilištu (temperatura, vetar);
- Veća osetljivost na dejstvo požara;
- Zavarene veze nisu montazno-demontazne;

Osnovni pojmovi

- Osnovni materijal;
- Dodatni materijal (elektroda ili zica);
- Spoj – međusobni položaj delova koji se spajaju;
- Šav – materijalizovano mesto spajanja;
- ZUT – Zona Uticaja Toplote;
- Žljeb – prostor u koji se deponuje dodatni materijal;
- Zavar – deo sava dobijen topljenjem dodatnog materijala u jednom prolazu



16. Zavarivanje (osnovni principi pri projektovanju, vrste spojeva i vrste šavova)

Osnovni principi pri projektovanju

- Veze i nastavci jednostavni za izvodjenje (pre svega izvodljivi!);
- Izbegavati teške položaje zavarivanja (manja efikasnost, lošiji kvalitet);
- Racionalan izbor kontrole kvaliteta zavarenih spojeva;

Vrste spojeva:

- sučeoni spojevi;
- ugaoni ili T spojevi;
- preklopni spojevi

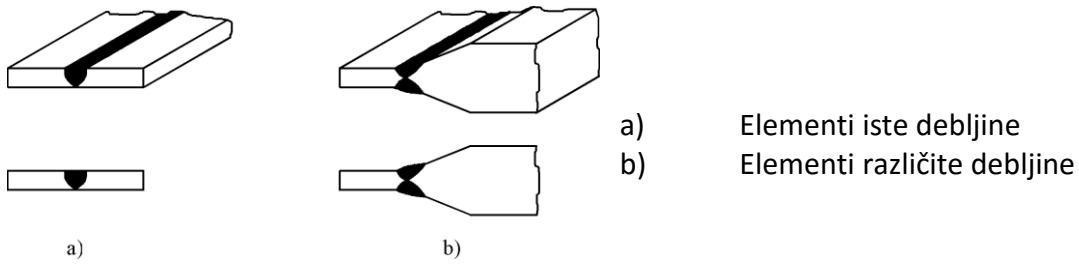
Vrste šavova

- **Sučeoni šavovi** sa punom penetracijom;
- Sučeoni šavovi sa delimičnom penetracijom;
- **Ugaoni šavovi**;
- Šavovi u rupama;
- Čep šavovi;
- Uzljebljeni šavovi;

17. Osnovni elementi sučeonog šava – funkcija i oblik žljeba

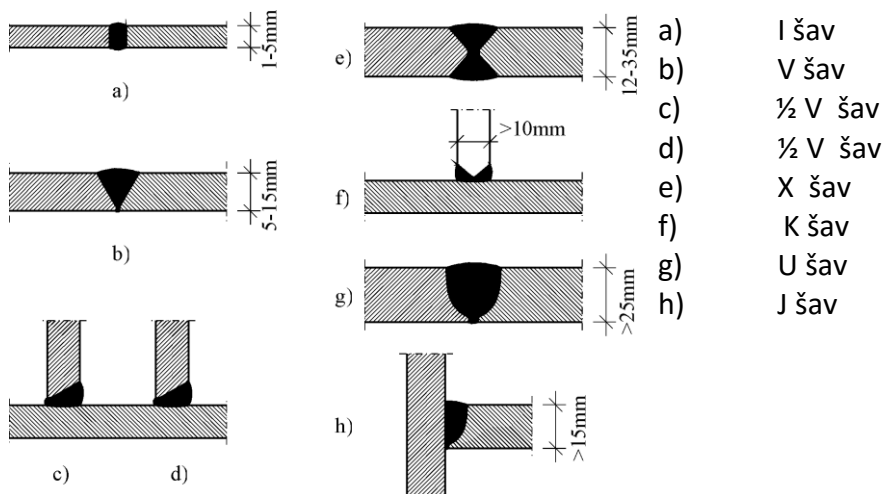
Sučeoni spojevi

Elementi koji se spajaju leže u istoj ravni!

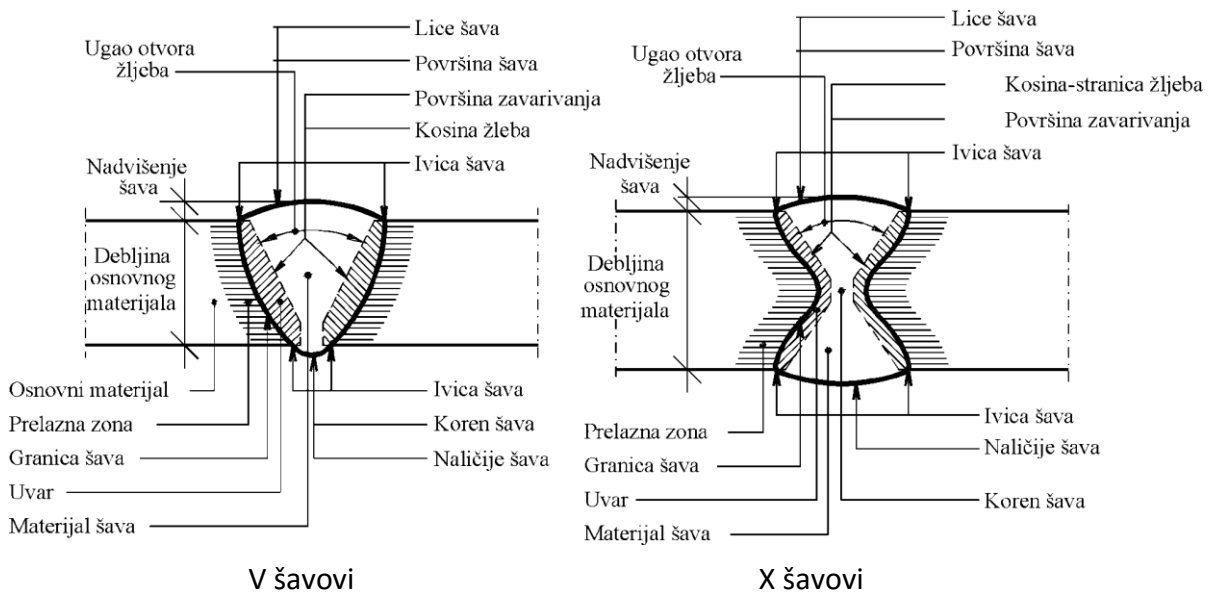


Vrste sučeonih šavova

- I šavovi – bez obrade ivica, $t = 1-5$ mm,
- V i 1/2V šavovi, $t = 5-15$ mm,
- X šavovi – dvostruki V šavovi, $t = 12-35$ mm,
- K šavovi – ugaoni spojevi, $t > 10$ mm,
- U šavovi – posebna obrada, $t > 25$ mm,
- J šavovi – ugaoni spojevi, $t > 15$ mm.



Osnovni elementi sučeonog šava



Funkcija žljeba kod sučeonih šavova

- Da omogući pristup elektrodi po čitavoj debljini lima;
- Da omogući topljenje osnovnog materijala u zoni šava;
- Da formira korito za deponovanje mešavine osnovnog i dodatnog materijala;

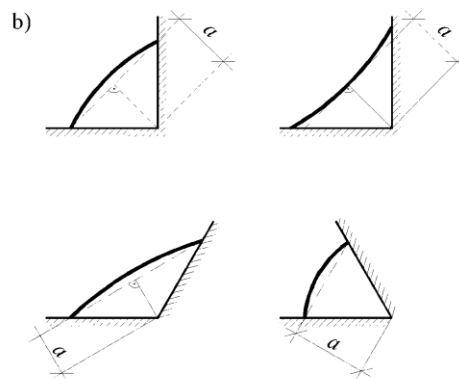
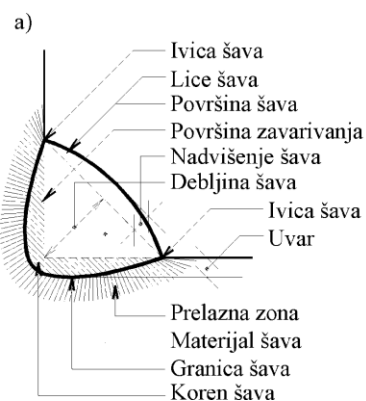
Oblik i dimenzije žljeba zavise od:

- vrte sava
- postupka zavarivanja
- položaja zavarivanja

18. Osnovni elementi ugaonog šava – minimalne i maksimalne dimenzije

Ugaoni šavovi

- Nije potrebna posebna obrada ivica → jeftiniji su od sučeonih;
- Primjenjuju se kod ugaonih i preklopnih spojeva;
- Ugao između elemenata koji se spajaju treba da bude između 60° i 120°.
- Dodatni materijal se deponuje u korito koje obrazuju elementi (limovi) koji se spajaju;
- Tok sila je drugačiji nego kod sučeonih šavova;
- Drugačiji postupak proračuna;
- Mogu biti kontinualni ili isprekidani;



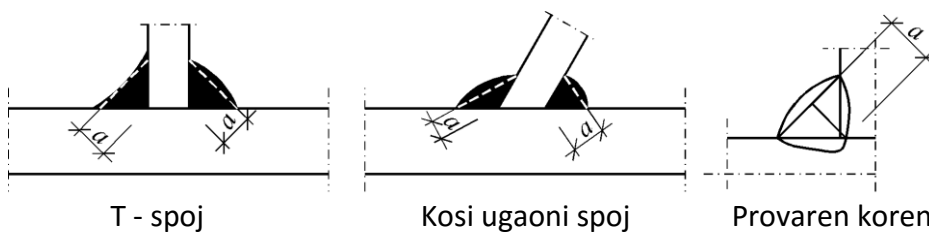
Debljina ugaonog šava jednaka je visini najvećeg trougla koji se može upisati u telo šava!

Debljina ugaonih šavova

Minimalna debljina ugaonog šava je: $a_{min} = 3 \text{ mm}$

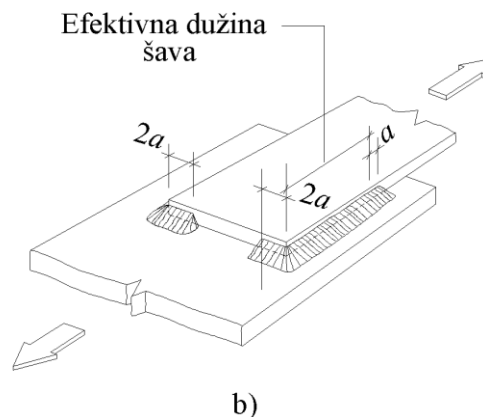
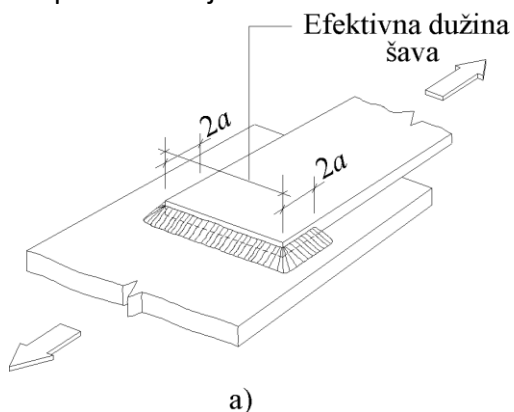
Debljina ugaonog šava ne treba da bude veća od $0,7t_{min}$. U izvesnim slučajevima kod spojeva čelika veće čvrstoće (S420 i S460) od kojih se zahteva nosivost veća ili jednaka od nosivosti elementa koji se spaja može se usvojiti veća debljina ugaonih šavova;

Kod veza šupljih profila debljina ugaonog šava može da bude jednaka debljini zida profila $a = t_{min}$.



Efektivna dužina ugaonih šavova

U opštem slučaju: $l'_w = b - 2a$



Minimalna dužina šava je: $l_{w.min} = \max(6a, 30\text{mm})$

Maksimalna dužina šava je: $l_{w.max} = 150a$

ektivna površina savova je: $A_w = \sum a \cdot l_{eff}$

19. Postupci zavarivanja, označavanje šavova u tehničkoj dokumentaciji

Prema izvoru toplotne energije dele se na:

- elektrotermičke,
- termohemijske,
- mehaničke i
- ostale

Obeležavanje šavova u tehničkoj dokumentaciji

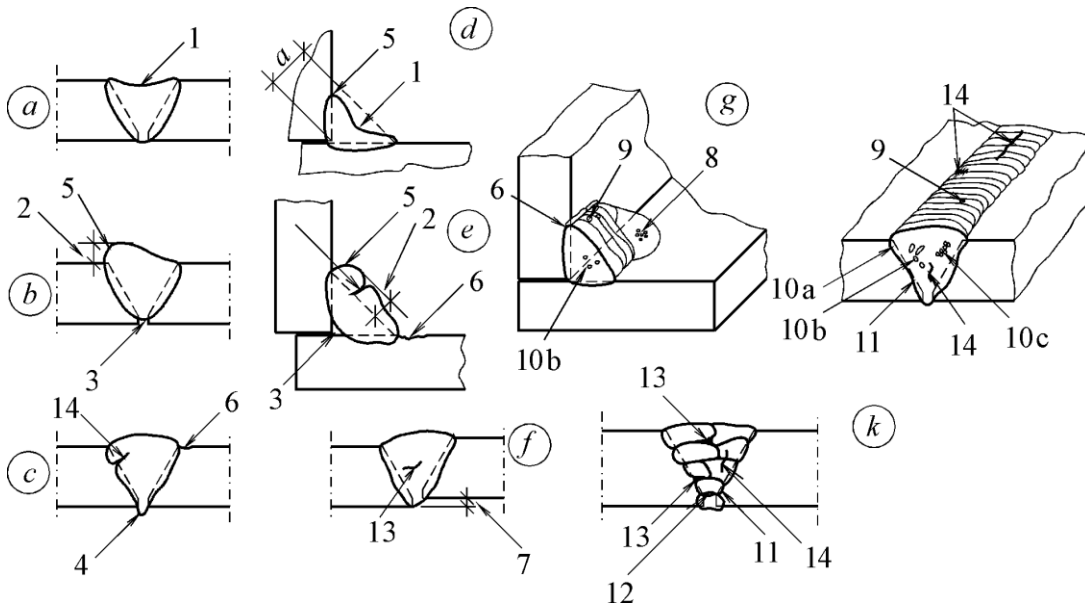
| Naziv šava | Izgled | Oznaka |
|-------------------------------|--------|--------|
| I - šav | | |
| V - šav | | |
| V - šav sa provarenim korenom | | |
| 1/2V - šav | | |
| K - šav | | |
| X - šav | | |
| U - šav | | |
| Ugaoni šav | | |

20. Greške u šavovima

Greške se prema svojoj prirodi mogu podeliti na:

- **Dimenzionalne** greške ili greške oblika;
- **Strukturne** greške ili greške kompaktnosti;

Tipične greške u šavovima



- 1 neispunjen zljeb;
- 2 - nadvišenje;
- 3 - neprovaren koren;
- 4 - prokapina;
- 5 - oštar prelaz;
- 6 - zarez;
- 7 - denivelacija;
- 8 - krater;
- 9 – poroznost površine;
- 10 gasne pore;
- 11 nalepljivanje;
- 12 - greške u provarivanju korena;
- 13 - uključci troske;
- 14 – prsline

- Greške predstavljaju materijalni diskontinuitet;
- Dolazi do koncentracija napona u zoni šava;
- Nisu sve greške istog značaja, odnosno iste opasnosti;
- Stepenn rizika zavisi od: vrste greške, načina naprežanja i karaktera opterećenja;
- Dimenzionalne greške su vidljive golim okom i neke od njih se mogu korigovati;

21. Kontrole kvaliteta šavova

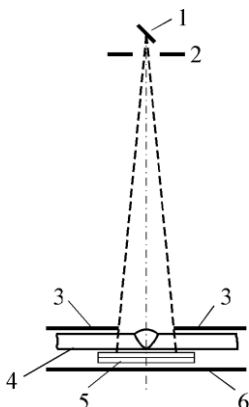
Vrste kontrole kvaliteta šavova

- **Vizuelna kontrola;**
- **Radiografska kontrola;**
- Ultrazvučna kontrola;
- Magnetska kontrola;
- Penetracijska kontrola;

Vizuelna kontrola kvaliteta

- Vrše je kvalifikovana lica;
- Mogu se otkriti samo dimenzionalne greške;
- Koriste se pomoćna sredstva - šabloni;

Radiografska kontrola - šematski prikaz



- 1) Izvor rendgenskih ili gama zraka;
- 2) Blenda;
- 3) Propust za lokalizaciju šava;
- 4) Šav koji se ispituje (snima);
- 5) Film sa osetljivom emulzijom;
- 6) Olovna folija;

Ultrazvučne metode

Primenjuju se dve ultrazvučne metode:

- Metoda prozvučavanja;
- Echo metoda

22. Kvaliteti šavova - veza sa klasama izvođenja (EXC)

Kvalitet šavova

Obim i vrsta kontrole šavova zavise od klase izvođenja konstrukcije (EXC1, EXC2, EXC3 i EXC4), odnosno od propisanog kvaliteta šavova

Razlikuju se sledeći kvaliteti šavova:

- B+ (za EXC4) – najviši
- B (za EXC3)
- C (za EXC2)
- D (za EXC1) - najnizi

Svaki kvalitet šava podrazumeva određen nivo kontrole kvaliteta;

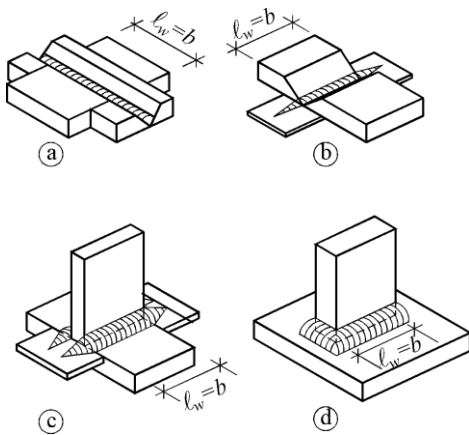
EN 1090-2 tačno definiše procedure kontrole kvaliteta koje odgovaraju zahtevanim klasama izvođenja, odnosno kvalitetima šavova.

23. Proračun sučeonih šavova

Osnovne pretpostavke:

- zanemaruju se koncentracije napona;
- zanemaruju se sopstveni (zaostali) naponi;
- uticaji u šavovima se određuju kao u osnovnom materijalu;

dimenzije sučeonih šavova su jednake dimenzijama osnovnog materijala ($a = t_{min}$)



- računska dužina šava l_w je jednaka dužini na kojoj je postignuta projektovana visina šava pod uslovom da izvođenje šava zapocinje i završava polaznim, odnosno završnim pločicama. Širina ovih pločica treba da bude veća od dvostuke debljine šava koji se zavaruje. Na ovim pločicama se uspostavlja i završava električni luk i postize stabilizacija luka i formiranje normalnog zvara. Na taj način se eliminišu krateri na početku i kraju šava. Nakon zavarivanja ove pločice se odstranjuju. Primenom ovih pločica se znatno smanjuju zaostali naponi u spoju. Ukoliko se sučeoni spoj izvodi bez ovih pločica, tada treba uzeti u obzir postojanje kratera na početku i na kraju šava. To se

obuhvata na taj način što se računska dužina šava dobija kada se od širine spoja b odbiju dve debljine šava a , na početku i na kraju šava.

$$l'_w = b - 2a$$

24. Proračun ugaonih šavova - direktna metoda

Proračun nosivosti ugaonih šavova Evrokod predviđa dve metode proračuna:

- **Direktna metoda;** Zasniva se na kontroli pojedinačnih (komponentalnih) i uporednih napona u merodavnoj ravni šava;
- **Pojednostavljena metoda;** Zasniva se na kontroli rezultujućih sila po jedinici dužine šava;

Direktna metoda

Oba sledeća uslova moraju da budu ispunjena: $\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{II}^2 + \tau_{\perp}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_m \gamma_{m2}}$ i $\sigma_{\perp} \leq \frac{0.9f_u}{\gamma_{m2}}$

f_u čvrstoća na zatezanje slabijeg spojenog dela;

γ_{m2} parcijalni koeficijent sigurnosti ($\gamma_{m2} = 1.25$)

β_m korelacioni faktor (0,8-1,0); zavisi od kvaliteta celika

25. Proračun ugaonih šavova - pojednostavljena metoda

U svakoj tački duž šava rezultujuća sila po jedinici dužine $F_{w,Ed}$ mora da zadovolji sledeći uslov:

$$F_{w,Ed} \leq F_{w,Rd} = f_{vw,d} a$$

Proračunska čvrstoća šava na smicanje $f_{vw,d}$ se određuje prema izrazu:

$$f_{vw,d} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \gamma_{m2}}$$

26. Redukcije nosivosti kod dugih veza ostvarenih zavrtnjevima i zavarivanjem

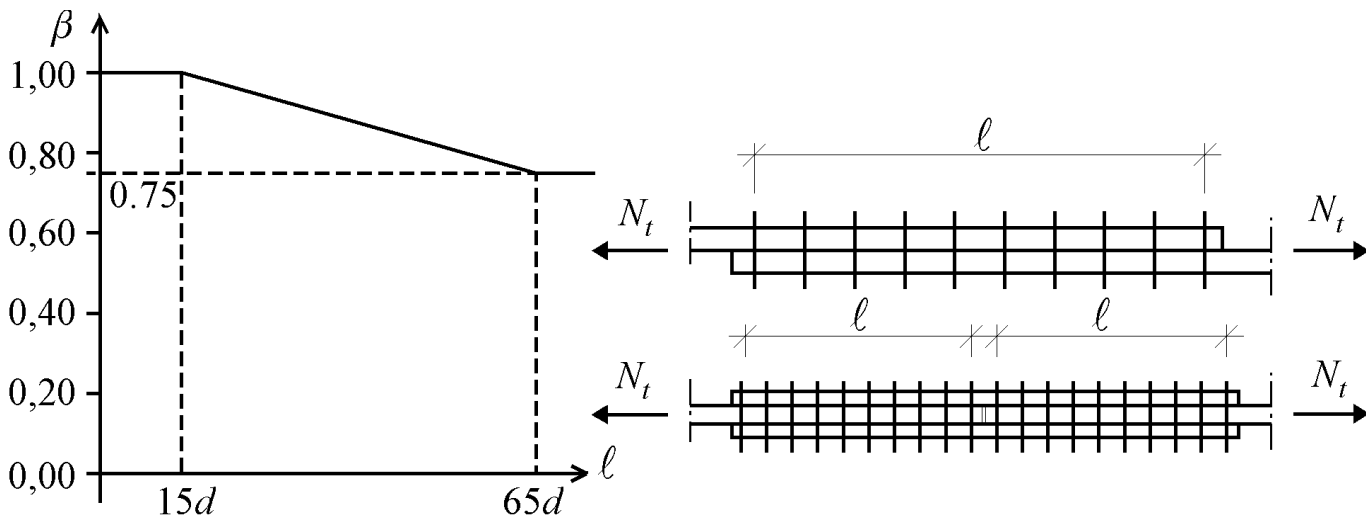
Redukcija nosivosti kod dugih veza (zavrtnji)

$$F_{v,red} = \beta F_v$$

Koeficijent redukcije:

$$\beta = 1 - \frac{l - 15d}{200d}$$

$$1 \leq \beta \leq 0.75$$



Redukcija nosivosti dugih ugaonih šavova

Kod dugih ugaonih šavova na preklop ($l_w > 150a$) neravnomerna raspodela napona duž šava se uzima u obzir tako što se redukuje nosivost ugaonog šava množenjem koeficijentom redukcije

$\beta_{Lw,1}$:

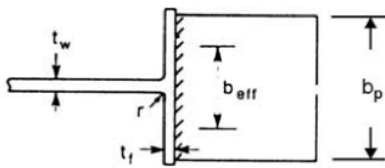
$$\beta_{Lw,1} = 1.2 - \frac{0.2L_j}{150a} \leq 1$$

gde je L_j dužina ugaonog šava, odnosno preklopa.

27. Efektivna širina šavova kod neukrućenog T-spoja

Kod ugonih spojeva bez ukrućenja, kao što su na primer veze limova za neukrućene nožice I, H, U ili sandučastih preseka, efektivnu širinu savova treba redukovati usled razlike u krutosti spojnih elemenata.

Za valjane i zavareni I i H profile

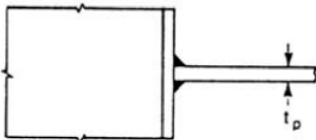


$$b_{eff} = t_w + 2s + 7k t_f$$

$$k = \frac{t_f}{t_p} \frac{f_{y,f}}{f_{y,p}} \leq 1$$

$$s = \sqrt{2} a \quad \text{zavareni profili}$$

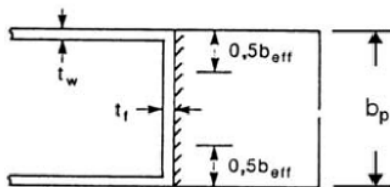
$$s = r \quad \text{valjani profili}$$



$$b_{eff} \geq \frac{f_{y,p}}{f_{u,p}} b_p$$

U suprotnom veza treba da bude ukrućena!

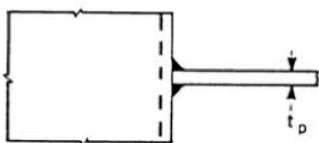
Za sandučaste ili U profile



$$b_{eff} = 2t_w + 5t_f$$

ali

$$b_{eff} \leq 2t_w + 5k t_f$$



28. Pravila za projektovanje i konstruisanje zavarenih spojeva

Opšti principi:

- Lako izvodjenje (spoj pristupačan, položaj zavarivanja što jednostavniji);
- Primena uobičajenih postupaka zavarivanja. Na izbor postupka zavarivanja utice kvalitet materijala, debljina limova, mesto spoja, zahtevani kvalitet spoja, mesto izvodjenja zavarivackih radova itd.
- Šavovi sa što manjim debljinama. Na taj nacin se stedi dodatni materijal i izbegava veliko unosenje toplote u zut.
- Ravnomeran tok sila. Cime se izbegava koncentracija napona.
- Pravilan izbor vrste i kvaliteta šava.
- Male deformacije usled zavarivanja.

Treba izbegavati:

- Debele limove i debele šavove;
- Nagomilavanje šavova na jednom mestu;
- Oštre prelaze i nagle diskontinuitete kod dinamički opterećenih konstrukcija;
- Montazne nastavke u zavarenoj izradi;
- Teške položaje zavarivanja;
- Komplikovane detalje;

29. Kompatibilnost različitih spojnih sredstava

Krutost spojnih sredstava je najvažniji parametar od koga zavisi ponasanje veze pod opterećenjem, pa kod veza sa kombinovanim spojnim sredstvima posebnu pažnju treba obratiti na kompatibilnost krutosti spojnih sredstava, kako bi se obezbedio njihov pravilan zajednički rad, odnosno ravnomerna raspodela opterećenja. Najveću krutost imaju veze u zavarenoj izradi, a sućeoni savovi imaju nešto veću krutost od ugaonih. Kod veza sa zavrtnjima, najveću krutost imaju veze sa prednapregnutim visokovrednijim zavrtnjima. Upasovani zavrtnjevi imaju znatno veću krutost od običnih, neupasovanih. Kombinacija različitih spojnih sredstava u istoj vezi, uglavnom se primenjuje kod sanacija i kod specifičnih konstrukcijskih sistema.

U istoj vezi **moгу** da se primene sledeće kombinacije spojnih sredstava:

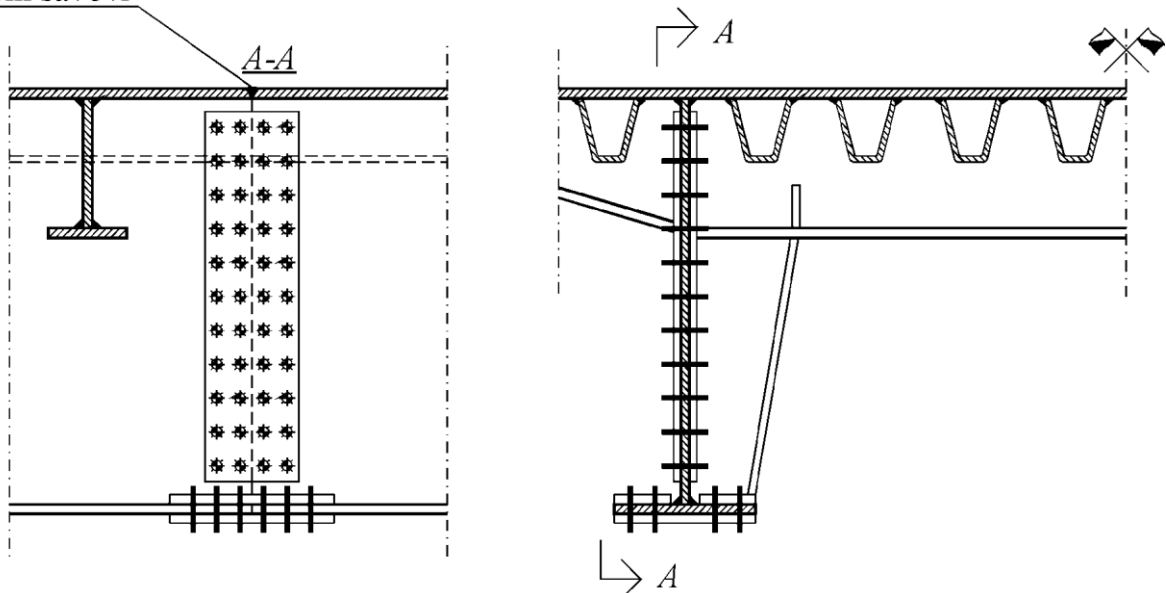
- zakivci i upasovani zavrtnjevi, samo u smicucim spojevima
- zakivci i prednapregnuti visokovredniji zavrtnjevi, samo u smicucim spojevima
- prednapregnuti visokovredniji zavrtnjevi i injektirani zavrtnjevi
- upasovani i neupasovani prednapregnuti visokovredniji zavrtnjevi, pri čemu upasovani zavrtnjevi treba da se postave u centralni deo veze
- prednapregnuti visokovredniji zavrtnjevi i upasovani zavrtnjevi, samo u smicucim spojevima u slučaju statičkog opterećenja
- zakivci i zavarivanje, samo u smicucim spojevima kod statičkog opterećenja
- prednapregnuti visokovredniji zavrtnjevi i upasovani zavrtnjevi u kombinaciji sa zavarivanjem, samo kod statičkog opterećenja. Ukupna nosivost veze u ovom slučaju se određuje kao zbir nosivosti zavrtnjeva i savova.

U istoj vezi **ne mogu** da se primene sledeće kombinacije spojnih sredstava:

- Zakivci i obični (neupasovani) zavrtnjevi,
- Neupasovani zavrtnjevi i prednapregnuti visokovredni zavrtnjevi,
- Neupasovani zavrtnjevi i zavarivanje,
- Prednapregnuti visokovredni zavrtnjevi i obični (neupasovani) zavrtnjevi sa zazorom većim od 0,3 mm,
- Prednapregnuti visokovredni zavrtnjevi i zavarivanje kod dinamički opterećenih konstrukcija, osim kod elemenata opterećenih na savijanje (nosača). U ovim slučajevima obično se pojasne lamele nastavljaju zavarivanjem pomoću sućeonih savova, a rebro pomoću visokovrednijih zavrtnjeva sa punom silom prednaprezanja
- Sućeoni i ugaoni šavovi kod dinamičkog opterećenja.

Primer ortotropne ploče

Sućeoni šavovi



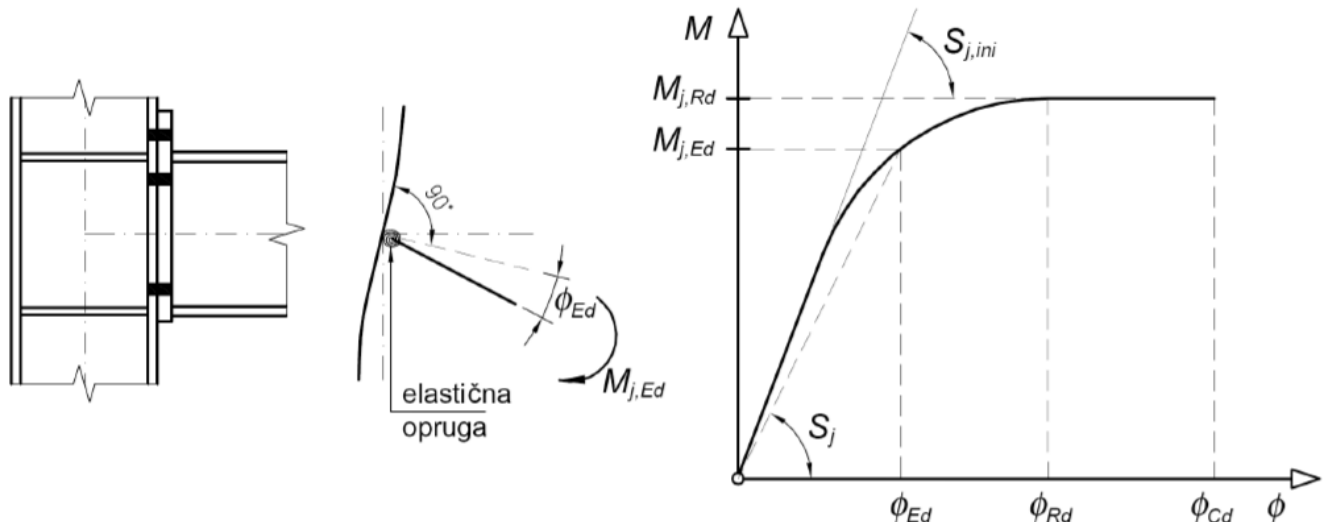
30. Podela veza prema EC3. Osnovne karakteristike momentne veze

Podela veza prema EC3 Veze se mogu klasifikovati kao:

- **proste veze**, koje ne prenose momente savijanja;
- **kontinualne veze**, koje prenose momente savijanja, ali se može pretpostaviti da njihovo ponašanje ne utiče na globalnu analizu;
- **polu-kontinualne veze**, čije ponašanje treba da se uzme u obzir pri globalnoj analizi.

Dakle, samo kod polu-kontinualnih veza treba da se uzmu u obzir karakteristike veze pri globalnoj analizi.

Ponašanje jedne momentne veze može da se opiše na osnovu njene proračunske $M-\Phi$ karakteristike.



Na osnovu $M-\Phi$ krive dobijaju se tri osnovne karakteristike veze:

- moment nosivosti $M_{j,Rd}$,
- rotaciona krutost S_j
- kapacitet rotacije Φ_{Cd} .

Glavni kriterijum za elasticnu globalnu analizu je rotaciona krutost, a za plasticnu analizu moment nosivosti i kapacitet rotacije. Zbog toga su u EC3 definisane dve klasifikacije veza:

- **Prema krutosti**
- **Prema nosivosti**

Prema krutosti:

- **zglobne**, koje ne mogu da prenose znacajan moment savijanja, a omogucavaju slobodnu rotaciju na mestu veze.
- **krute**, cija rotaciona krutost je dovoljno velika da se mogu modelirati kao kontinualne veze.
- **polukrute**, koje prenose momenat savijanja, a po svojoj rotacionoj krutosti su izmedju zglobnih i krutih veza, pa se njihova realna rotaciona krutost mora uzeti prilikom globalne analize.

Prema nosivosti:

- **zglobne**, koje ne mogu da dostignu znacajan moment nosivosti $M_{j,Rd} \leq 0.25M_{Rd}$
- **potpuno nosive**, ciji moment nosivosti je veci ili jedna od momenta nosivosti elementa koji se spaja $M_{j,Rd} \geq M_{Rd}$
- **delimično nosive**, ciji moment nosivosti je veci od proračunske vrednosti momenta na mestu veze $M_{j,Ed} \leq M_{j,Rd}$ ali je manji od momenta nosivosti elementa koji se spaja $M_{j,Rd} \leq M_{Rd}$

31. Merodavan neto presek za normalan i smaknut (cik-cak) raspored zavrtnjeva

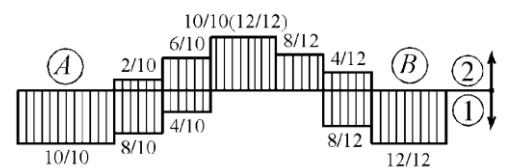
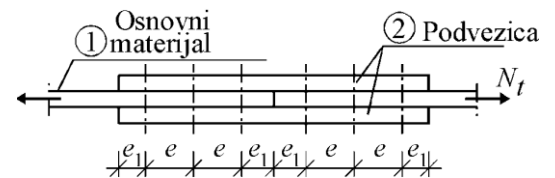
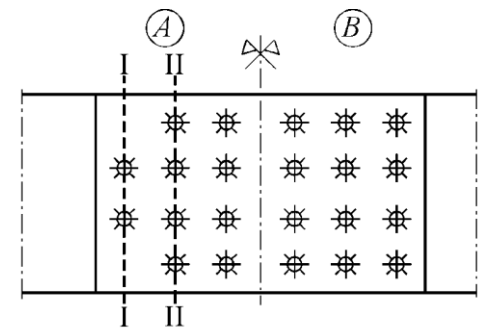
Za kontrolu napona, odnosno ojačanje profila merodavan je neto presek na mestu **prvog**, ili eventualno **drugog** reda zavrtnjeva, ukoliko je broj zavrtnjeva u drugom redu veći nego u prvom;

$$A_{f,net,I} = A_f - \Delta A_{f,I} = (bf - n_{f,I}d_{0,f})t_f$$

$$A_{f,net,II} = A_f - \Delta A_{f,II} = (bf - n_{f,II}d_{0,f})t_f$$

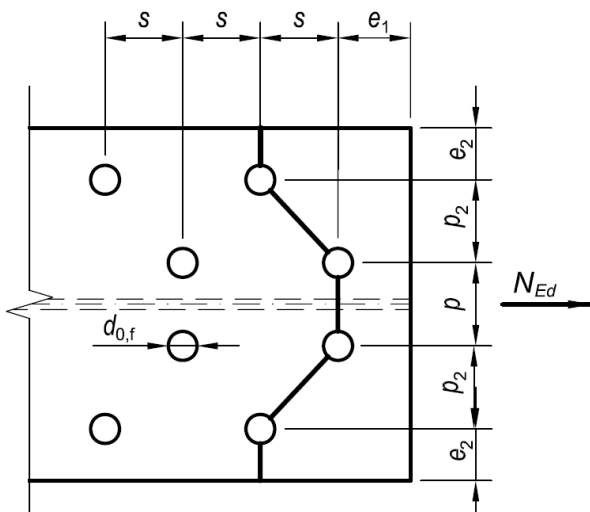
$$N_{Ed,I} = N_{Ed}$$

$$N_{Ed,II} = \frac{n_f - n_{f,I}}{n_f} N_{Ed} = \frac{8}{10} N_{Ed}$$



Neto presek – smaknut raspored

Ako su zavrtnjevi u smaknutom rasporedu takodje treba analizirati i poligonalan, smaknuti - "cik-cak" presek;



$$A_{f,net,c-c} = A_f - \Delta A_f$$

$$A_{f,net,c-c} = A_f - t_f \left(n_{c-c} d_{0,f} - \sum (s^2 / 4p_2) \right)$$

n_{c-c} broj zavrtnjeva u cik cak preseku

32. Proračun montažnog nastavka štapa prema sili zatezanja

Potrebno je proveriti (dimenzionisati) sve elemente koji učestvuju u prenošenju sile. Tri faze proračuna:

- kontrola nosivosti oslabljenog preseka i ojačanje, ako je potrebno, (samo kod zavarenih profila);
- proračun podvezica;
- proračun zavrtnjeva;

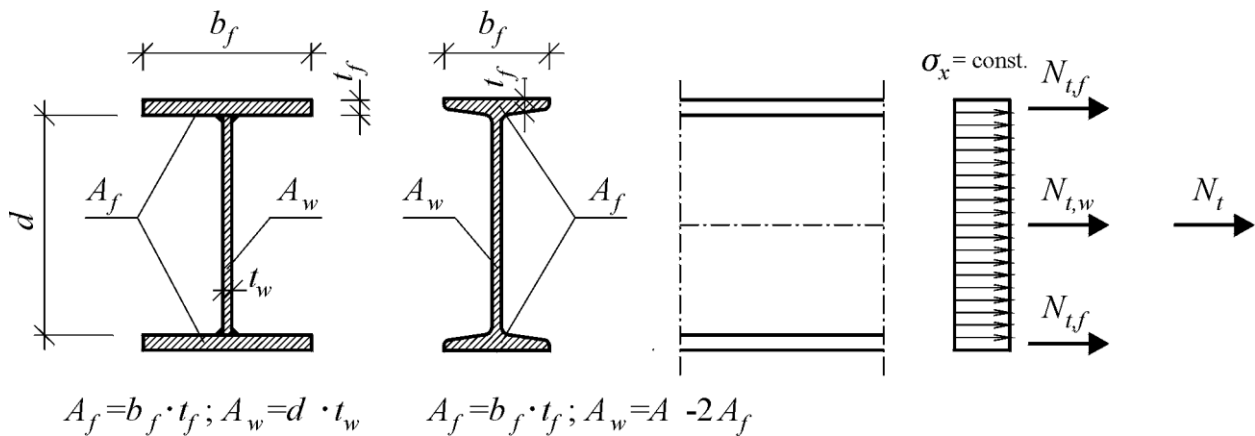
Raspodela sile zatezanja N_{ed}

- Sila se deli srazmerno površini poprečnog preseka na silu u nožicama i rebro;
- Proračun se vrši posebno za nožice, a posebno za rebro;

U nožici: $N_{f,Ed} = \frac{A_f}{A} N_{Ed}$

U rebro: $N_{w,Ed} = \frac{A_w}{A} N_{Ed}$

Raspodela sile zatezanja N_{Ed}



Proračun nastavka nožice

- Odredjivanje prečnika spojnog sedstva ($optd_0$, $t_{s,min}$);
- Linije zavrtnjeva kod vrućevaljanih profila;
- Odredjivanje broja zavrtnjeva u jednom redu (po širini nožice);

Kontrola nosivosti oslabljenog (neto) preseka:

$$N_{f,Ed} \leq N_{f,Rd} = \min\left(A_f \frac{f_y}{\gamma_{m0}}; 0.9 A_{f,net} \frac{f_u}{\gamma_{m2}}\right)$$

$$A_{f,net} = A_f - \Delta A_f = (bf - n_{f,1} d_{0,f}) t_f$$

bf širina nožice;

t_f debljina nožice;

$n_{f,1}$ broj zavrtnjeva u jednom redu;

$d_{0,f}$ prečnik rupe za zavrtnanj;

Kada je merodavan lom neto preseka?

$$\frac{A_{net}}{A} \leq \frac{1}{0.9} \frac{\gamma_{m2} f_u}{\gamma_{m0} f_y} = 1.3889 \frac{f_u}{f_y}$$

Granična nosivost neto preseka je merodavna kada je slabljenje rupama za spojna sredstva veće od 10% za S235, 13% za S275, odnosno 3% za S355!

Proračun podvezica

- Merodavan je uvek presek kroz poslednji red zavrtnjeva uz prekid elementa;
- Podvezice mogu da budu jednostrane (IPN) ili obostrane (IPE, HEA, HEB, zavareni profili);
- Dimenzije (debljina) podvezica odredjuju se iz uslova:

$$N_{f,Ed} \leq N_{p,f,Rd}$$

$$N_{p,f,Rd} = \min\left(A_{p,f} \frac{f_y}{\gamma_{m0}}; 0.9 A_{p,f,net} \frac{f_u}{\gamma_{m2}}\right)$$

$A_{p,f}$ bruto površina poprečnog preseka podvezica;

$A_{p,f,net}$ neto površina podvezica

Proračun broja zavrtnjeva na nožicama

$$n_f \geq N_{f,Ed} / F_{Rd}$$

n_f ukupan potreban broj zavrtnjeva na jednoj nožici;

F_{Rd} minimalna proračunska nosivost zavrtnja u smičućem spoju;

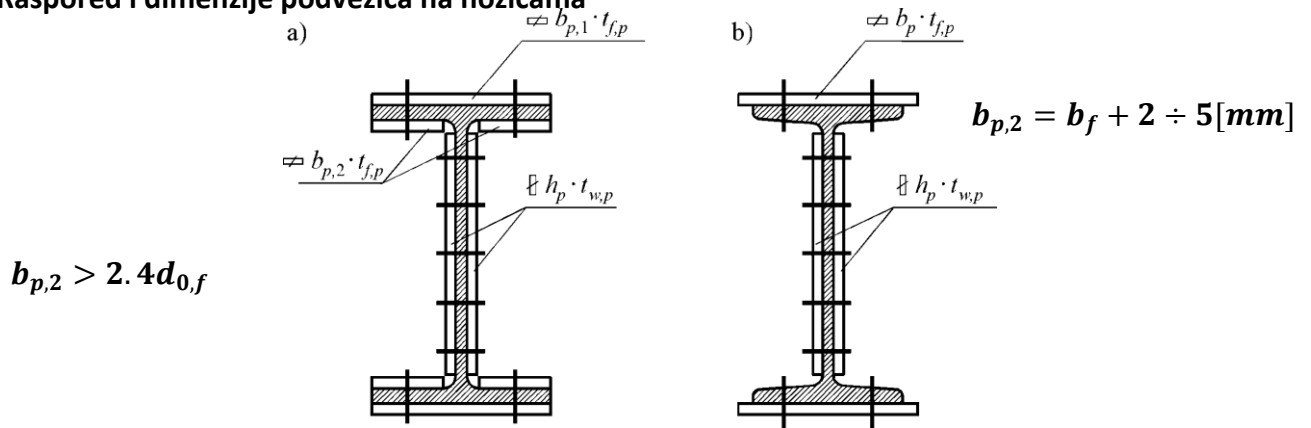
Minimalna nosivost zavrtnja zavisi od kategorije smičućeg spoja (A, B ili C) i treba da se odredi na sledeći način;

Kategorija A: $F_{Rd} = \min(F_{V,Rd}; \min F_{b,Rd})$

Kategorija B: $F_{Rd} = \min(F_{V,Rd}; \min F_{b,Rd})$ ali $n_f \geq N_{f,Ed,ser} / F_{s,Rd,ser}$

Kategorija C: $F_{Rd} = \min(F_{s,Rd}; \min F_{b,Rd})$

Raspored i dimenzije podvezica na nožicama



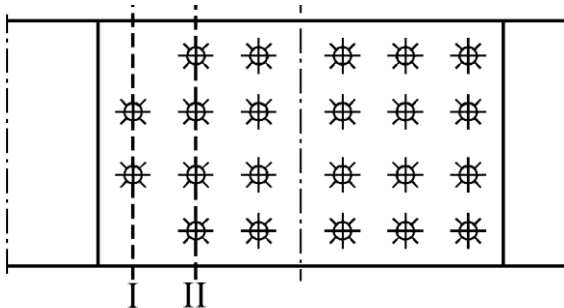
$$t_{p,f} = \begin{cases} \frac{N_{f,Ed} \gamma_{m2}}{0.9(b_{p,1} + 2b_{p,2} - 2n_{f,1}d_{0,f})f_u} \geq \frac{N_{f,Ed} \gamma_{m0}}{(b_{p,1} + 2b_{p,2})f_y} & \text{za obostrane podvezice} \\ \frac{N_{f,Ed} \gamma_{m2}}{0.9(b_p - n_{f,1}d_{0,f})f_u} \geq \frac{N_{f,Ed} \gamma_{m0}}{b_p f_y} & \text{za jednostrane podvezice} \end{cases}$$

Proračun nastavka rebra

Sve kontrole su iste kao kod nastavka nožice:

- Kontrola oslabljenog, neto preseka na mestu veze i po potrebi ojačanje (samo kod zavarenih preseka),
- Dimenzionisanje podvezica,
- Odredjivanje potrebnog broja zavrtnjeva. Posebno treba odrediti prečnik zavrtnja na rebro, kao i njihov raspored po visini (broj zavrtnjeva u redu); Podvezice se na rebro uvek postavljaju sa obe strane; Zavrtnjevi su dvosečni!

Kontrola oslabljenog preseka i ojačanje rebra



$$N_{w,Ed} \leq N_{w,Rd} = \min\left(A_w \frac{f_y}{\gamma_{m0}}; 0.9A_{w,net} \frac{f_u}{\gamma_{m2}}\right)$$

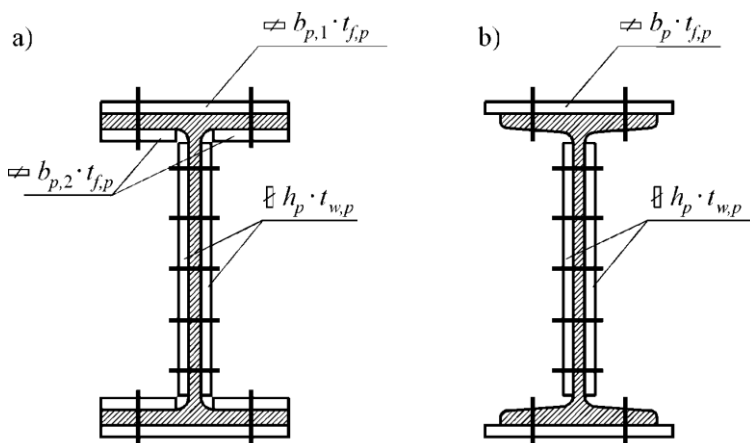
$$A_{f,net,I} = A_w - \Delta A_{w,I} = (h_w - n_{w,I}d_{0,f})t_w$$

$$A_{w,net,II} = A_w - \Delta A_{w,II} = (h_w - n_{w,II}d_{0,f})t_w$$

Ojačanje rebra može da se ostvari samo povećanjem debljine:

$$t'_w = \frac{N_{w,Ed} \gamma_{m2}}{0.9(h_w - n_{w,1}d_{0,w})f_u} \geq \frac{N_{w,Ed} \gamma_{m2}}{2h_p f_y}$$

Dimenzionisanje podvezica na rebro



$$N_{w,Ed} \leq N_{p,w,Rd}$$

$$N_{p,w,Rd} = \min\left(\frac{A_{p,w} f_y}{\gamma_{m0}}; \frac{0.9A_{p,w,net} f_u}{\gamma_{m2}}\right)$$

$$A_{p,w,net} = 2(h_p - n_{w,1}d_{0,w})t_{p,w}$$

$$t_{p,w} = \frac{N_{w,Ed} \gamma_{m2}}{1.8(h_p - n_{w,1}d_{0,w})f_u} \geq \frac{N_{w,Ed} \gamma_{m0}}{2h_p f_y}$$

Proračun broja zavrtnjeva na rebru

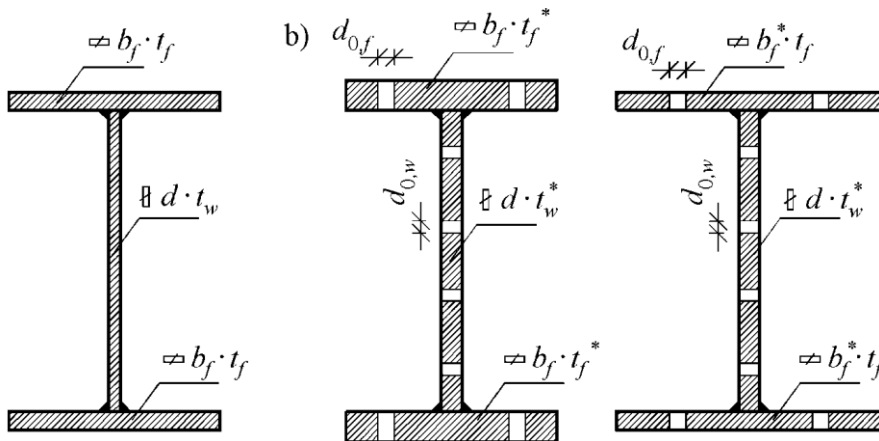
$$n_w \geq N_{w,Ed}/F_{Rd}$$

n_w ukupan potreban broj zavrtnjeva na rebru;

F_{Rd} minimalna proračunska nosivost zavrtnja na rebru;

- Minimalna nosivost zavrtnja zavisi od kategorije smičućeg spoja (A, B ili C) i treba da se odredi na isti način kao i u slučaju nožica;
- **Nosivost zavrtnjeva na rebru nije ista kao na nožicama!**
- Dimenzije zavrtnjeva na rebru su uglavnom manje (za jedan ili maksimum dva kalibra) nego na nožicama;
- Zavrtnjevi na rebru su uvek dvosečni (obostrane podvezice);
-

Kontrola čitavog preseka



Kontrola nosivosti oslabljenog preseka:

$$N_{Ed} \leq N_{t,Rd} = N_{f,Rd} + N_{w,Rd}$$

Kontrola nosivosti podvezica:

$$N_{Ed} \leq N_{p,Rd} = N_{p,f,Rd} + N_{p,w,Rd}$$

Kontrola nosivosti zavrtnjeva:

$$N_{Ed} \leq F_{Rd} = F_{f,Rd} + F_{w,Rd}$$

33. Proračun statički pokrivenog montažnog nastavka štapa prema sili zatezanje

Kod statički pokrivenih nastavaka, nosivost na mestu nastavka je veća ili jednaka od nosivosti izvan nastavka!

Statički pokriveni nastavci štapova mogu da budu:

Sa kompenzacijom – bruto presek (zavareni)

$$N_{t,Ed,max} = N_{t,Rd} = Af_y/\gamma_{m0}$$

Bez kompenzacije – neto presek (valjani):

$$N_{t,Ed,max} = N_{t,Rd} = \min\left(A \frac{f_y}{\gamma_{m0}}; 0.9A_{net} \frac{f_u}{\gamma_{m2}}\right)$$

Uslovi za dimenzionisanje:

Nosivost neto preseka štapa na mestu nastavka treba da bude veća ili jednaka od nosivosti bruto preseka štapa izvan nastavka, i to pojedinačno za nožice i rebro i ukupno za čitav poprečni presek.

$$N_{f,net,Rd} \geq N_{f,Rd}$$

$$N_{w,net,Rd} \geq N_{w,Rd}$$

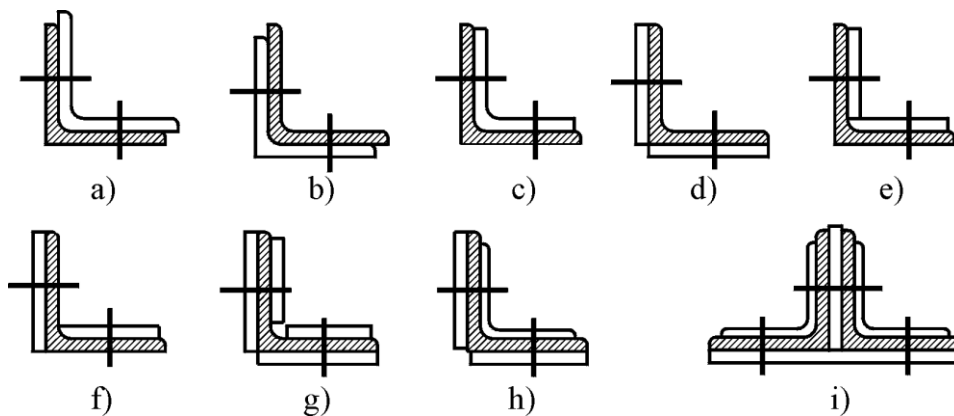
$$N_{net,Rd} \geq N_{Rd}$$

Proračun montažnih nastavaka pritisnutih štapova prema sili N_c

- Nije potrebna kontrola preseka oslabljenog rupama za spojna sredstva, niti njegovo ojačanje;
- Otvori koji nisu ispunjeni zavrtnjevima moraju da se uzmu u obzir!
- Proračunavaju se samo podvezice i potreban broj zavrtnjeva;
- Preraspodela sila na nožice i rebro se vrši kao kod zategnutih štapova;
- Podvezice se dimenzionišu prema bruto površini poprečnog preseka (**A**);

34. Proračun i konstruisanje montažnih nastavaka L profila i sandučastih preseka

Proračun i konstruisanje montažnih nastavaka ugaonika



Kod jednakokrakih ugaonika svaki krak prima po polovinu ukupne sile, dok se kod raznokrakah ugaonika ukupna sila deli proporcionalno sa površinom krakova. **Proračun se vrši posebno za svaki krak.** Ugaone podvezice se postavljaju sa spoljasnje, untrasnje ili sa obe strane ugaonika koji se nastavlja. Zbog zaobljenja untrasnjeg ugla ugaonika potrebno je da se obradi spoljasni deo podvezice kada se ona postavlja sa untrasnje strane ugaonika (slika a), odnosno spoljasnji deo ugaonika, kad se podvezica postavlja sa spoljasnje strane (slika b).

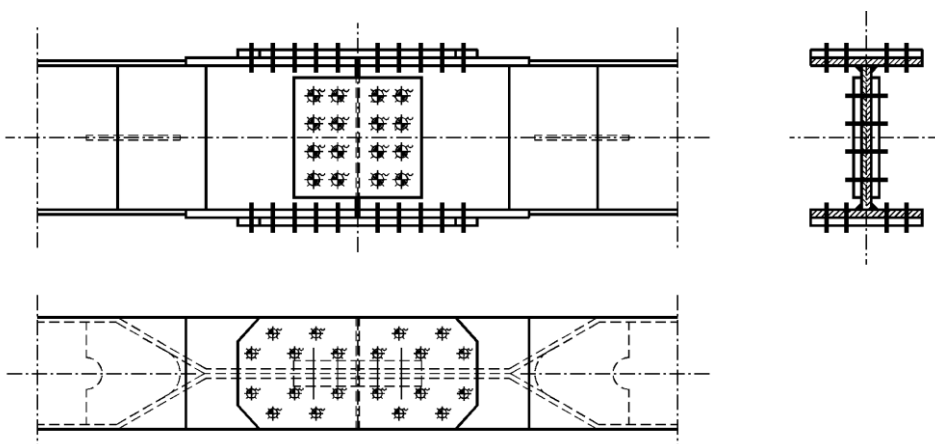
Proračun montažnih nastavaka štapova sandučastog poprečnog preseka

Problem zbog nepristupačne unutrašnjosti profila;

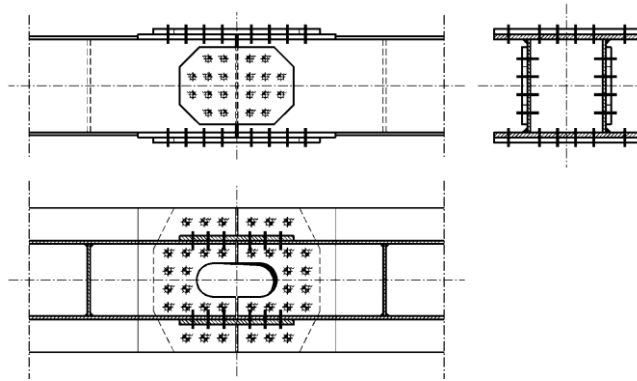
Primenjuju se dve varijante:

1. Sandučasti presek se pretvara u I profil na mestu nastavka;
2. Na mestu montažnog nastavka zadržava se ista geometrija poprečnog preseka;

Pretvaranje sandučastog profila u I profil na mestu nastavka:



Montažni nastavak sandučastog štapa bez promene oblika peseka na mestu nastavka:



Rupa se uvek predviđa na donjoj nožici. Širina rupe minimum 160 mm. Drugačiji proračun za gornju i donju nožicu.

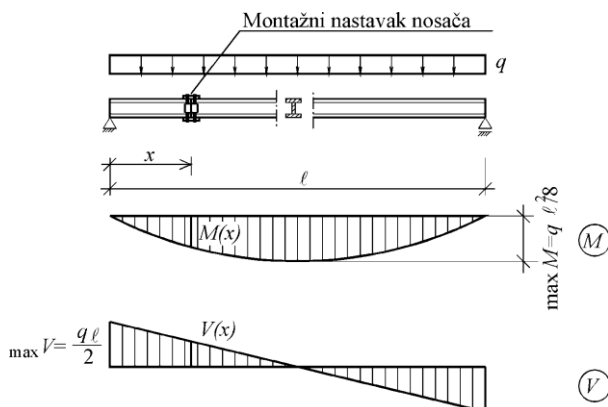
35. Proračun montažnog nastavka nosača prema zadatim silama

Montažni nastavci nosača mogu da budu izvedeni:

- pomoću običnih ili visokovrednih zavrtnjeva, ili
- u zavarenoj izradi (znatno redje).

Proračun može da se izvrši na dva načina:

- prema zadatim **presečnim silama** (M_{Ed} , V_{Ed} , N_{Ed}) ili
- prema geometrijskim karakteristikama poprečnog preseka - **statički pokriveni** nastavci.



Položaj montažnog nastavka nosača treba locirati van zone maksimalnih momenata savijanja, kad god je to moguće!

Raspodela presečnih sila na nožice i rebro:

Moment savijanja M_{Ed}

$$M_{f,Ed} = M_{Ed} \frac{I_f}{I} \quad M_{w,Ed} = M_{Ed} \frac{I_w}{I}$$

Transverzalna - smičuća sila V_{Ed}

$$V_{w,Ed} = V_{Ed} \frac{I_w/S_w}{I/S} \approx V_{Ed} \quad V_{f,Ed} = V_{Ed} \frac{I_f/S_f}{I/S} \approx 0$$

$M_{f,Ed}$ proračunska vrednost momenta u nožicama;

$M_{w,Ed}$ proračunska vrednost momenta u rebro;

$V_{f,Ed}$ proračunska vrednost smičuće sile u rebro;

$V_{w,Ed}$ proračunska vrednost smičuće sile u nožicama;

Proračun nastavka nosača

Proračun se vrši u tri koraka (faze):

- Kontrola nosivosti oslabljenog preseka i po potrebi ojačanje;
- Proračun zavrtnjeva;
- Proračun podvezica. Proračun zavrtnjeva i podvezica se vrši posebno za nožice, posebno za rebro.

Oslabljeni presek na mestu nastavka

- Rupe za spojna sredstva na zategnutoj nožici mogu da se zanemare ako je ispunjen uslov:

$$0.9A_{f,net} \frac{f_u}{\gamma_{m2}} \geq A_f \frac{f_y}{\gamma_{m0}};$$

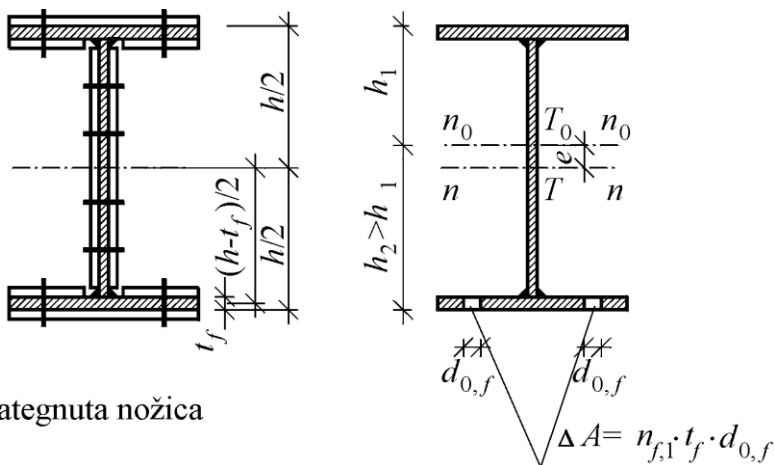
A_f i $A_{f,net}$ su bruto i neto površina zategnute nožice.

- U suprotnom, moment nosivosti oslabljenog poprečnog preseka $M_{u,net,Rd}$ treba da se odredi za odgovarajuću klasu preseka, na osnovu redukovane površine poprečnog preseka zategnute nožice:

$$A_{f,red} = 0.9A_{f,net} \frac{f_u \gamma_{m0}}{f_y \gamma_{m2}} \leq A_f$$

- Rupe u zategnutom delu rebra takodje mogu da se zanemare ako je prethodni uslov zadovoljen za čitavu zategnutu zonu preseka koju čine zategnuta nožica i zategnuti deo rebra.

Kontrola nosivosti preseka na mestu slabljenja



Zategnuta nožica

$$M_{Ed} \leq M_{u,net,Rd}$$

$$A_{f,red} = 0.9A_{f,net} \frac{f_u \gamma_{m0}}{f_y \gamma_{m2}} \leq A_f$$

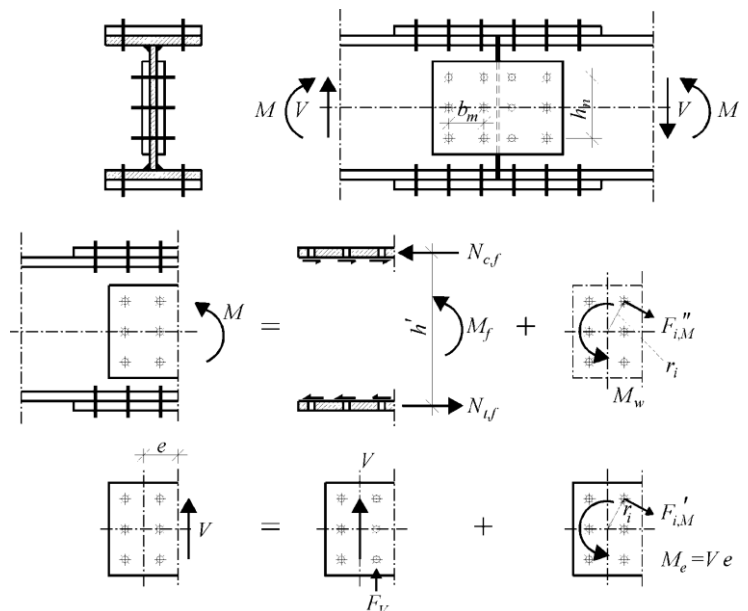
$$A_{f,net} = A_f - \Delta A_f$$

Redukovana površina zategnute nožice može da se predstavi kao, proizvod širine i redukovane debljine: $A_{f,red} = b_f t_{f,red}$

Za ovakav poprečni presek treba odrediti moment nosivosti $M_{u,net,Rd}$, u skladu sa njegovom klasom.

Proračun broja zavrtnjeva

$$M'_{w,Ed} = M_{w,Ed} + M_e = M_{Ed} \frac{I_w}{I} + V_{Ed} e$$



Proračun zavrtnjeva na nožicama

Problem savijanja može da se prevede u problem aksijalnog napreznja:

$$N_{t,f,Ed} = -N_{c,f,Ed} = M_{f,Ed}/h'$$

$M_{f,Ed}$ moment u nožicama

h' krak unutrašnjih sila

$$h' = \begin{cases} h & \text{za jednostrane podvezice na nožicama} \\ h - t_f & \text{za obostrane podvezice na nožicama} \end{cases}$$

Broj zavrtnjeva na nožici:

$$n_f \geq N_{t,f,Ed}/F_{Rd}$$

F_{Rd} minimalna granična nosivost zavrtnja na nožicama

Proračun zavrtnjeva na rebu

Zavrtnjevi na rebu su opterećeni:

- smičućom silom V_{Ed} i
- momentom savijanja $M'_{w,Ed}$
- Usled ovih sila u zavrtnjevima se javlja smicanje (smičući spojevi kategorije A, B ili C);
- Zavrtnjevi su uvek dvosečni;
- Raspodela smičuće sile V_{Ed} (i aksijalne sile N_{Ed} ako postoji) u zavrtnjevima je **ravnomerna**;
- Raspodela momenta savijanja $M'_{w,Ed}$ je **neravnomerna** (linearno promenljive sile);
- Najopterećeniji su zavrtnjevi koji su najudaljeniji od težišta veze;
- Od geometrije veze zavisi postupak proračuna;

Proračun podvezica

Proračun se sprovodi posebno za:

- zategnutu nožicu,
- pritisnutu nožicu i
- rebro

Proračun podvezica na nožicama

Na zategnutoj nožici: $N_{t,Ed} \leq N_{p,f,t,net,Rd} = \min(A_{p,f,t} \frac{f_y}{\gamma_{m0}} ; 0.9A_{p,f,t} \frac{f_u}{\gamma_{m2}})$

Na pritisnutoj nožici: $N_{f,Ed} \leq N_{p,f,c,net,Rd} = A_{p,f,c} \frac{f_y}{\gamma_{m0}}$

- Širina podvezica se određuje prema širini nožica, kao kod nastavaka štapova, a debljina podvezica se određuje na osnovu potrebne površine.
- Iz praktičnih razloga uobičajeno je da se usvoje iste debljine podvezica i za zategnutu i za pritisnutu nožicu!

Proračun podvezica na rebu

Podvezice na rebu prihvataju smičuću silu V_{Ed} i deo momenta savijanja $M_{w,Ed}$ i moraju da zadovolje sledeća dva uslova nosivosti;

$$V_{Ed} \leq V_{p,w,Rd} = \frac{A_{p,w} \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}} \right)}{\gamma_{m0}} \text{ i } M_{w,Ed} \leq M_{p,w,Rd} = \frac{W_{p,w} f_y}{\gamma_{m0}}$$

$A_{p,w}$ površina podvezica na rebu

$W_{p,w}$ otporni moment podvezica na rebu (u zavisnosti od klase preseka);

Iz uslova smicanja može da se odredi potrebna debljina podvezica:

$$t_p \geq \frac{V_{Ed} \sqrt{3} \gamma_{m0}}{2h_p f_y}$$

Često je ova debljina nedovoljna, jer je zbog manje visine podvezica u odnosu na rebro moment nosivosti zahteva veću debljinu!

Sledeći uslovi moraju da budu zadovoljeni:

- **Moment nosivosti oslabljenog preseka na mestu nastavka** mora da bude veći ili jednak od nosivosti poprečnog preseka nosača izvan nastavka; Kod zavarenih nosača, ako je potrebno vrši se ojačanje nožica i rebra;
- **Moment nosivosti podvezica** mora da bude veći ili jednak od momenta nosivosti poprečnog preseka nosača izvan nastavka;
- **Moment nosivosti zavrtnjeva** mora da bude veći ili jednak od momenta nosivosti poprečnog preseka nosača izvan nastavka;

Nosivost oslabljenog preseka - ojačanje

Uslovi koje treba ispuniti na mestu slabljenja preseka rupama za spojna sredstva:

$$N_{Ed,max} = A \frac{f_y}{\gamma_{m0}} \leq N_{u,net,Rd} = 0.9 A_{net} \frac{f_u}{\gamma_{m2}}$$

$$M_{Ed,max} = \frac{W_y f_y}{\gamma_{m0}} \leq M_{u,net,Rd}$$

$N_{Ed,max}$ maksimalna aksijalna sila koja je jednaka nosivosti poprečnog preseka izvan nastavka;

$M_{Ed,max}$ maksimalan moment savijanja oko y-y ose koji je jednak momentu nosivosti preseka izvan nastavka;

- Ukoliko prethodni uslovi nisu zadovoljeni, neophodno je da se izvrši ojačanje poprečnog preseka (samo kod zavarenih preseka);
- Ojačanje se vrši u zoni zatezanja, (zategnuta nožica) i to na isti način kao u slučaju aksijalno opterećenih elemenata - štapova!

Proračun podvezica

$$M_{Ed,max} = \frac{W_y f_y}{\gamma_{m0}} \leq M_{u,p,net,Rd} \quad V_{Ed,max} = \frac{A_w \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}} \right)}{\gamma_{m0}} \leq V_{p,w,Rd}$$

Podvezice na nožicama mogu da se proračunaju na isti način kao kod zategnutih elemenata;

Maksimalna aksijalna sila u zategnutoj nožici može da se odredi kao:

$$N_{f,Ed,max} = A_f f_y / \gamma_{m0}$$

Na osnovu ove sile se određuju dimenzije podvezica na nožicama, a i potreban broj zavrtnjeva;

Podvezice na rebru se određuju na osnovu maksimalne smičuće sile $V_{Ed,max}$ i momenta u rebru $M_{w,Ed,max}$

Moment nosivosti zavrtnjeva

Može se razdvojiti na nosivost zavrtnjeva na nožicama i rebru, posebno;

Na nožicama:

$$M_{b,f,Rd} \geq M_{f,Ed,max} = W_y f_y / \gamma_{m0} \frac{I_f}{I}$$

Na rebru:

$$M_{b,w,Rd} \geq M_{w,Ed,max} = W_y f_y / \gamma_{m0} \frac{I_w}{I}$$

Moment nosivosti zavrtnjeva na nožicama je zadovoljavajući ako je njihova nosivost veća od maksimalne aksijalne sile u zategnutoj nožici $N_{f,Ed,max}$.

$$n_f F_{Rd} \geq N_{f,Ed,max}$$

F_{Rd} minimalna nosivost jednog zavrtnja na nožici, u skladu sa kategorijom smičućeg spoja (A, B, C);

n_f broj zavrtnjeva na nožici

Moment nosivosti zavrtnjeva na rebu

- Široki nastavci (veze)

$$M_{b,w,Rd} = F_{Rd} \frac{\sum_{i=1}^n r_i^2}{r_{max}}$$

- Visoki nastavci (veze)

$$M_{b,w,Rd} = n_2 F_{Rd} \frac{\sum_{i=1}^{\frac{n_1}{2}} h_i^2}{h_{max}}$$

n_2 broj redova zavrtnjeva

n_1 broj zavrtnjeva u jednom redu

n ukupan broj zavrtnjeva ($n = n_1 n_2$)

F_{Rd} minimalna nosivost jednog zavrtnja na rebu (za dve ravni smicanja) u skladu sa kategorijom spoja (A, B, C)

37. Široki i visoki nastavci – polarni i ekvatorijalni moment inercije zavrtnjeva

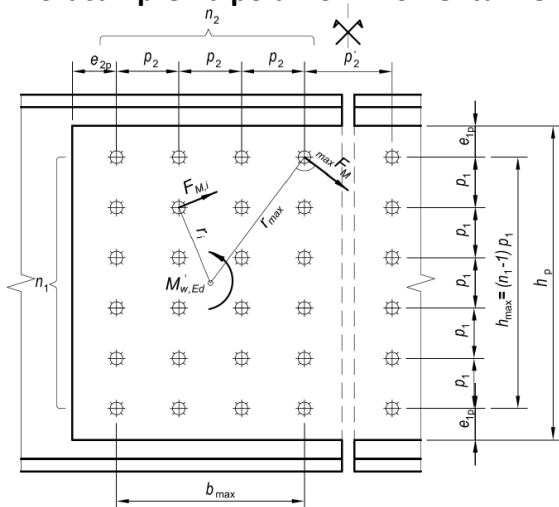
Nastavci nosača se mogu podeliti na:

- visoke ($h_{max}/b_{max} > 2$) i
- široke ($h_{max}/b_{max} \leq 2$).

Kod širokih nastavaka (veza) proračun sila u zavrtnjevima na rebu se vrši prema polarnom momentu inercije;

Kod visokih nastavaka (veza) proračun sila u zavrtnjevima na rebu se vrši prema ekvatorijalnom momentu inercije;

Proračun prema polarnom momentu inercije



Uslov ravnoteže:

$$\sum M = 0 \Rightarrow \sum F_{M,i} r_i = M'_{w,Ed}$$

Linearna raspodela sila:

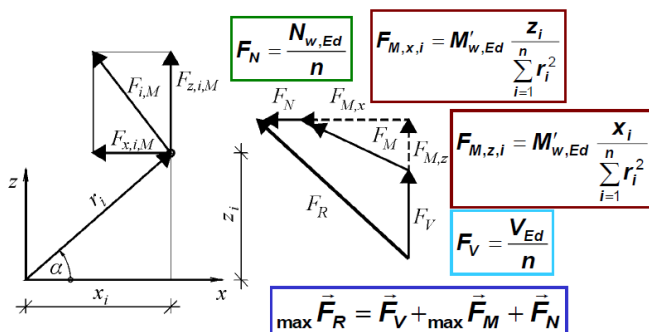
$$F_{M,i} = \max F_M \frac{r_i}{r_{max}}$$

Sila u najopterećenijem zavrtnju:

$$\max F_M \frac{\sum r_i^2}{r_{max}} = M'_{w,Ed} \Rightarrow$$

$$\max F_M = M'_{w,Ed} \frac{r_{max}}{\sum r_i^2}$$

Rezultujuća sila u zavrtnju



$$F_N = \frac{N_{w,Ed}}{n} \quad F_{M,x,i} = M'_{w,Ed} \frac{z_i}{\sum_{i=1}^n r_i^2}$$

$$F_{M,z,i} = M'_{w,Ed} \frac{x_i}{\sum_{i=1}^n r_i^2}$$

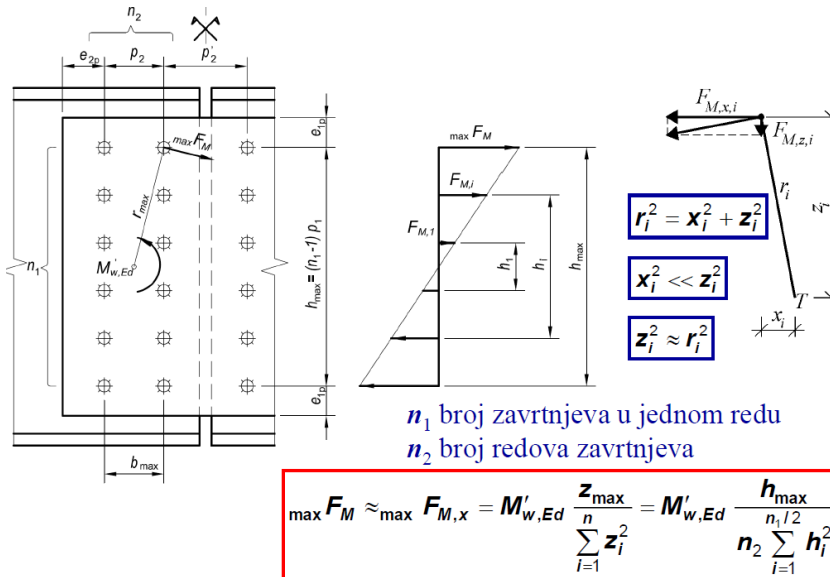
$$F_V = \frac{V_{Ed}}{n}$$

$$\max \vec{F}_R = \vec{F}_V + \max \vec{F}_M + \vec{F}_N$$

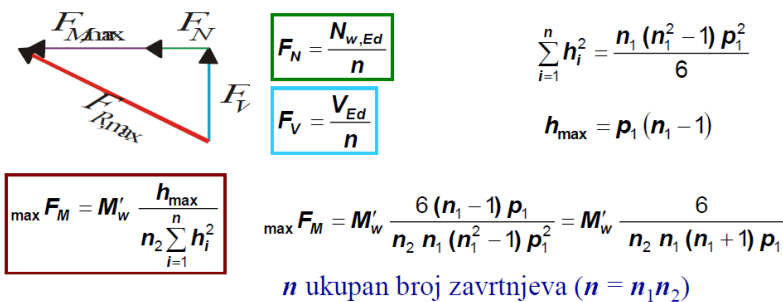
$$\max F_{M,z} = M'_{w,Ed} \frac{x_{max}}{\sum_{i=1}^n r_i^2} \quad \max F_{M,x} = M'_{w,Ed} \frac{z_{max}}{\sum_{i=1}^n r_i^2}$$

$$\max F_R = \sqrt{(F_N + \max F_{M,x})^2 + (F_V + \max F_{M,z})^2} \leq F_{Rd}$$

Proračun prema ekvatorijalnom momentu inercije



Rezultujuća sila u najopterećenijem zavrtnju



Rezultujuća sila u najopterećenijem zavrtnju:

$$\max F_{R,Ed} = \sqrt{F_V^2 + (F_N + \max F_M)^2}$$

Uslov koji mora da bude ispunjen: $\max F_{R,Ed} \leq F_{Rd}$

38. Proračun i konstruisanje zglobnih veza sa čeonom pločom

Zglobne veze sa čeonom pločom

Ovakve veze se izvode pomocu ceone ploce koja se zavaruje za rebro nosaca i spaja sa priljucnom površinom pomocu zavrtnjeva. Prenosenje transverzalne sile pomocu ceone ploce ostvaruje se prakticno bez ekscentriciteta, pa se izbegavaju sekundarni uticaji momenta ekscentricnosti, sto predstavlja znatnu prednost u odnosu na druge tipove zglobnih veza. (veza sa priklijucnim limom, sa priklijucnim ugaonicima)

Nema ekscentriciteta ($e = 0$)!

Zahteva se veća preciznost izrade – manje tolerancije!



Elementi veze

Neophodno je da se proveri nosivost svih elemenata veze koji učestvuju u prenošenju sile V_{Ed} !
Osnovni elementi zglobne veze sa čeonom pločom su:

1. Šavovi (a)
2. Zavrtnjevi ($n = n_1 n_2$)
3. Čeona ploča (h_p, t_p, b_p)
4. Rebro grede (t_{bw})

Nosivost veze V_{Rd} jednaka je minimalnoj nosivosti od svih vidova loma svih komponenata veze!

$$V_{Rd} = \min_{i=1}^8 V_{Rd,i}$$

Opšti uslovi

$$h_p \leq d_p$$

d_p cista visina rebra grede bez zaobljenja ili savova

$$t_p > \theta_{required}$$

h_p rastojanje od donje ivice ceone ploce do donje ivice grede

Da bi se izbegao prevremeni lom zatezanjem zavrtnjeva, jedan od sledeca dva uslova treba da bude ispunjen:

$$\frac{d}{t_p} \geq 2.8 \sqrt{\frac{f_{yp}}{f_{ub}}} \quad (1)$$

$$\frac{d}{t_{cf}} \geq 2.8 \sqrt{\frac{f_{ycf}}{f_{ub}}} \quad (2.1)$$

$$\frac{d}{t_w} \geq 2.8 \sqrt{\frac{f_{yw}}{f_{ub}}} \quad (2.2)$$

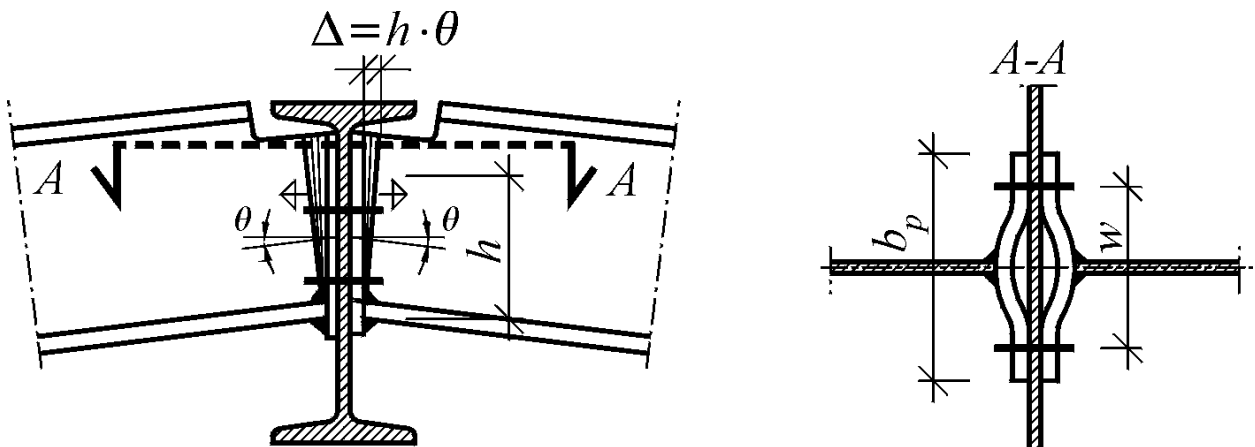
(2.1) u slučaju oslanjanja na nozicu stuba

(2.2) u slučaju oslanjanja na rebro stuba ili grede

d je prečnik zavrtnja

f_{ub} čvrstoća na zatezanje zavrtnja

Obrtanje na mestu veze



Dejstvo zgloba kod ovakvih veza se ostvaruje deformacijom ceone ploce, koja omogućava obrtanje veze za ugao θ . Zbog toga je poželjno da ceona ploča bude sto kraća i ne suviše debela, kako bi se ostvarilo obrtanje veze uz sto manje sekundarne efekte, kao sto su momenti koji izazivaju sile zatezanja u zavrtnjevima.

1. Šavovi

Da bi se izbeglo krto ponašanje veze neophodno je da šavovi imaju veću nosivost od nosivosti rebra grede.

U slučaju obostranih ugaonih šavova to se može postići ako je zadovoljen sledeći uslov:

$$a \geq \frac{\beta_w f_{yb} \gamma_{m2}}{\sqrt{2} f_{ub} \gamma_{m0}} t_{wb} \quad \text{ili} \quad a \geq \frac{f_{yb}}{2 f_{uw,d} \gamma_{m0}} t_{wb} \quad f_{uw,d} = \frac{f_{ub}}{\sqrt{2} \beta_w \gamma_{m2}}$$

| | | S235 | S275 | S355 |
|--|-------|----------------------|----------------------|----------------------|
| f_{yb} | [Mpa] | 235 | 275 | 355 |
| f_{ub} | [Mpa] | 360 | 430 | 510 |
| $f_{uw,d}$ | [Mpa] | 255 | 286 | 321 |
| β_w | - | 0.8 | 0.85 | 0.9 |
| Uslov | | $a \geq 0.46 t_{wb}$ | $a \geq 0.48 t_{wb}$ | $a \geq 0.55 t_{wb}$ |
| Vrednosti iz tabele su dobijene sa: $\gamma_{m0} = 1$ i $\gamma_{m2} = 1.25$, za limove debljine do 40mm! | | | | |

2. Zavrtnjevi

Zavrtnjevi su opterećeni na smicanje.

Uobičajena je kategorija smičućeg spoja A.

Tri kriterijuma u pogledu nosivosti zavrtnjeva:

1. Nosivost zavrtnjeva na smicanje $V_{Rd,1}$
2. Nosivost čeone ploče na pritisak po omotaču rupe $V_{Rd,2}$
3. Nosivost oslonačkog lima na pritisak po omotaču rupe $V_{Rd,3}$

Oslonački lim može biti: nožica stuba, rebro stuba ili rebro grede.

Nosivost zavrtnjeva na smicanje

$$V_{Rd,1} = 0.8 n F_{v,Rd}$$

n je ukupan broj zavrtnjeva ($n = n_1 n_2$);

$F_{v,Rd}$ nosivost zavrtnja na smicanje. $F_{v,Rd} = \alpha_v A f_{ub} / \gamma_{m2}$

Zavrtnjevi su jednosečni.

Redukcija nosivosti od 20% se uzima zbog uticaja zatezanja u zavrtnjevima!

Nosivost čeone ploče na pritisak po omotaču rupe

$$V_{Rd,2} = \sum F_{b,Rd} \quad (\text{ako je } F_{v,Rd} \geq F_{b,Rd} \text{ za svaki zavrtnanj})$$

$$V_{Rd,2} = n F_{b,Rd} \quad (\text{Na strani sigurnsti})$$

$$F_{b,Rd} = k_1 \alpha_b t_p d f_{up} / \gamma_{m2}$$

$$k_1 = \min\left(2.8 \frac{e_{2p}}{d_0} - 1.7; 1.4 \frac{p_2}{d_0} - 1.7; 2.5\right)$$

$$\alpha_b = \min\left(\frac{e_{1p}}{3d_0}; \frac{p_1}{3d_0} - 0.25; \frac{f_{ub}}{f_{up}}; 1\right)$$

Nosivost oslonačkog lima na pritisak po omotaču rupe

$$V_{Rd,3} = n F_{b,Rd}$$

| $F_{b,Rd} = k_1 \alpha_b t d f_u / \gamma_{m2}$ | | | |
|---|---|--|--|
| | nožica stuba | rebro stuba | rebro grede |
| t | t_{cf} | t_{cw} | t_{bw} |
| f_u | f_{ucf} | f_{ucw} | f_{ubw} |
| k_1 | $\min\left(2.8 \frac{e_{2s}}{d_0} - 1.7; 1.4 \frac{p_2}{d_0} - 1.7; 2.5\right)$ | $\min\left(1.4 \frac{p_2}{d_0} - 1.7; 2.5\right)$ | $\min\left(1.4 \frac{p_2}{d_0} - 1.7; 2.5\right)$ |
| α_b | $\min\left(\frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{ub}}{f_{ucf}}; 1\right)$ | $\min\left(\frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{ub}}{f_{ucw}}; 1\right)$ | $\min\left(\frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{ub}}{f_{ubw}}; 1\right)$ |

3. Čeona ploča

Dimenzije čeone ploče (h_p , t_p i b_p) treba da se odrede iz uslova smeštanja zavrtnjeva, raspoložive visine rebra grede, nesmetane rotacije i duktilnosti veze (opšti uslovi) i sledećih kriterijuma nosivosti:

1. Nosivost bruto preseka na smicanje $V_{Rd,4}$
2. Nosivost neto preseka na smicanje $V_{Rd,5}$
3. Nosivost na cepanje bloka $V_{Rd,6}$
4. Nosivost na savijanje $V_{Rd,7}$

Velika debljina čeone ploče dovodi do značajne nosivosti veze na savijanje! Uobičajena je debljina oko 10 mm!

Nosivost bruto preseka na smicanje

$$V_{Rd,4} = 2 \frac{h_p t_p}{1.27} \frac{f_{yp}/\sqrt{3}}{\gamma_{m0}}$$

Postoje dve ravni smicanja!

Koeficijent 1,27 se uzima zbog redukcije usled interakcije savijanja i smicanja!

Nosivost neto preseka na smicanje

$$V_{Rd,5} = 2A_{v,net} \frac{f_{up}/\sqrt{3}}{\gamma_{m2}}$$

$$A_{v,net} = t_p(h_p - n_1 d_0)$$

Nosivost na cepanje bloka

$$V_{Rd,6} = 2V_{eff,Rd}$$

ako je $h_p < 1.36p_{22}$ i $n_1 > 1$

$$V_{eff,Rd} = V_{eff,2,Rd} = \frac{0.5A_{nt}f_{up}}{\gamma_{m2}} + \frac{A_{nv}(f_{yp}/\sqrt{3})}{\gamma_{m0}}$$

u suprotnom je:

$$V_{eff,Rd} = V_{eff,1,Rd} = \frac{A_{nt}f_{up}}{\gamma_{m2}} + \frac{A_{nv}(f_{yp}/\sqrt{3})}{\gamma_{m0}}$$

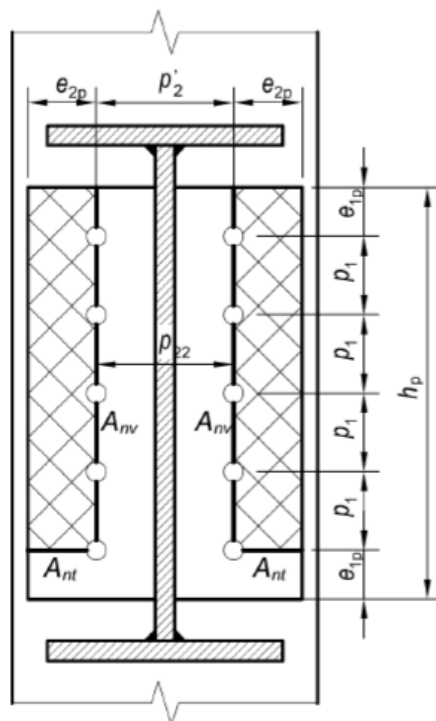
$$A_{nt} = t_p(e_{2p} - d_0/2) \quad \text{za} \quad n_2 = 2$$

$$A_{nt} = t_p(p_2 + e_{2p} - 3d_0/2) \quad \text{za} \quad n_2 = 4$$

$$A_{nv} = t_p(h_p - e_{1p} - (n_1 - 0.5)d_0)$$

$$p_{22} = p_2' \quad \text{za} \quad n_2 = 2$$

$$p_{22} = p_2 + p_2' \quad \text{za} \quad n_2 = 4$$



Nosivost čeone ploče na savijanje

ako je $h_p \geq 1.36p_{22}$ $V_{Rd,7} = \infty$

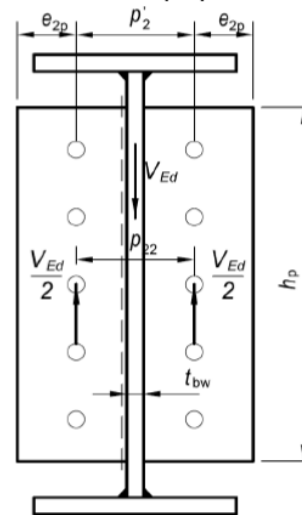
U suprotnom je :

$$V_{Rd,7} = \frac{4W_{el} f_{yp}}{p_{22} - t_w \gamma_{m0}} \quad W_{el} = \frac{h_p^2 t_p}{6}$$

$$V_{Rd,7} = \frac{2h_p^2 t_p f_{yp}}{3(p_{22} - t_w) \gamma_{m0}}$$

$$p_{22} = p_2' \quad \text{za } n_2 = 2$$

$$p_{22} = p_2 + p_2' \quad \text{za } n_2 = 4$$



4.Rebro grede

Nosivost rebra grede na smicanje $V_{Rd,8}$

$$V_{Rd,8} = h_p t_{bw} \frac{f_{ybw} / \sqrt{3}}{\gamma_{m0}}$$

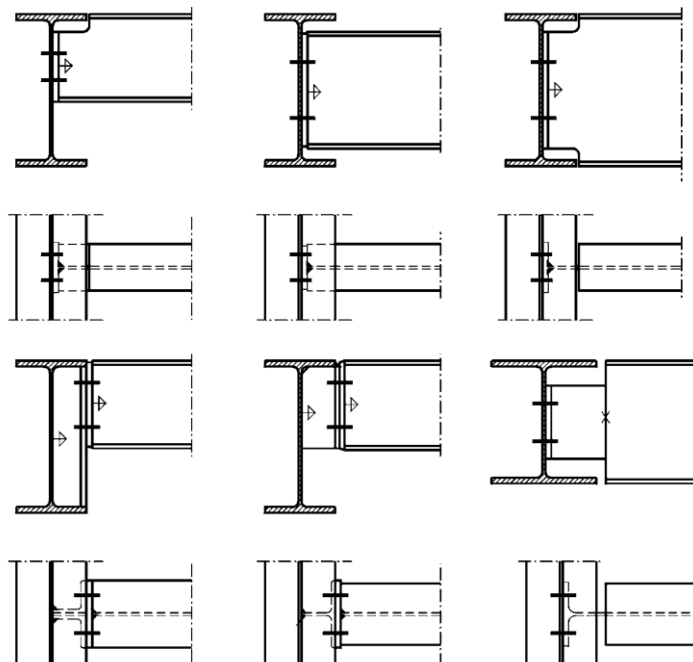
t_{bw} debljina rebra grede

f_{ybw} granica razvlačenja rebra grede

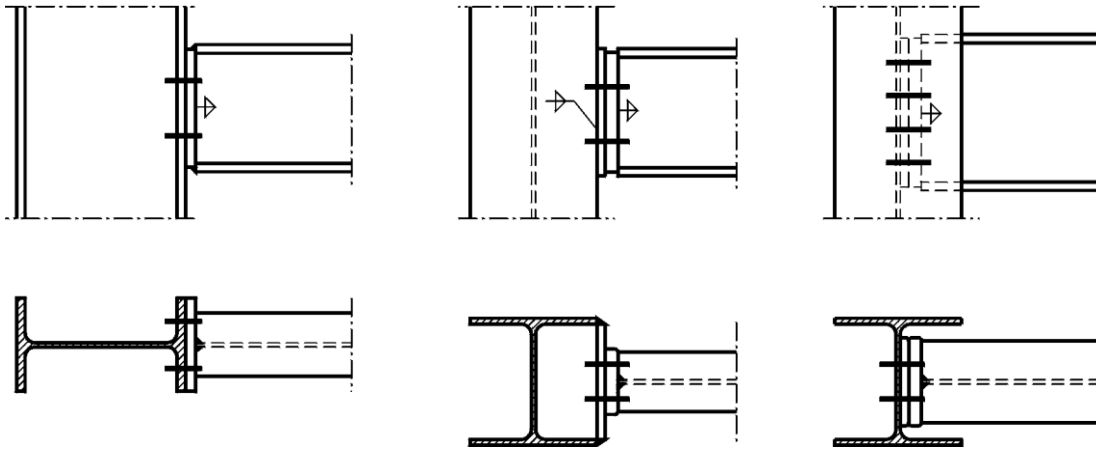
Preporuke za dimenzionisanje veze

- Pri projektovanju je neophodno da se definiše broj zavrtnjeva (n) i dimenzije čeone ploče (h_p , t_p , i b_p);
- Potreban broj zavrtnjeva može da se odredi iz uslova nosivosti na smicanje ($V_{Rd,1}$);
- Potom se oblikuje veza i definišu sva rastojanja izmedju zavrtnjeva (e_1, p_1, \dots) i proverava nosivost na pritisak po omotaču rupe ($V_{Rd,2}, V_{Rd,3}$) na osnovu koje se može dobiti potrebna debljina čeone ploče (t_p)!
- Visina čeone ploče se određuje na osnovu minimalnih rastojanja izmedju zavrtnjeva i nosivosti rebra grede na smicanje ($V_{Rd,8}$);
- Potom se proveravaju ostale nosivosti!

Primeri zglobnih veza sa gredom ostvarenih pomoću čeone ploče



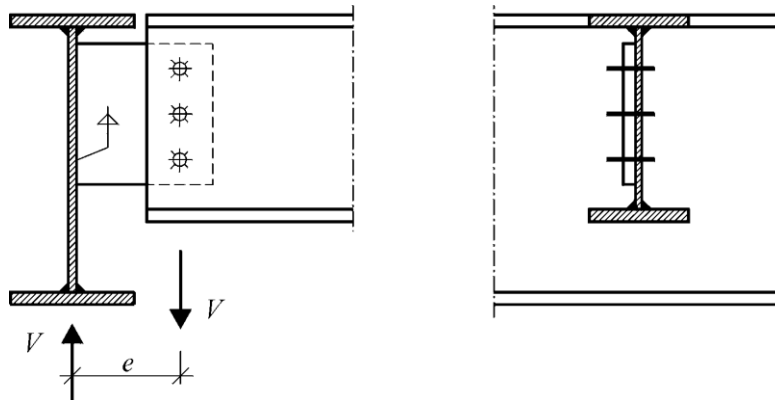
Primeri zglobnih veza sa stubom pomoću čelone ploče



39. Proračun i konstruisanje zglobnih veza sa prikličnim limom

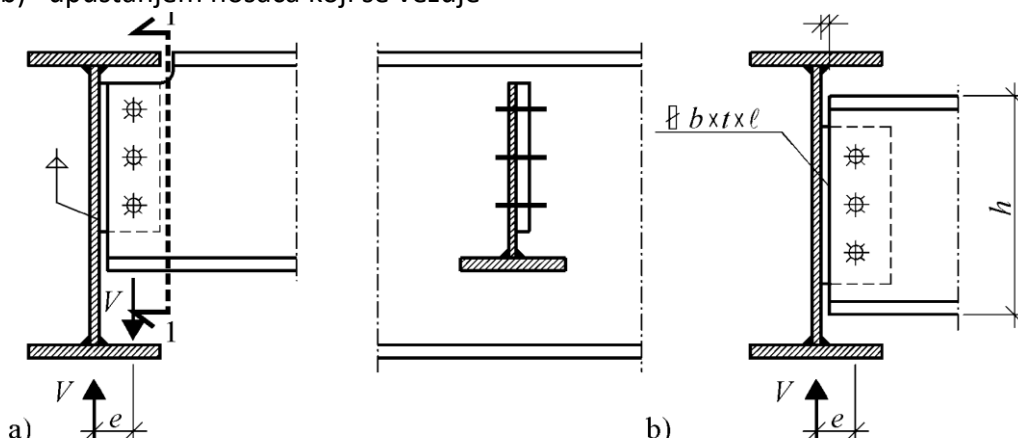
Ovakav način vezivanja je vrlo jednostavan za izradu, jer se vrši samo odsecanje nosaca na projektovanu dužinu i buse odgovarajuće rupe. Montaza je, takodje, jednostavna jer je veza pristupačna, a ugradnja zavrtneva laka. Može se koristiti veza između grede i stuba ili između dve grede.

Nedostatak ovakvog rešenja je što je veza osetljiva na bocno pomeranje jer nema veliki stepen torzionog ukrućenja. Zbog toga se ne preporučuje primena ovakvih veza za prijem reakcija velikih intenziteta. Primena ovakvih veza je opravdana kod nosaca čija je bocna stabilnost gornjeg pojasa u potpunosti obezbeđena (na primer pomoću krute armiranobetonske ploče, ili horizontalnog srega).

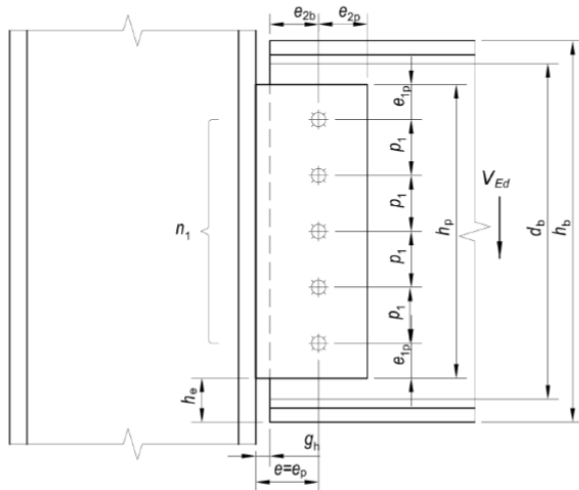


Kod ovakvih veza javlja se moment ekscentriciteta ($M_e = Ve$), čiji intenzitet zavisi od ekscentriciteta veze e i oslonacke reakcije nosaca V . Ako konstruktivni ili funkcionalni razlozi diktiraju postavljanje gornjih nožica nosaca u istoj ravni, zbog velikog ekscentriciteta, moment ekscentriciteta može da ima značajnu vrednost. Smanjenje ekscentriciteta može da se postigne na dva načina:

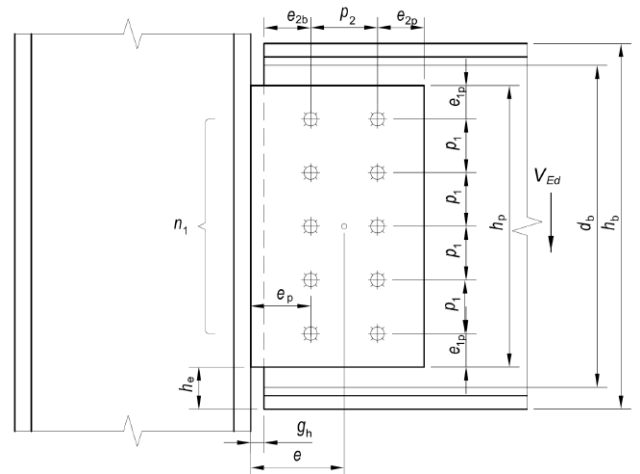
- zasecanjem jedne ili obe nožice, zavisno od odnosa gabarita nosaca koji se vezuju
- upustanjem nosaca koji se vezuje



Veza sa jednim redom zavrtnjeva $n_2 = 1$



Veza sa dva reda zavrtnjeva $n_2 = 2$



Glavni elementi veze

Osnovne komponente veze čija nosivost treba da se proveri su:

1. Šavovi.
2. Zavrtnjevi
3. Priključni lim
4. Rebro nosača

Nosivost veze jednaka je najmanjoj nosivosti za sve vidove loma svih komponenta veze!

$$V_{Rd} = \min_{i=1}^{11} V_{Rd,i}$$

Opšti uslovi

$h_p \leq d_b$ d_b cista visina rebra grede bez zaobljenja ili savova

Rotacija oslonackog preseka

$\phi_{available} > \phi_{required}$

$\phi_{available} = \infty$ ako je $e > \sqrt{(e - g_h)^2 + \left(\frac{h_p}{2} + h_e\right)^2}$

e ekscentricitet veze

g_h razmak u horizontalnom pravcu izmedju grede i oslonackog elementa

h_p visina prikljucnog lima

h_e rastojanje od donje ivice prikljucnog lima do donje ivice grede

1. Šavovi

Za šavove veže isti principi kao i za veze sa čeonom pločom.

$$a \geq \frac{\beta_w f_{yb} \gamma_{m2}}{\sqrt{2} f_{ub} \gamma_{m0}} t_{wb}$$

Nosivost šavova treba da bude veća od nosivosti priključnog lima

2. Zavrtnjevi

Zavrtnjevi su opterećeni na smicanje. Pored transversalne sile kod ovkviha veza javlja se i moment ekscentriciteta ($M_{Ed} = V_{Ed}e$). Zavrtnjevi nisu ravnomerno opterećeni! Uobičajena je kategorija smičućeg spoja A.

Tri kriterijuma u pogledu nosivosti zavrtnjeva:

1. Nosivost zavrtnjeva na smicanje $V_{Rd,1}$
2. Nosivost priključnog lima na pritisak omotača rupe $V_{Rd,2}$
3. Nosivost rebra nosača na pritisak po omotaču rupe $V_{Rd,3}$

Naprezanje najopterećenijeg zavrtnja

Za jedan red zavrtnjeva $n_2 = 1$ ($n = n_1$)

$$F_V = \frac{V_{Ed}}{n}$$

$$\max F_M = V_{Ed}e h_{max} / \sum_i h_i = V_{Ed}e \frac{6}{n(n+1)p_1}$$

$$\max F_R = \sqrt{F_V^2 + \max F_M^2} = \sqrt{\left(\frac{V_{Ed}}{n}\right)^2 + \left(\frac{V_{Ed}}{n} \frac{6e}{(n+1)p_1}\right)^2} \leq F_{V,Rd}$$

F_V sila u jednom zavrtnju usled smičuće sile V_{Ed}

$\max F_M$ sila u najopterećenijem zavrtnju usled momenta ekscentriciteta,

$\max F_R$ rezultujuća sila u najopterećenijem zavrtnju,

$F_{V,Rd}$ nosivost zavrtnja na smicanje (jednosečan).

Naprezanje najopterećenijeg zavrtnja

Za dva reda zavrtnjeva $n_2 = 2$

$$F_V = \frac{V_{Ed}}{n}$$

$$\max F_{M,hor} = V_{Ed}e \frac{(n_1 - 1)p_1}{2I} \quad \max F_{M,ver} = V_{Ed}e \frac{p_2}{2I}$$

$$I = \frac{n_1}{2} p_2^2 + \frac{1}{6} n_1 (n_1 - 1) p_1^2$$

$$\max F_R = \sqrt{(F_V + \max F_{M,ver})^2 + \max F_{M,hor}^2}$$

$$\max F_R = \sqrt{\left(\frac{V_{Ed}}{n} + \frac{V_{Ed}ep_2}{2I}\right)^2 + \left(\frac{V_{Ed}ep_1}{2I}(n_1 - 1)\right)^2} \leq F_{V,Rd}$$

I moment inercije zavrtnjeva

Nosivost zavrtnjeva na smicanje

Za jedan red zavrtnjeva $n_2 = 1$ ($n = n_1$)

$$V_{Rd,1} = \frac{nF_{V,Rd}}{\sqrt{1 + \left(\frac{6e}{(n+1)p_1}\right)^2}}$$

Za dva reda zavrtneja $n_2 = 2$

$$V_{Rd,1} = \frac{nF_{V,Rd}}{\sqrt{\left(1 + n\frac{ep_2}{2I}\right)^2 + \left(n\frac{ep_1}{2I}(n_1 - 1)\right)^2}} = \frac{nF_{V,Rd}}{\sqrt{(1 + n\alpha)^2 + (n\beta)^2}}$$

$$\alpha = \frac{ep_2}{2I} \quad \beta = \frac{ep_1}{2I}(n_1 - 1)$$

Nosivost priključnog lima na pritisak po omotaču rupe

$$V_{Rd,2} = \frac{n}{\sqrt{\left(\frac{1 + n\alpha}{F_{b,ver,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{1 + n\beta}{F_{b,hor,Rd}}\right)^2}}$$

$$n_2 = 1 (n = n_1) \rightarrow \alpha = 0 \quad \beta = \frac{6e}{n(n+1)p_1}$$

| $F_{b,Rd,ver} = k_1 \alpha_b t_p d f_{up} / \gamma_{M2}$ | $F_{b,Rd,hor} = k_1 \alpha_b t_p d f_{up} / \gamma_{M2}$ |
|---|---|
| $k_1 = \min\left(2,8 \frac{e_{2p}}{d_0} - 1,7; 1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7; 2,5\right)$ | $k_1 = \min\left(2,8 \frac{e_{1p}}{d_0} - 1,7; 1,4 \frac{p_1}{d_0} - 1,7; 2,5\right)$ |
| $\alpha_b = \min\left(\frac{e_{1p}}{3d_0}; \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{ub}}{f_{up}}; 1\right)$ | $\alpha_b = \min\left(\frac{e_{2p}}{3d_0}; \frac{p_2}{3d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{ub}}{f_{up}}; 1\right)$ |

$$n_2 = 2 \rightarrow \alpha = \frac{ep_2}{2I} \quad \beta = \frac{ep_1}{2I}(n_1 - 1)$$

Nosivost rebra grede na pritisak po omotaču rupe

$$V_{Rd,3} = \frac{n}{\sqrt{\left(\frac{1 + n\alpha}{F_{b,ver,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{1 + n\beta}{F_{b,hor,Rd}}\right)^2}}$$

$$n_2 = 1 (n = n_1) \rightarrow \alpha = 0 \quad \beta = \frac{6e}{n(n+1)p_1}$$

$$n_2 = 2 \rightarrow \alpha = \frac{ep_2}{2I} \quad \beta = \frac{ep_1}{2I}(n_1 - 1)$$

| $F_{b,Rd,ver} = k_1 \alpha_b t_{bw} d f_{ubw} / \gamma_{M2}$ | $F_{b,Rd,hor} = k_1 \alpha_b t_{bw} d f_{ubw} / \gamma_{M2}$ |
|---|---|
| $k_1 = \min\left(2,8 \frac{e_{2b}}{d_0} - 1,7; 1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7; 2,5\right)$ | $k_1 = \min\left(1,4 \frac{p_1}{d_0} - 1,7; 2,5\right)$ |
| $\alpha_b = \min\left(\frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{ub}}{f_{ubw}}; 1\right)$ | $\alpha_b = \min\left(\frac{e_{2b}}{3d_0}; \frac{p_2}{3d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{ub}}{f_{up}}; 1\right)$ |

3. Nosivost priključnog lima

Neophodno je da se odrede sledeće nosivosti:

1. Nosivost bruto preseka na smicanje $V_{Rd,4}$
2. Nosivost neto preseka na smicanje $V_{Rd,5}$
3. Nosivost na cepanje bloka $V_{Rd,6}$
4. Nosivost priključnog lima na savijanje $V_{Rd,7}$
5. Nosivost priključnog lima na izbočavanje $V_{Rd,8}$

Nosivost bruto preseka na smicanje

$$V_{Rd,4} = \frac{h_p t_p f_{yp} / \sqrt{3}}{1.27 \gamma_{m0}}$$

Koeficijent 1,27 se uzima zbog redukcije usled interakcije savijanja i smicanja!

Nosivost neto preseka na smicanje

$$V_{Rd,5} = A_{V,net} \frac{f_{up} / \sqrt{3}}{\gamma_{m2}}$$

$$A_{V,net} = t_p (h_p - n_1 d_0)$$

Nosivost na cepanje bloka

$$V_{Rd,6} = V_{eff,2,Rd} = 0.5 A_{nt} f_{up} / \gamma_{m2} + A_{nv} (f_{yp} / \sqrt{3}) / \gamma_{m0}$$

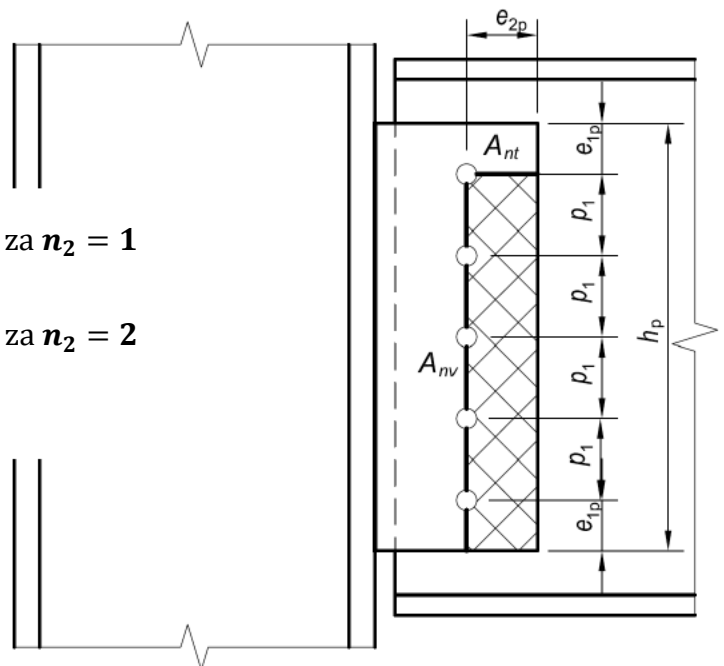
$$A_{nt} = t_p \left(e_{2p} - \frac{d_0}{2} \right)$$

za $n_2 = 1$

$$A_{nt} = t_p \left(p_2 + e_{2p} - \frac{3d_0}{2} \right)$$

za $n_2 = 2$

$$A_{nv} = t_p (h_p - e_1 - (n_1 - 0.5) d_0)$$



Nosivost priključnog lima na savijanje

ako je:

$$h_p \geq 2.73e \rightarrow V_{Rd,7} = \infty$$

U suprotnom:

$$V_{Rd,7} = \frac{W_{el} f_{yp}}{e \gamma_{m0}}$$

$$W_{el} = \frac{h_p^2 t_p}{6}$$

$$V_{Rd,7} = \frac{h_p^2 t_p f_{yp}}{6e \gamma_{m0}}$$

Nosivost priključnog lima na izbočavanje

ako je $t_p \geq 0.15e$ $V_{Rd,8} = V_{Rd,7}$

$$V_{Rd,8} = \frac{W_{el} f_{p,LT}}{e \cdot 0.6\gamma_{m1}} \leq \frac{W_{el} f_{yp}}{e_p \gamma_{m0}}$$

$$\lambda_{LT} = 2.8 \sqrt{\frac{e_p h_p}{1.5 t_p^2}} \rightarrow f_{p,LT}$$

e_p rastojanje od savova do I reda zavrtnjeva
 $e_p = e$ za veze sa jednim redom zavrtnjeva
 $e_p = e - \frac{p_2}{2}$ za veze sa dva reda zavrtnjeva

4. Nosivost rebra nosača

Neophodno je da se odrede sledeće nosivosti:

1. Nosivost bruto preseka na smicanje $V_{Rd,9}$
2. Nosivost neto preseka na smicanje $V_{Rd,10}$
3. Nosivost na cepanje bloka $V_{Rd,11}$

Nosivost bruto preseka na smicanje

$$V_{Rd,9} = A_{b,v} \frac{f_{ybw}/\sqrt{3}}{\gamma_{m0}}$$

$A_{b,v}$ površina smicanja nosača

Nosivost neto preseka na smicanje

$$V_{Rd,10} = A_{b,v,net} \frac{f_{ubw}/\sqrt{3}}{\gamma_{m2}}$$

$$A_{b,v,net} = A_{b,v} - n_1 d_0 t_{bw}$$

Nosivost na cepanje bloka

$$V_{Rd,11} = V_{eff,2,Rd} = 0.5 A_{nt} f_{up} / \gamma_{m2} + A_{nv} (f_{yp} / \sqrt{3}) / \gamma_{m0}$$

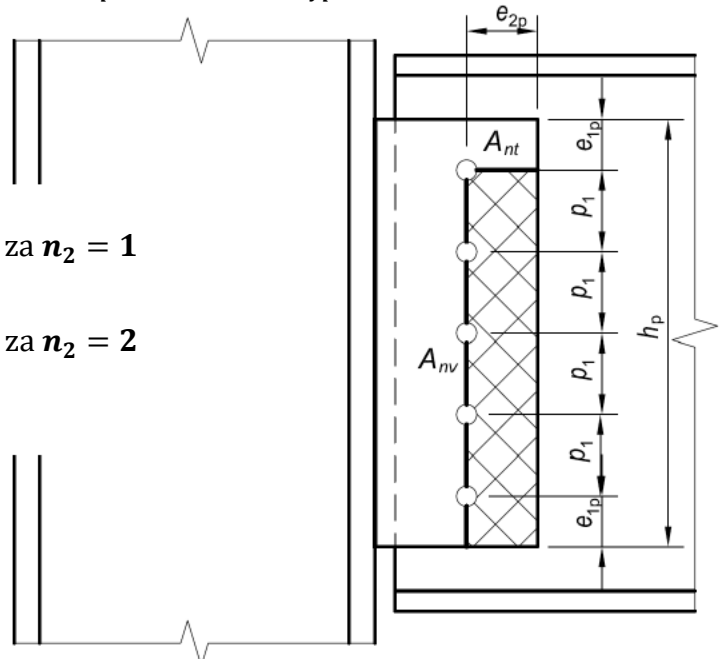
$$A_{nt} = t_p \left(e_{2p} - \frac{d_0}{2} \right)$$

za $n_2 = 1$

$$A_{nt} = t_p \left(p_2 + e_{2p} - \frac{3d_0}{2} \right)$$

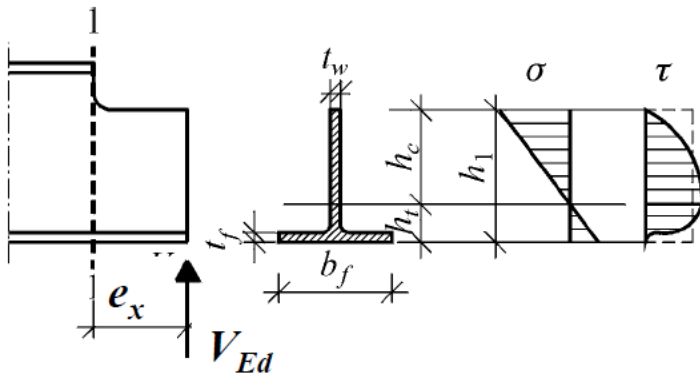
za $n_2 = 2$

$$A_{nv} = t_p (h_p - e_1 - (n_1 - 0.5)d_0)$$

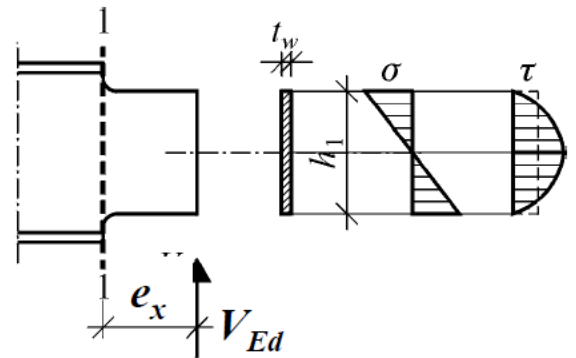


Kontrola oslabljenog preseka u slučaju zasecanja nožice

Jednostrano zasecanje



Dvostrano zasecanje



$$V_{Ed} \leq V_{Rd}$$

$$M_{Ed} = V_{Ed}e_x \leq M_{c,Rd}$$

Preporuke za dimenzionisanje veze

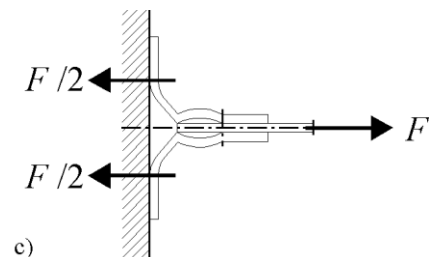
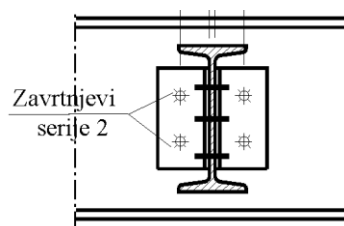
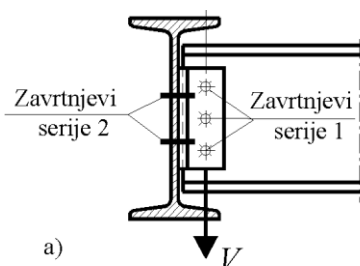
- Pri projektovanju je neophodno da se definiše broj zavrtnjeva (n) i dimenzije priključnog lima (h_p , t_p i b_p);
- Potreban broj zavrtnjeva može da se odredi iz uslova nosivosti na smicanje ($V_{Rd,1}$);
- Potom se oblikuje veza i definišu sva rastojanja izmedju zavrtnjeva (e_1 , p_1 , ...) i proverava nosivost na pritisak po omotaču rupe ($V_{Rd,2}$, $V_{Rd,3}$) na osnovu koje se može dobiti potrebna debljina priključnog lima (t_p)!
- Visina priključnog lima se određuje na osnovu minimalnih rastojanja izmedju zavrtnjeva i nosivosti priključnog lima na smicanje ($V_{Rd,4}$ i $V_{Rd,5}$);
- Potom se proveravaju ostale nosivosti!
- Konstruisanjem priključnog lima može se postići da njegova nosivost na savijanje ($V_{Rd,7}$) i izbočavanje nisu merodavne ($V_{Rd,8}$)

40. Proračun i konstruisanje zglobnih veza sa priključnim ugaonicima

Ovakve veze su slične vezama sa priključnim limom, s tim što ulogu priključnog lima preuzimaju dva priključna ugaonika. Vezivanje ugaonika za priključnu površinu ostvaruje se zavrtnjevima.

Obrtanje oslonackog preseka zglobno oslonjenog nosaca sistema proste grede izaziva i obrtanje veze. To se vrsi na račun deformacije gornjeg dela ugaonika, vrata zavrtnjeva izlozenih cupanju i priključne površine, ukoliko ona nije kruta.

Razlikuju se dve serije zavrtnjeva. Zavrtnjevi za vezu rebra nosaca sa priključnim ugaonikom nazivaju se zavrtnjevi serije 1, a zavrtnjevi kojima se ostvaruje veza ugaonika sa priključnom površinom, zavrtnjevi serije 2.



Elementi veze koji učestvuju u prenošenju opterećenja su:

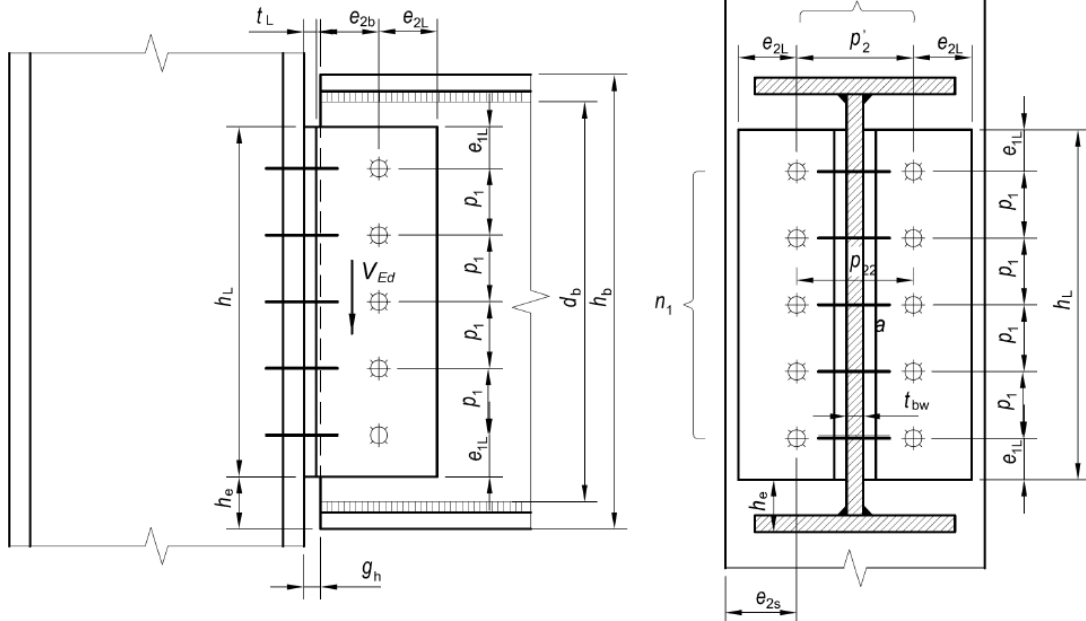
1. **Zavrtnjevi serije 1** (kao kod priključnog lima);
2. **Zavrtnjevi serije 2** (kao kod čelone ploče);
3. **Priključni ugaonici** (jednakokraki ili raznokraki);
4. **Rebro grede** (kao kod priključnog lima);

$$V_{Rd} = \sum_{i=1}^{16} \min V_{Rd,i}$$

Veza sa priključnim ugaonicima – označavanje

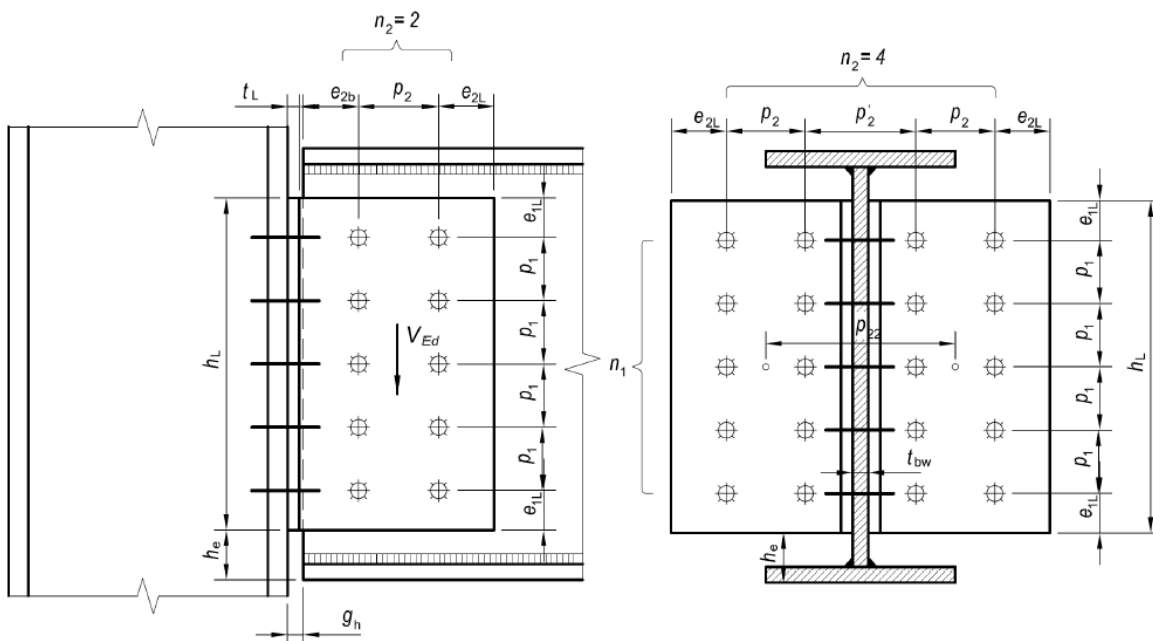
Jedan red zavrtnjeva serije 1 ($n_2 = 1$)

Dva reda zavrtnjeva serije 2 ($n_2 = 2$)



Dva reda zavrtnjeva serije 1 ($n_2 = 2$)

Četiri reda zavrtnjeva serije 2 ($n_2 = 4$)



1. Nosivost zavrtnjeva serije 1

Kao kod veze sa priključnim limom:

1. Nosivost zavrtnjeva na smicanje – $V_{Rd,1}$ (dvosečni!);
2. Nosivost ugaonika na pritisak po omotaču rupe - $V_{Rd,2}$ (dvostruka debljina lima $2t_L$);
Uglavnom nije merodavna!
3. Nosivost rebra grede na pritisak po omotaču rupe - $V_{Rd,3}$;

2. Nosivost zavrtnjeva serije 2

U potpunosti kao kod veze sa čeonom pločom:

1. Nosivost zavrtnjeva na smicanje - $V_{Rd,4}$ (jednosečni);
2. Nosivost ugaonika na pritisak po omotaču rupe - $V_{Rd,5}$;
3. Nosivost oslonačkog lima na pritisak po omotaču rupe - $V_{Rd,6}$;

3. Nosivost priključnih ugaonika

1. Nosivost bruto preseka na smicanje - $V_{Rd,7}$ (kao kod veze sa priključnim limom - dvostruka debljina lima $2t_L$);
2. Nosivost neto preseka na smicanje - $V_{Rd,8}$ (kao kod veze sa priključnim limom - dvostruka debljina lima $2t_L$);
3. Nosivost na cepanje bloka - $V_{Rd,9}$ (kao kod veze sa priključnim limom - dvostruka debljina lima $2t_L$);
4. Nosivost na savijanje kraka ugaonika kod zavrtnjeva serije 1 - $V_{Rd,10}$ (kao kod veze sa priključnim limom - dvostruka debljina lima $2t_L$);
5. Nosivost na izbočavanje $V_{Rd,11}$ (kao kod veze sa priključnim limom - dvostruka debljina lima $2t_L$);
6. Nosivost na savijanje kraka ugaonika kod zavrtnjeva serije 2 - $V_{Rd,12}$ (kao kod čeone ploče);
7. Nosivost na cepanje bloka kraka ugaonika, kod zavrtnjeva serije 2 - $V_{Rd,13}$ (kao kod veze sa čeonom pločom);

Pravilnim izborom ugaonika može se postići da su svi kriterijumi nosivosti ugaonika zadovoljeni, odnosno nisu merodavni! Debljina ugaonika t_L se usvaja u zavisnosti od debljine rebra grede t_{bw} koja se spaja i prečnika zavrtnjeva.

4. Nosivost rebra grede

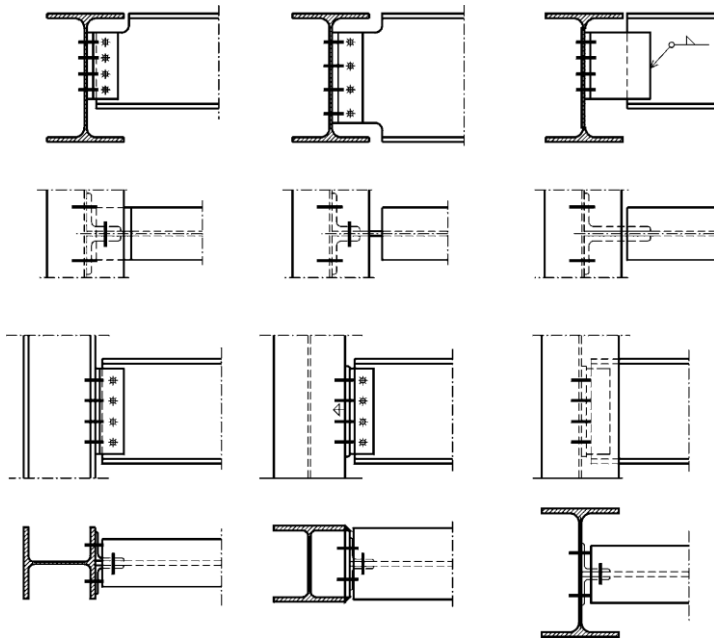
Identično kao kod veze sa priključnim limom:

1. Nosivost bruto preseka na smicanje - $V_{Rd,14}$;
2. Nosivost neto preseka na smicanje - $V_{Rd,15}$;
3. Nosivost na cepanje bloka – $V_{Rd,16}$

Preporuke za dimenzionisanje veze

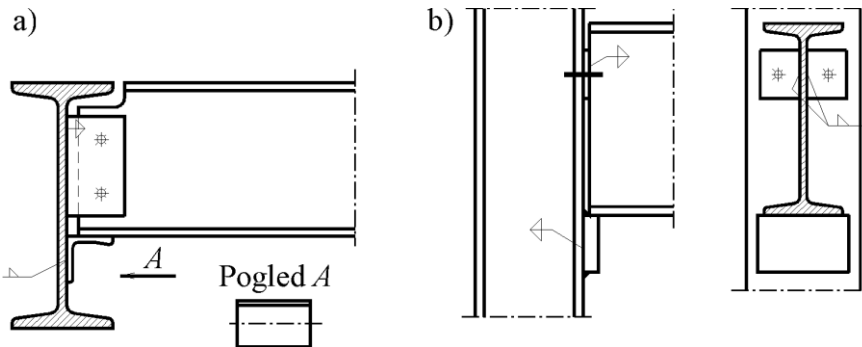
- Kod zavrtnjeva serije 1 najčešće je merodavan pritisak po omotaču rupe rebra nosača $V_{Rd,3}$ na osnovu koga se može odrediti potreban broj zavrtnjeva;
- Broj zavrtnjeva serije 2 je dvostruko veći od zavrtnjeva serije 1, pa uslovi njihove nosivosti ($V_{Rd,4}$, $V_{Rd,5}$ i $V_{Rd,6}$) uglavnom nisu kritični;
- Dimenzije priključnih ugaonika se usvajaju u zavisnosti od prečnika zavrtnjeva i debljine rebra grede;
- Zbog dvostruke debljine lima, nosivosti kraka ugaonika za vezu zavrtnjeva serije 1 ($V_{Rd,7}$ do $V_{Rd,11}$) uglavnom nisu merodavne!
- Preostali uslovi moraju da se provere!
- Ako je geometrija ista (isti broj i raspored zavrtnjeva) nosivost na cepanje bloka smicanjem ($V_{Rd,9}$) je ista za krak ugaonika na rebro nosača i na oslonačkom limu, pa se ne mora posebno proveravati!

Karakteristični primeri primene



41. Proračun i konstruisanje zglobnih veza sa stolicom

Ovo rešenje je posebno pogodno za laku montazu nosaca. Kao stolica se najcesce koristi ugaonik ili lim (velike debljine) preko kojeg se direktnim kontaktom prenosi reakcija nosaca. Veza rebra sa prikljucnim limom ima za cilj samo da spreči skliznuce ili bocno preturanje nosaca. Kako reakcija nosaca deluje negde na kraku ugaonika, javlja se ekscentricitet, pa dolazi do pojave torzionog momenta u podvlaci. Stoga, podvlaka mora da bude oblikovana kao torziona kruta da bi prihvatila moment torzije, ili se pak predviđaju druge konstruktivne mere da bi se sprečilo njeno uvijanje.



Zavarena veza stolice od L profila

Za proračun veza kod kojih se, umesto zavrtnjeva, ugaonik vezuje za prikljucnu površinu zavarivanje pomocu ugaonih savova vazi sledeca pretpostavka:

- Vertikalni savovi prenose citavu smicucu silu V , a da se moment ekscentriciteta prenosi pomocu horizontalnih stavova, pa treba pokazati da je :

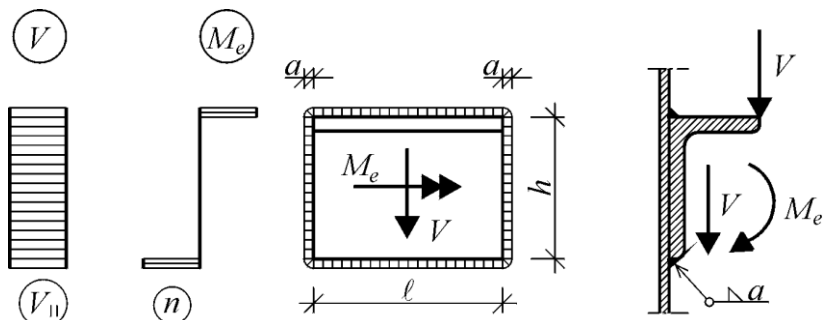
Vertikalni savovi:

$$\tau_{II} = V_{Ed}/2ah \leq f_{vw,d}$$

Horizontalni savovi: $M_{Ed} = V_{Ed}e$

$$\sigma_w = \frac{M_{Ed}/h}{al} \quad \sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{M_{Ed}/h}{\sqrt{2}al}$$

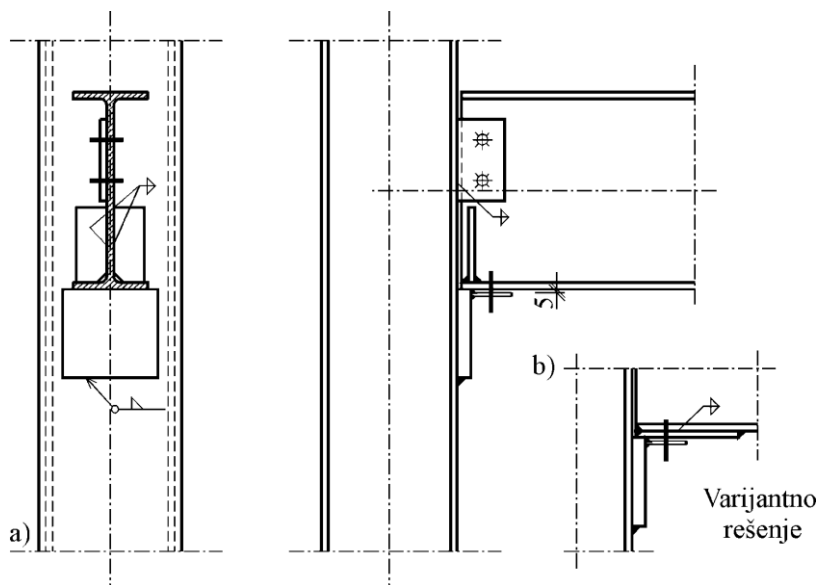
$$\sigma_u = \sqrt{2} \frac{M_{Ed}/h}{al} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{m2}}$$



Ako se raspolaze dovoljnom visinom, na primer kod veza nosaca sa stubom, veze mogu da se izvedu pomocu stolice u vidu pljosteg celicnog lima. Povoljnost ovakvih veza je sto se precizno moze definisati polozaj rezultante V. I kod ovakvih veza neophodno je da se izvrsi vezivanje rebra nosaca za prikljucnu povrstinu, u cilju spreccavanja skliznuca ili bocnog preturanja nosaca. Ovo moze da se ostvari pomocu prikljucnog lima ili ceone ploce.

Pri proracunu ovakvih veza treba voditi racuna o unosenu sile u rebro nosaca. Ukoliko rebro nije sposobno da prihvati reakciju, potrebno je predvideti ukrucenja (slika a) ili ojacati oslonacku nozicu (slika b).

Kada se dimenzionise ovakva veza potrebno je da se obezbedi pravilno unosenje sile u rebro nosaca i da se proverii veza stolice sa priliucnom povrstinom. Unosenje sile u rebro nosaca ostvaruje se na razlicite nacine, u zavisnosti od toga da li je postavljeno ukrucenje ili ne.



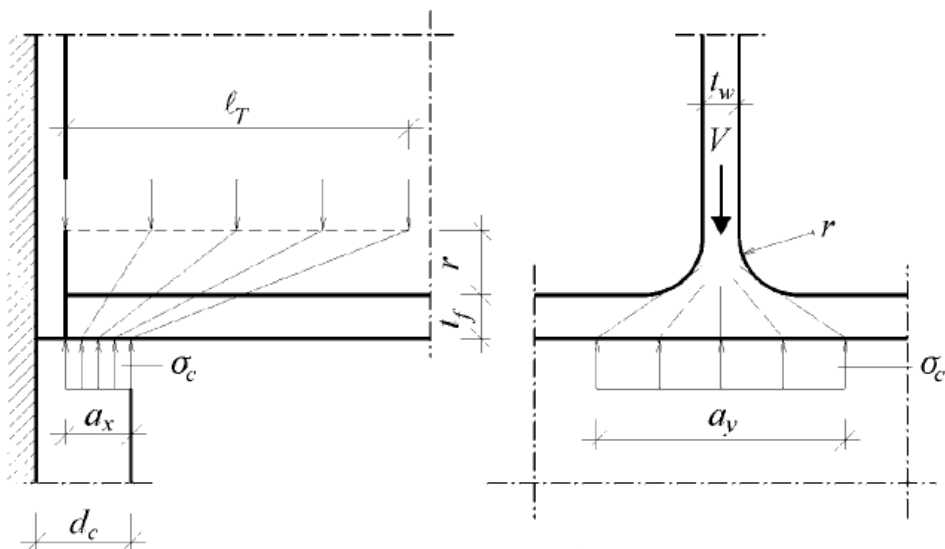
Slucaj bez ukrucenja

Pretpostavlja se da je pritisak na kontaktnoj povrstinu ravnometno rasporedjen, odnosno $\sigma_D = const$. Dimenzije kontaktne povrshine se odredjuju na sledeci nacin:

$$a_x \leq 1.25(t_f + r)$$

$$a_y = t_w + 1.46r + 3.46t_f$$

$$A = a_x a_y$$



Kontrola kontaktnog napona pritiska:

$$\sigma_{c,ED} = \frac{V_{Ed}}{A} \leq \sigma_{c,D}$$

$$\sigma_{c,D} \approx f_{h,Rd} = 2.5f_y/\gamma_{m6}$$

$$\gamma_{m6} = 1.0$$

Tok sila pri njihovom prelasku sa kontaktne površine u rebro nosaca je linearan. Minimalna sirina rebra l_T na kojoj se vrši unosenje sile iznosi:

$$l_T = a_x + 2.5(t_f + r) \leq 3.75(t_f + r)$$

Efektivna površina rebra:

$$A_{w,eff} = l_T t_w$$

Vitkost rebra:

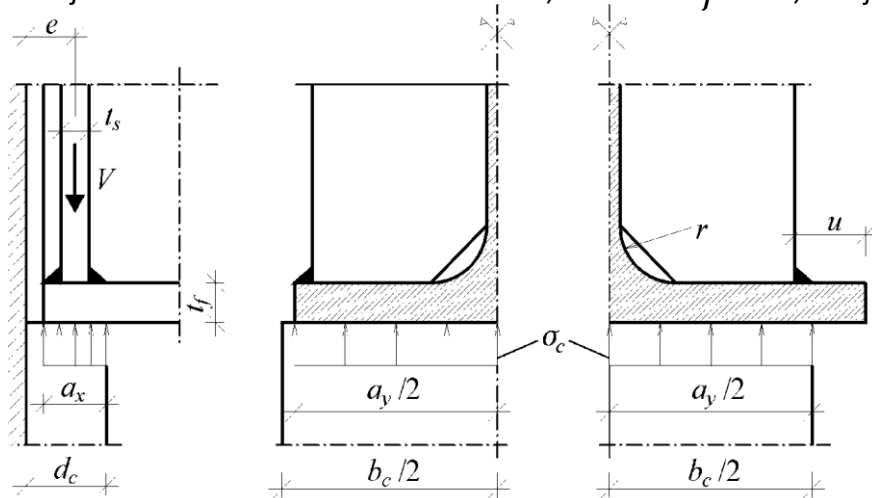
$$\lambda = \frac{l_i}{i_{min}} = \frac{0.75h}{0.289t_w} = \frac{2.595h}{t_w} \rightarrow \chi \text{ (kriva C)}$$

Kontrola nosivosti rebra na izvijanje:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd} = \frac{\chi A_{w,eff} f_y}{\gamma_{m1}}$$

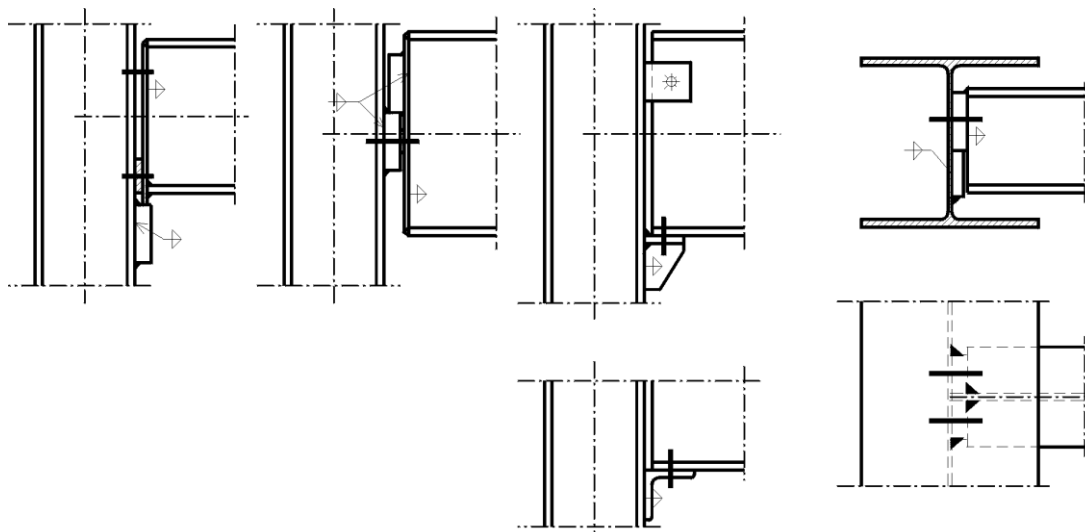
Kod reakcija većeg intenziteta neophodno je da se postave ukrućenja za prijem oslonacke reakcije i njeno ravnomerno unosenje u rebro nosaca, tj. ukoliko uslov stabilnosti rebra nije zadovoljen, potrebno je predvideti oslonacka ukrućenja u vidu vertikalnih limova

Po. vrsina ukrućenja ulazi u efektivnu površinu, a povećava se i poluprecnik inercije idealizovanog stapa upravno na ravan rebra, tj. kontaktna površina je u ovom slučaju znatno veća, jer nema ograničenja u pogledu širine i dužine krutog oslanjanja. Širina oslonca a_x je jednaka dužini dodira stolice i nosaca (bez ograničenja), dok dužina krutog oslonca a_y jednaka širini nožice nosaca b_f , ako je širina stolice veća od širine nosaca, odnosno $b_f - 2u$, ako je nožica prepustena.



$$A_{eff} = 2t_s(b_s - c) + A_{w,eff}$$

Primeri zglobnih veza ostvarenih pomoću stolice



Momentne veze

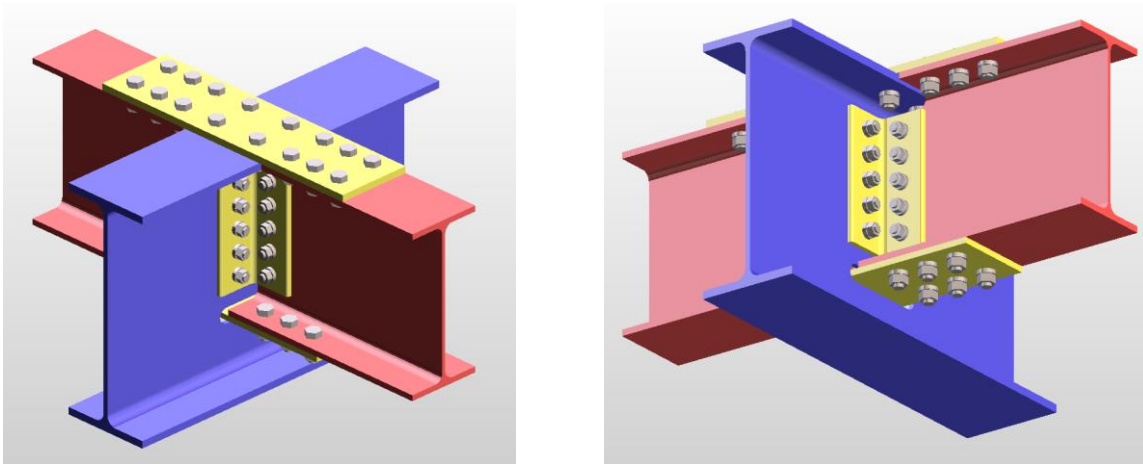
Karakteristike momentnih veza

- Sposobne su da prenesu i momente savijanja;
- U ovu kategoriju spadaju: **krute i polu-krute**, odnosno **potpuno** ili **delimično nosive** veze;
- Mogu da budu između dva nosača (roštiljni sistem), ili između nosača i stuba (okvirni sistem);
- Obezbeđuju bolju preraspodelu momenata savijanja, manja naprezanja i manje deformacije (ugibe);
- Za prenošenje momenata savijanja potrebno je predvideti posebne konstrukcijske elemente, pa momentne veze zahtevaju veći utrošak čelika od zglobnih, a i izrada je nešto složenija;
- Sistemi sa momentnim vezama (statički neodređenih nosači) su osetljivi na neravnomerno sleganje oslonaca;

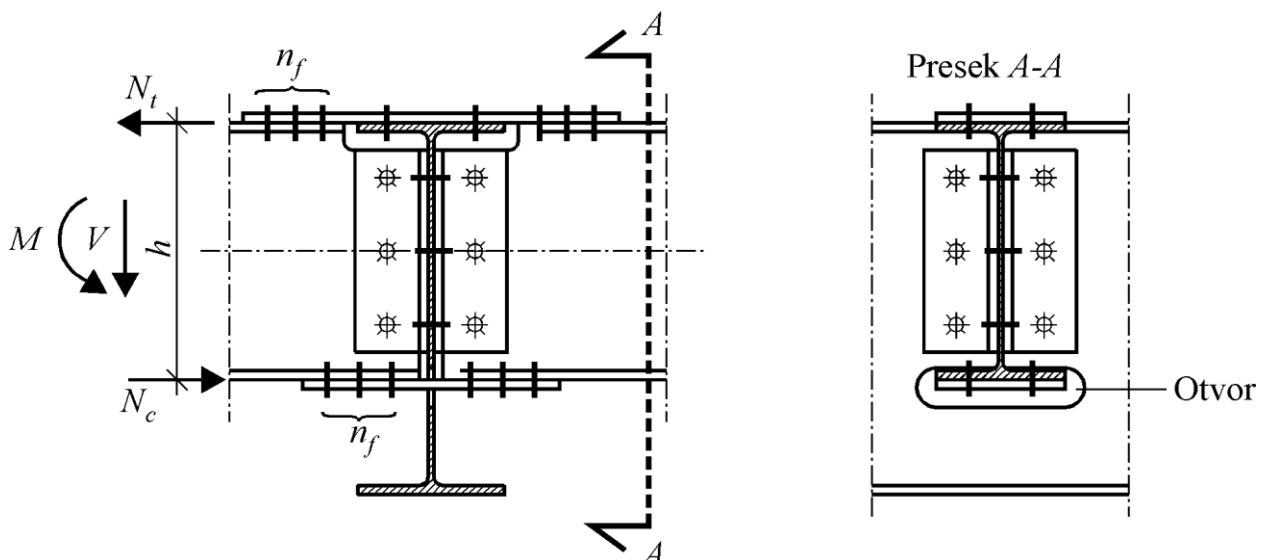
Podela momentnih veza prema načinu oblikovanja

- **Veze sa kontinuitet lamelom** (npr. veze podužnih i poprečnih nosača kod železničkih mostova)
- **Veze sa čeonom pločom** (npr. veze između greda i stubova okvirnih nosača, ...)
- **Veze u kompletno zavarenoj izradi** (npr. veze između greda i stubova okvirnih nosača, ...)
- **Veze sa veznim ugaonicima na nožicama** (npr. veze između greda i stubova okvirnih nosača)

42. Proračun i konstruisanje momentnih veza sa kontinuitet lamelom



Veze sa kontinuitet lamelom



Proračun veze sa kontinuitet lamelnom

Kod momentnih veza je potrebno obezbediti prenošenje momenta savijanja (M_{Ed}) i transverzalnih sila ($V_{1,Ed}$ i $V_{2,Ed}$);

Osnovni koraci pri proračunu su:

- Kontrola nosivosti oslabljenog preseka,
- Proračun kontinuitet lamele i njene veze sa nožicom nosača (prenošenje momenta savijanja M_{Ed});
- Proračun veze rebra nosača (prenošenje transverzalnih sila $V_{1,Ed}$ i $V_{2,Ed}$)

Kontrola nosivosti oslabljenog preseka

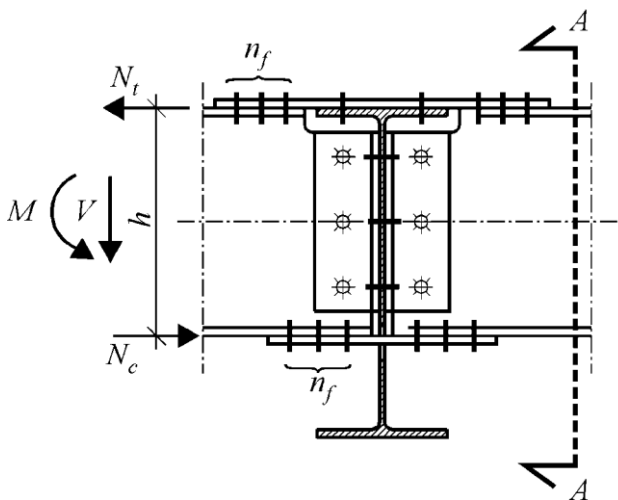
Kontrola normalnih napona:

$$M_{Ed} \leq M_{u,net,Rd}$$

M_{Ed} proračunski vrednost momenta na mestu veze

$M_{u,net,Rd}$ proračunski moment nosivosti oslabljenog preseka na mestu rupa za zavrtnjeve

Proračun kontinuitet lamele



Moment savijanja M_{Ed} se deli na spreg sila (zatezanje $N_{t,Ed}$ i pritisak $N_{c,Ed}$);

Krak sila jednak je visini nosača ($z = h$);

Gornja, zategnuta kontinuitet lamela dimenzioniše se prema neto preseku:

$$N_{p,Rd} = \min\left(A_p \frac{f_y}{\gamma_{m0}}; 0.9 A_{p,net} \frac{f_u}{\gamma_{m2}}\right)$$

$$N_{t,Ed} = -N_{c,Ed} = \frac{M_{Ed}}{z}$$

$$\frac{N_{t,Ed}}{N_{p,Rd}} \leq 1$$

Potrebna debljina kontinuitet lamele

$$t_p \geq \frac{N_{t,Ed} \gamma_{m2}}{0.9 f_u (b_p - n_{f,1} d_{0,f})} \quad \text{ali} \quad t_p \geq \frac{N_{t,Ed} \gamma_{m0}}{f_y b_p}$$

b_p širina koninuitet lamele

$d_{0,f}$ prečnik rupe za zavrtnaj

$n_{f,1}$ broj zavrtnjeva u jednom redu

Proračun veze kontinuitet lamele sa nožicom nosača

Veza se po pravilu ostvaruje pomoću zavrtnjeva (običnih ili visokovrednih, prednapregnutih) Potreban broj zavrtnjeva se određuje na osnovu sile zatezanja $N_{t,Ed}$:

$$n_f \geq \frac{N_{t,Ed}}{F_{Rd}} \quad F_{Rd} = \min(F_{V,Rd}; \min F_{b,Rd})$$

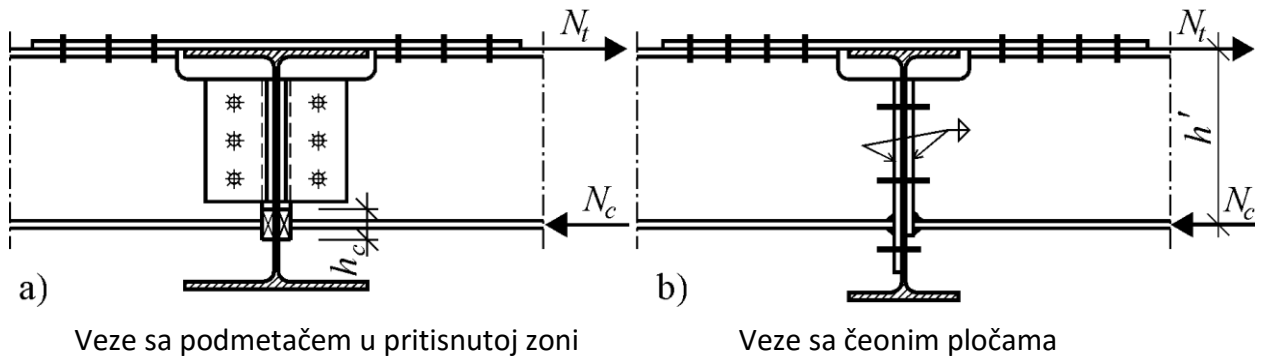
F_{Rd} minimalna nosivost zavrtnja u smičućem spoju (smicanje zavrtnja, pritisak po omotaču rupe nožice i kontinuitet lamele)

Prenošenje sile pritiska u zoni donje nožice

Može da se ostvari na više načina:

1. Isto kao u slučaju zategnute nožice pomoću kontiuitet lamele i zavrtnjeva; U ovom slučaju neophodno je da se predvidi otvor u rebro poprečnog (primarnog) nosača (mostogradanja);
2. Direktnim kontaktom preko podmetača od ravnog lima (zgradarstvo);
3. Pomoću stolice;

Krute veze sa kontinuitet lamelama u zgradarstvu



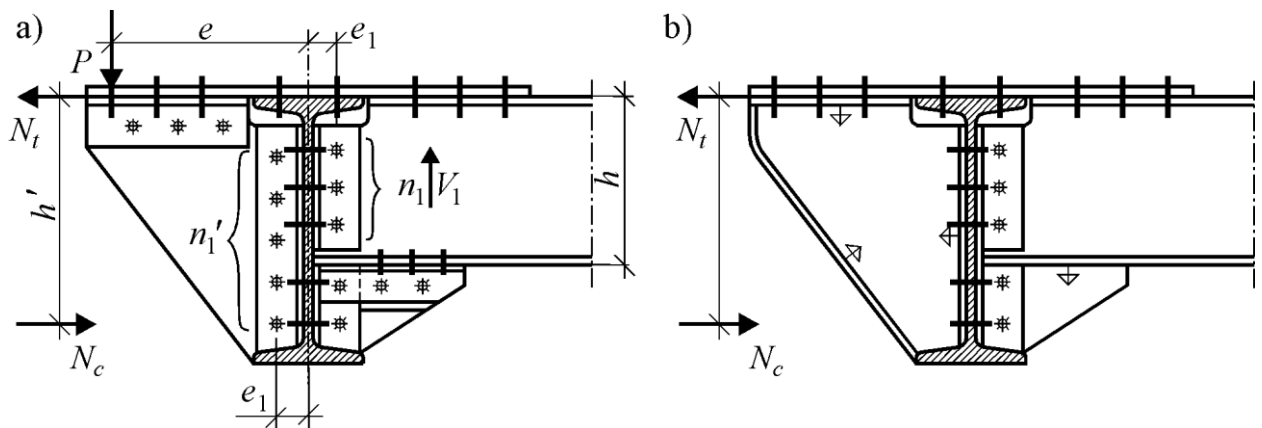
Prenošenje smičuće sile

Smičuća sila se prenosi rebrom nosača;

Prenos sile smicanja može da se ostvari na dva načina:

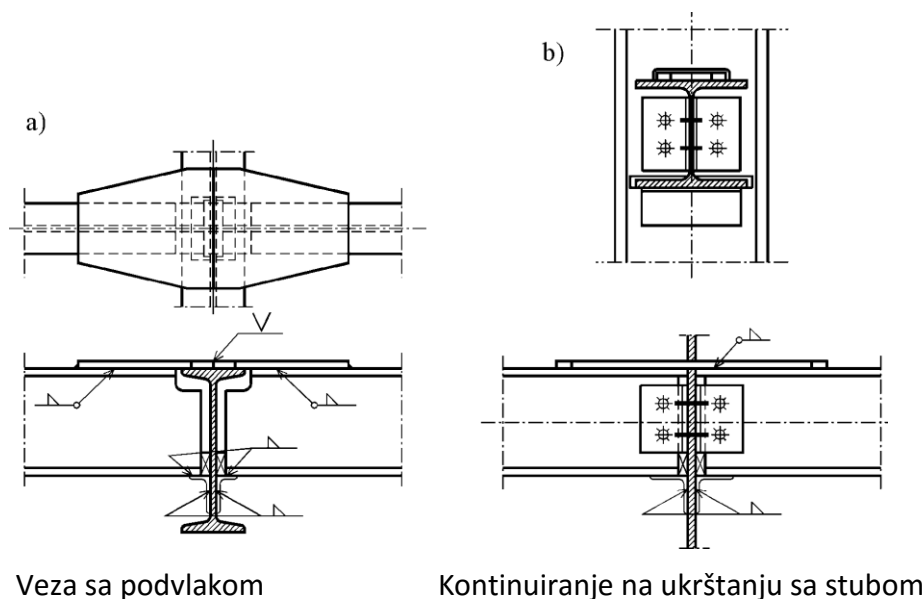
- Pomoću priključnih ugaonika i zavrtnjeva **serije 1** i **serije 2**. Proračun u potpunosti kao kod zglobne veze sa priključnim ugaonicima ($V_{Ed}; M_{Ed} = V_{Ed}e$);
- Pomoću čeone ploče i zavrtnjeva. Proračun u potpunosti kao kod zglobne veze sa čeonom pločom (V_{Ed});

Veza konzolnog završetka podužnog nosača



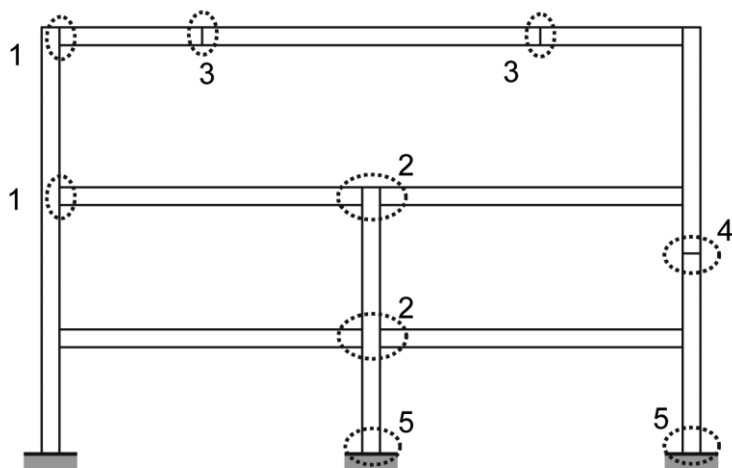
$$N_{t,Ed} = -N_{c,Ed} = \frac{P_{Ed}e}{z}$$

Primeri kontinuiranja nosača u zgradarstvu, pomoću zavarenih kontinuitet lamela



Momentne veze greda-stub

Različiti položaji i konfiguracije veza

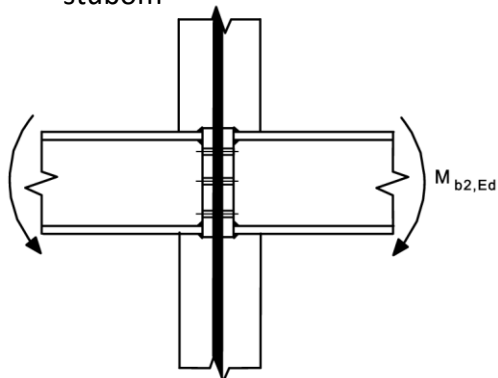


Oko jače ose inercije

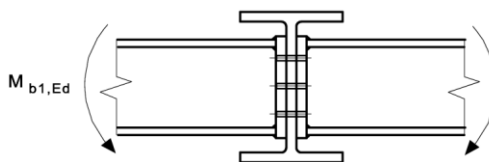
- 1 Jednostrana veza greda-stub
- 2 Dvostrana veza greda-stub
- 3 Nastavak grede
- 4 Nastavak stuba
- 5 Stopa stuba

Na ukrstanju sa:

stubom



gredom



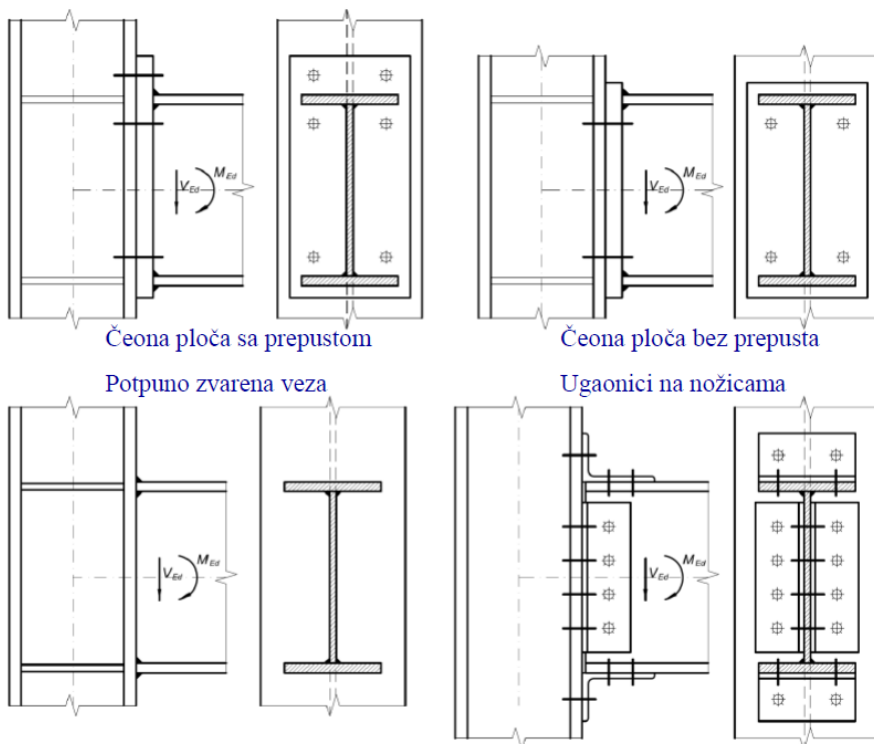
Oko slabije ose inercije

Tipovi momentnih veza prema EC3

Obuhvaćeni su sledeći tipovi veza:

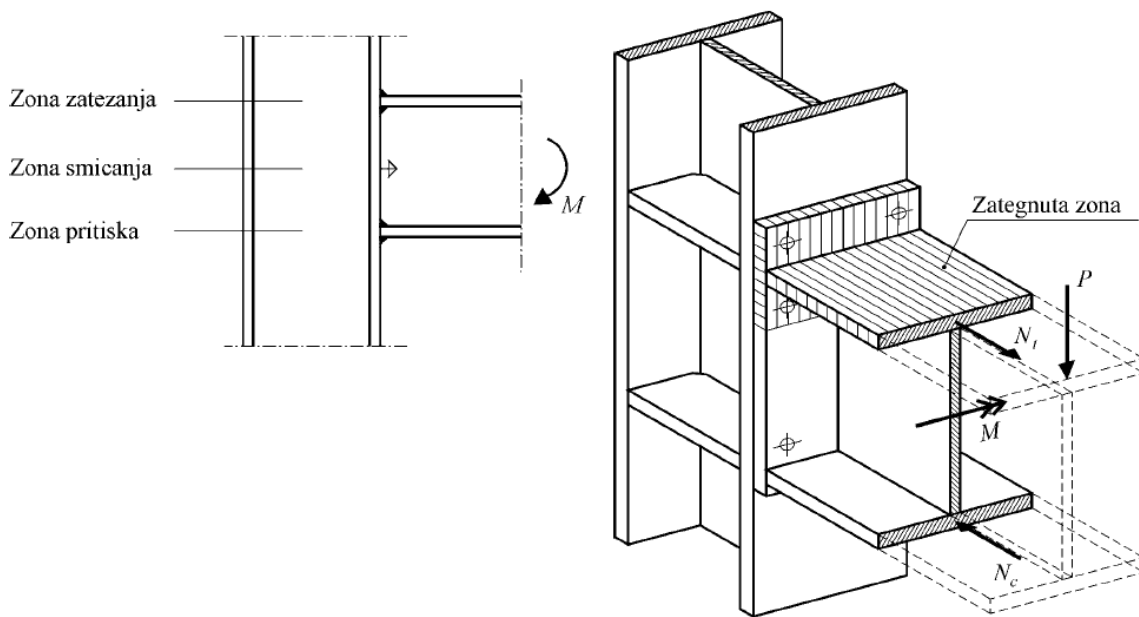
- Veza sa čeonom pločom (sa prepustom i bez prepusta),
- Veza u kompletno zavarenoj izradi,
- Veza sa ugaonicima na nožicama.

Momentne veze greda-stub



43. Zone naprezanja, potencijalni vidovi loma i komponente veze kod momentnih veza greda-stub

Zone naprezanja kod momentnih veza greda-stub



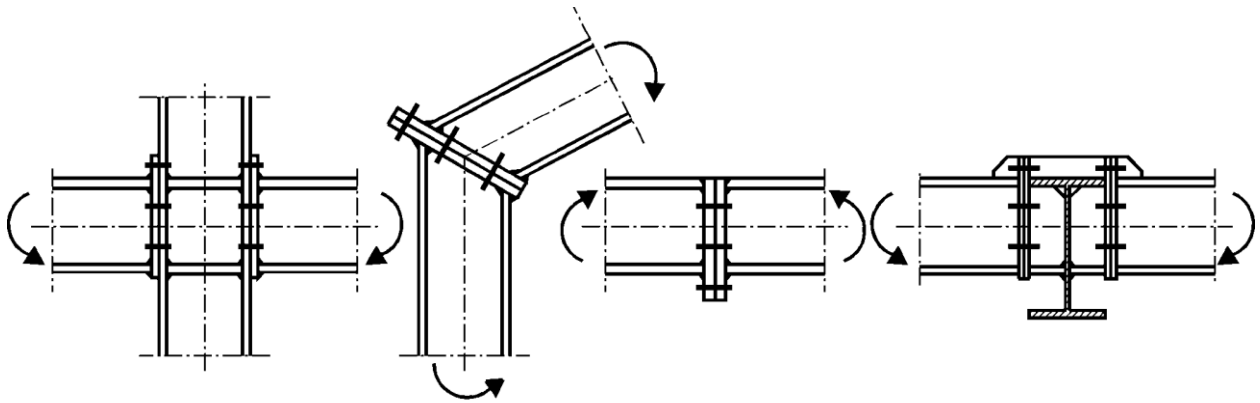
Komponente veze

- Evrokod razlikuje 20 komponenta koje učestvuju u prenošenju opterećenja kod različitih veza greda-stub.
- Različiti tipovi veza sadrže različite komponente!
- Nosivost određene zone naprezanja se određuje kao nosivost najslabije komponente u toj zoni.
- **Nosivost šavova ne sme da predstavljaju najslabiju komponentu u zoni naprezanja**, to jest moment nosivosti veze $M_{j,Rd}$ treba da bude ograničen nosivošću drugih komponenta!

Najznačajnije osnovne komponente veza

| Komponenta | | Komponenta | |
|------------|---|------------|---|
| 1 | Smičuće polje rebra stuba | 7 | Nožica i rebro grede ili stuba opterećeni pritiskom |
| 2 | Rebro stuba opterećeno poprečnim pritiskom | 8 | Rebro grede opterećeno zatezanjem |
| 3 | Rebro stuba opterećeno poprečnim zatezanjem | 9 | Ravan lim opterećen zatezanjem ili pritiskom |
| 4 | Nožica stuba opterećena savijanjem | 10 | Zavrtnjevi opterećeni na zatezanje |
| 5 | Čeona ploča opterećena savijanjem | 11 | Zavrtnjevi opterećeni na smicanje |
| 6 | Ugaonik na nožici opterećen savijanjem | 12 | Zavrtnjevi opterećeni na pritisak po omotaču rupe (na nožici grede ili stuba, na čeonoj ploči ili ugaoniku) |

Momentne veze sa čeonom pločom



Najčešće se koriste za :

- Veze greda-stub kod okvirnih nosača;
- Montažne nastavke nosača;
- Kontinuiranje sekundarnih nosača kod roštiljnih konstrukcija;

Proračun nosivosti veza sa čeonom pločom

- Na mestu veze deluju moment savijanja M_{Ed} i smičuća sila V_{Ed} ;
- Moment savijanja M_{Ed} se deli na spreg sila: pritiska $N_{c,Ed}$ i zatezanja $N_{t,Ed}$,

$$N_{t,Ed} = -N_{c,Ed} = \frac{M_{Ed}}{z}$$

- Silu zatezanja i pritiska prenose odgovarajuće komponente veze u zoni zatezanja $F_{t,Rd}$ odnosno pritiska $F_{c,Rd}$;
- Smičuću silu V_{Ed} prenose zavrtnjevi;

Prenošenje sile smicanja V_{Ed}

Može se pretpostaviti da zavrtnjevi u zoni zatezanja imaju punu nosivost na zatezanje (nema redukcije usled interakcije zatezanja i smicanja) ako proračunska vrednost sile smicanja nije veća od:

- nosivosti zavrtnjeva koji ne učestvuju u prenošenju sile zatezanja na smicanje:

$$\sum_{com} F_{V,Rd} \geq V_{Ed}$$

- 0,4/1,4 puta nosivost svih zavrtnjeva na smicanje:

$$\frac{0.4}{1.4} \sum_{tot} F_{V,Rd} \geq V_{Ed}$$

U suprotnom neophodno je da se svi zavrtnjevi provere na kombinovano dejstvo zatezanja i smicanja:

$$\frac{F_{V,Ed}}{F_{V,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1.4F_{t,Rd}} \leq 1$$

Potencijalni oblici loma veza sa čeonom pločom usled momenta savijanja

Zona zatezanja:

- plastifikacija rebra stuba usled zatezanja,
- plastifikacija nožice stuba usled savijanja,
- plastifikacija čeonu ploče usled savijanja,
- lom zavrtnjeva zatezanjem,
- plastifikacija rebra grede u zoni zatezanja,
- lom šavova.

Zona pritiska:

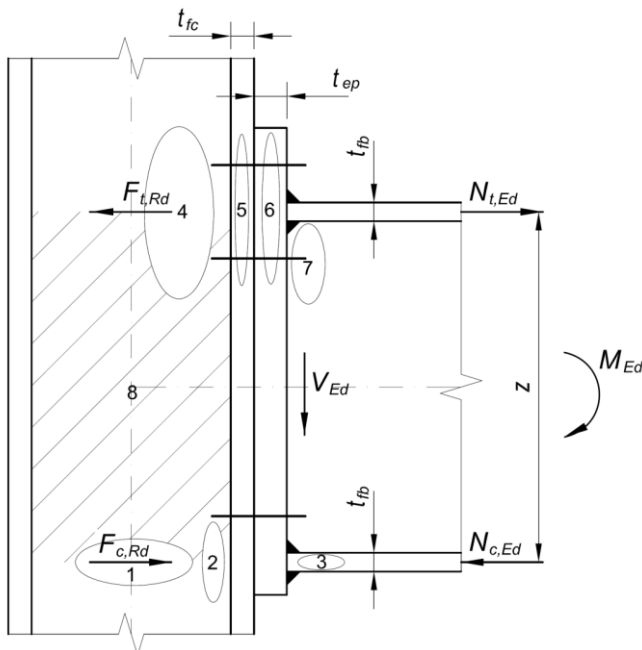
- gnječenje i izbočavanje rebra stuba,
- pritisak u nožici grede.

Zona smicanja:

- smicanje rebra stuba (panelni mehanizam loma).

44. Proračun momentne veze greda-stub sa čeonom pločom sa prepustom

Komponente veze - čeoná ploča sa prepustom



Zona pritiska:

1. Nosivost rebra stuba na izbočavanje;
2. Nosivost rebra stuba na gnječenje;
3. Nosivost nožice grede na pritisak;

Zona zatezanja:

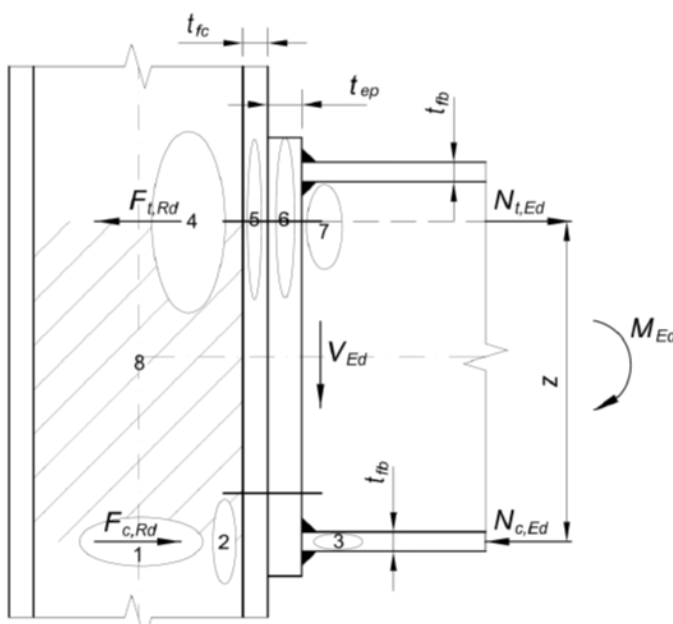
4. Nosivost rebra stuba na zatezanje;
5. Nosivost nožice stuba na savijanje i zavrtnjeva na zatezanje (T-element);
6. Nosivost čeone ploče na savijanje i zavrtnjeva na zatezanje (T-element);
7. Nosivost rebra grede na zatezanje;

Zona smicanja:

8. Nosivost smičućeg polja rebra stuba

$$F_{c,Rd} = \frac{3}{1} \min F_{c,Rd,i} \quad F_{t,Rd} = \frac{7}{4} \min F_{t,Rd,i}$$

45. Proračun momentne veze greda-stub sa čeonom pločom bez prepusta



Zona pritiska:

1. Nosivost rebra stuba na izbočavanje;
2. Nosivost rebra stuba na gnječenje;
3. Nosivost nožice grede na pritisak;

Zona zatezanja:

4. Nosivost rebra stuba na zatezanje;
5. Nosivost nožice stuba na savijanje i zavrtnjeva na zatezanje (T-element);
6. Nosivost čeone ploče na savijanje i zavrtnjeva na zatezanje (T-element);
7. Nosivost rebra grede na zatezanje;

Zona smicanja:

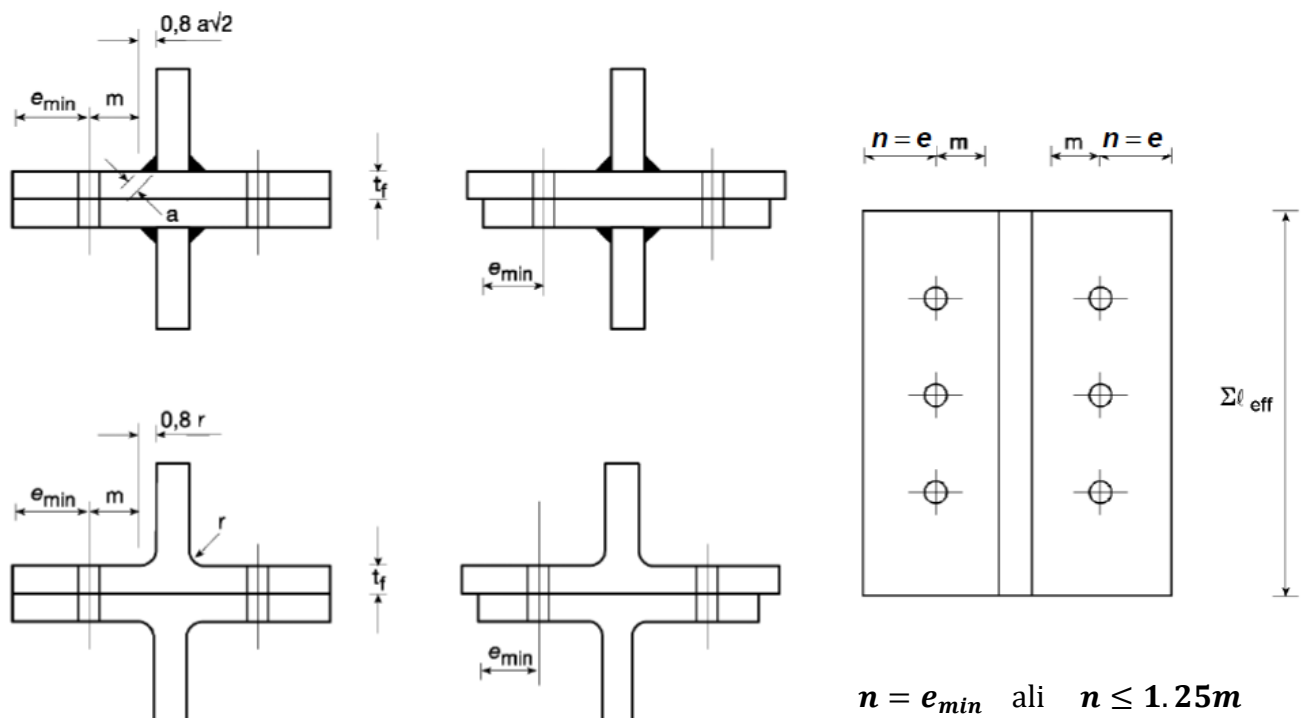
8. Nosivost smičućeg polja rebra stuba;

$$F_{c,Rd} = \frac{3}{1} \min F_{c,Rd,i} \quad F_{t,Rd} = \frac{7}{4} \min F_{t,Rd,i}$$

Ekvivalentni zategnuti T-element

- Pomoću ekvivalentnog zategnutog T-elementa se proračunava nosivost sledećih komponenta veze u zoni zatezanja:
 - Nosivost nožice stuba na savijanje i nosivost zavrtnjeva na zatezanje;
 - Nosivost čeone ploče na savijanje i nosivost zavrtnjeva na zatezanje;
- U slučaju rebra stuba sa ukrućenjima u zoni zatezanja (ukručena nožica) posebni T-elementni se koriste za modeliranje nožice stuba iznad i ispod ukrućenja;
- Isto je i kod čeone ploče sa prepustom, gde se posebni T-elementi koriste za modeliranje dela čeone ploče iznad i ispod zategnute nožice koja se tretira kao uručenje.

Dimenzije ekvivalentnog T-elementa



Σl_{eff} je efektivna dužina T-elementa koja zavisi od modela i oblika loma;

$$M_{pl,Rd} = \Sigma \frac{l_{eff} t_f^2}{4} f_y / \gamma_{m0} \text{ plastični moment nosivosti pravougaonog preseka}$$

Modeli loma T-elementa

Obuhvaćena su tri potencijalna vida loma:

1. **Model 1:** Lom potpunom plastifikacijom nožice T-elementa (nosivost $F_{T,1,Rd}$);
2. **Model 2:** Kombinovan lom delimičnom plastifikacijom nožice T-elementa i zatezanjem zavrtnjeva (nosivost $F_{T,2,Rd}$);
3. **Model 3:** Lom zatezanjem zavrtnjeva (nosivost $F_{T,3,Rd}$);

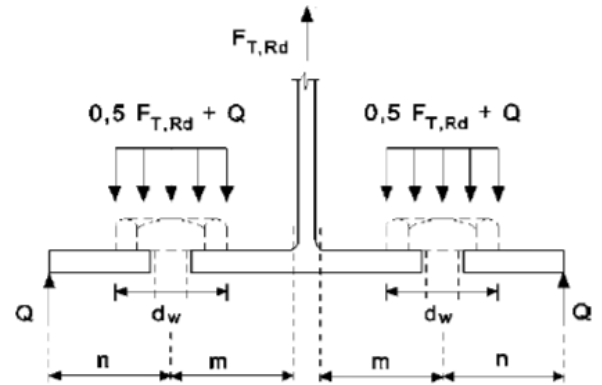
Kada postoji efekat poluge nosivost T-elementa jednaka je minimalnoj vrednosti nosivosti od sva tri modela loma: $\min(F_{T,1,Rd}, F_{T,2,Rd} \text{ i } F_{T,3,Rd})$; !

Ukoliko nema efekta poluge (kod debelih limova), modeli loma 1 i 2 se zamenjuju jedinstvenim modelom loma (nosivost $F_{T,1-2,Rd}$)! Nosivost T-elementa je u tom slučaju jednaka: $\min(F_{T,1-2,Rd} \text{ i } F_{T,3,Rd})$;

Efekti poluge

Može se smatrati da su efekti poluge zanemarljivi ako je zadovoljen sledeći uslov:

$$L_b \geq L'_b = \frac{8.8m^3 A_s n_b}{t_f^3 \sum l_{eff,1}}$$



L_b stezna dužina zavrtnja (debljina paketa + debljina podloški + polovina debljine navrtke i glave zavrtnja);

n_b broj redova zavrtnjeva (sa po dva zavrtnja);

A_s površina ispitnog preseka zavrtnja;

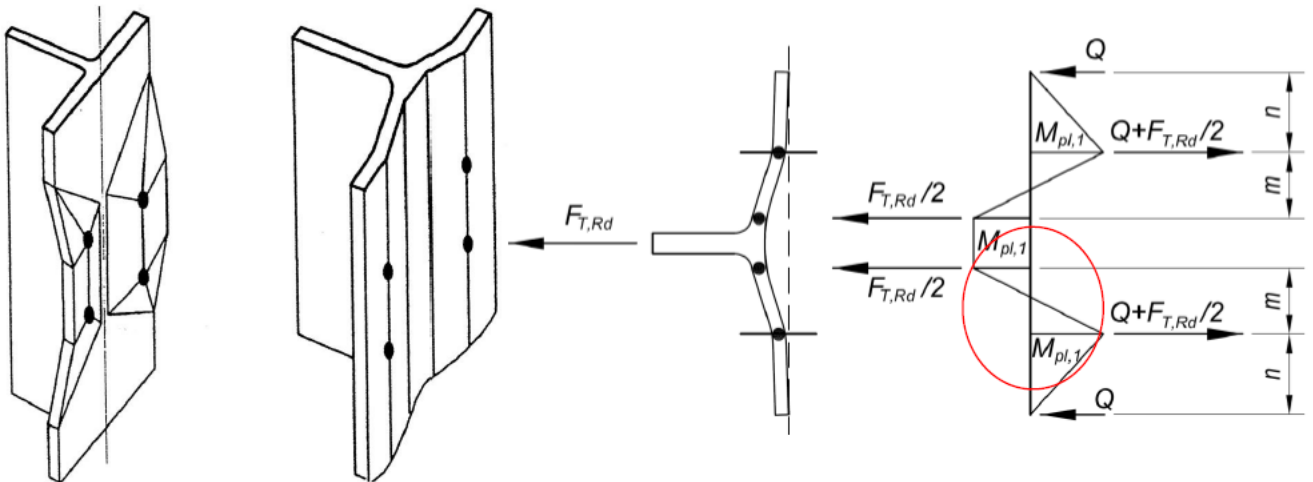
t_f debljina nožice T-elementa (nožica stuba ili čeona ploča);

$\sum l_{eff,1}$ efektivna dužina T-elementa za model loma 1;

Q sila usled efekta poluge.

Model 1: Lom potpunom plastifikacijom nožice T-elementa

Karakterističan je za nožice stuba ili čeone ploče male debljine, sa izraženim efektom poluge!

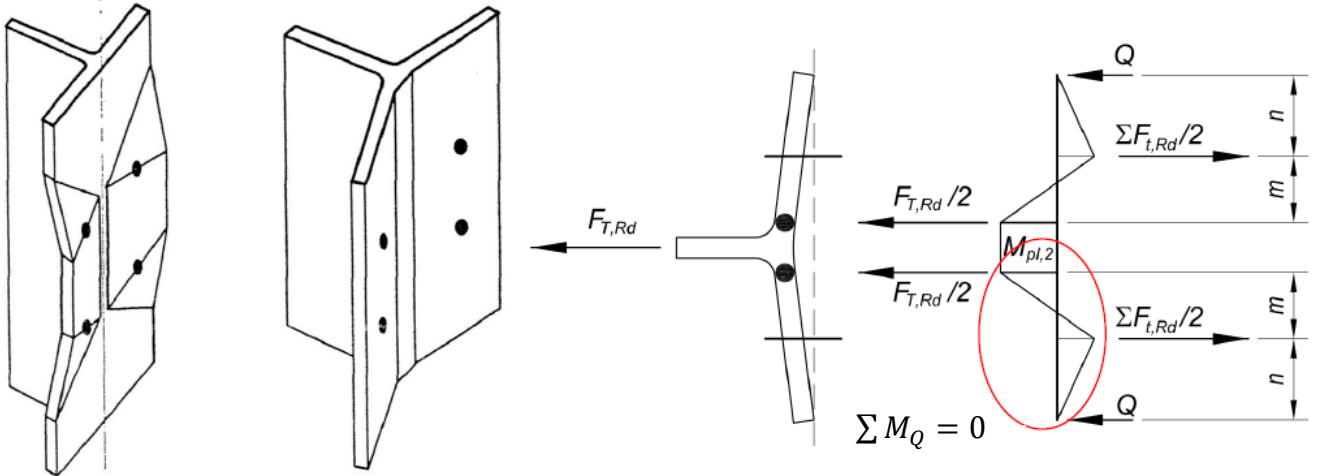


$$\frac{F_{T,1,Rd}}{2} m = 2M_{pl,1,Rd} \rightarrow F_{t,1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd}}{m}$$

$$M_{pl,1,Rd} = 0.25 \sum l_{eff,1} t_f^2 f_y / \gamma_{m0}$$

Model 2: Kombinovan lom plastifikacijom nožice T-elementa i zatezanjem zavrtnjeva

Karakterističan je za nožice stuba ili čelone ploče srednje debljine, sa malim efektom poluge!



$$\frac{F_{T,2,Rd}}{2}(m+n) - M_{pl,2,Rd} - \frac{n \sum F_{t,Rd}}{2} = 0 \rightarrow F_{T,2,Rd} = \frac{2M_{pl,2,Rd} + n \sum F_{t,Rd}}{(m+n)}$$

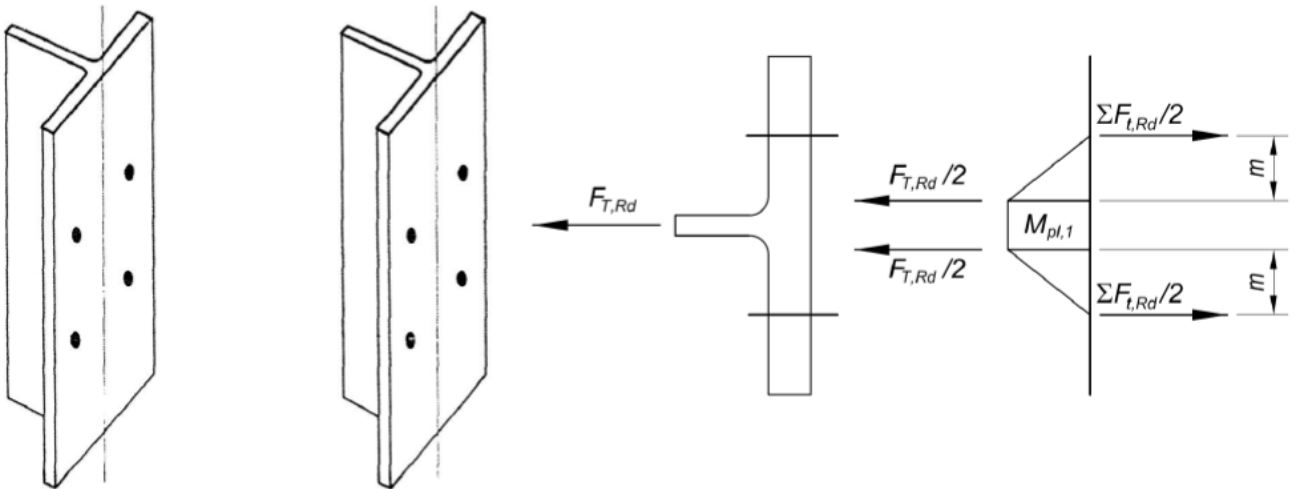
$$M_{pl,2,Rd} = 0.25 \sum l_{eff,2} t_f^2 f_y / \gamma_{m0}$$

$$F_{t,Rd} = 0.9 A_s f_{ub} / \gamma_{m2}$$

Model 3: Lom zatezanjem zavrtnjeva

Karakterističan je za nožice stuba ili čelone ploče velike debljine, kod kojih nema efekta poluge!

$$F_{T,23,Rd} = \sum F_{t,Rd} \quad F_{t,Rd} = 0.9 A_s f_{ub} / \gamma_{m2}$$



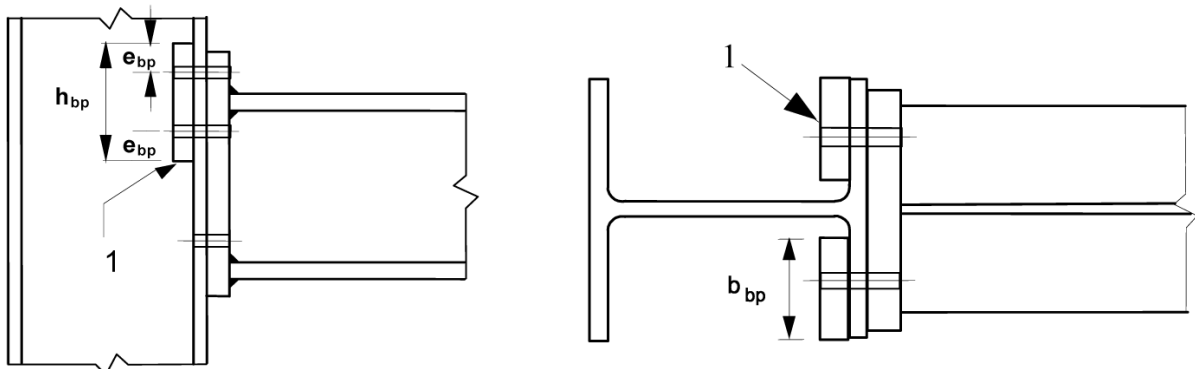
$$\frac{F_{t,1-2,Rd}}{2} m = M_{pl,1,Rd} \rightarrow F_{t,1-2,Rd} = \frac{2M_{pl,1,Rd}}{m}$$

$$M_{pl,1,Rd} = 0.25 \sum l_{eff,1} t_f^2 f_y / \gamma_{m0}$$

Proračunska nosivost T-elementa - $F_{T,Rd}$

| | Sila usled efekta poluge postoje | Nema sila usled efekta poluge |
|--|---|---|
| $F_{T,Rd}$ | $= \min(F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd})$ | $= \min(F_{T,1-2,Rd}; F_{T,3,Rd})$ |
| Model 1 | | |
| Bez kontra-pločice | $F_{T,1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd}}{m}$ | $F_{T,1-2,Rd} = \frac{2M_{pl,1,Rd}}{m}$ |
| Sa kontra-pločicom | $F_{T,1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd} + 2M_{bp,Rd}}{m}$ | |
| Model 2 | $F_{T,2,Rd} = \frac{2M_{pl,2,Rd} + n \Sigma F_{t,Rd}}{m + n}$ | |
| Model 3 | $F_{T,3,Rd} = \Sigma F_{t,Rd}$ | |
| $M_{pl,1,Rd} = 0,25 \Sigma l_{eff,1} t_f^2 f_y / \gamma_{M0}$ $\Sigma l_{eff,1}$ je vrednost Σl_{eff} za model loma 1 $M_{pl,2,Rd} = 0,25 \Sigma l_{eff,2} t_f^2 f_y / \gamma_{M0}$ $\Sigma l_{eff,2}$ je vrednost Σl_{eff} za model loma 2 $M_{bp,Rd} = 0,25 \Sigma l_{eff,1} t_{bp}^2 f_{y,bp} / \gamma_{M0}$ $n = e_{min}$ ali $n \leq 1,25m$ $\Sigma F_{t,Rd}$ zbir nosivosti svih zavrtnjeva na T-elementu na zatezanje | | |

Kontra-pločice

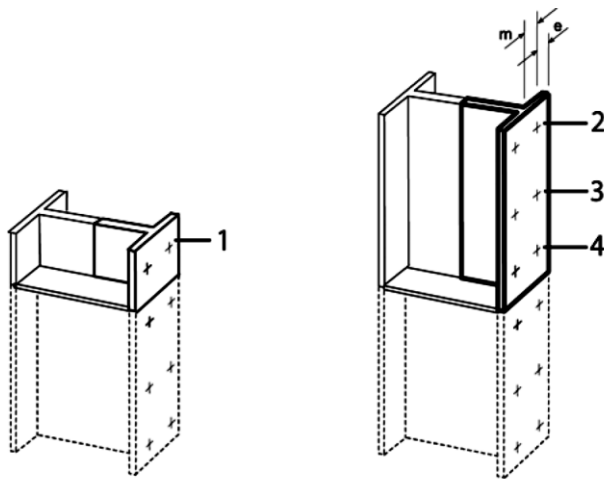


- Kontra-pločice se postavljaju sa unutrašnje strane nožice stuba, kako bi se povećala nosivost nožice stuba na savijanje;
- Opravdana je primena kod tankih nožica stuba kod kojih je merodavan model loma 1!
- Dimenzije kontra-pločice treba da budu u skladu sa preporukama prikazanim na skici!

Efektivna dužina

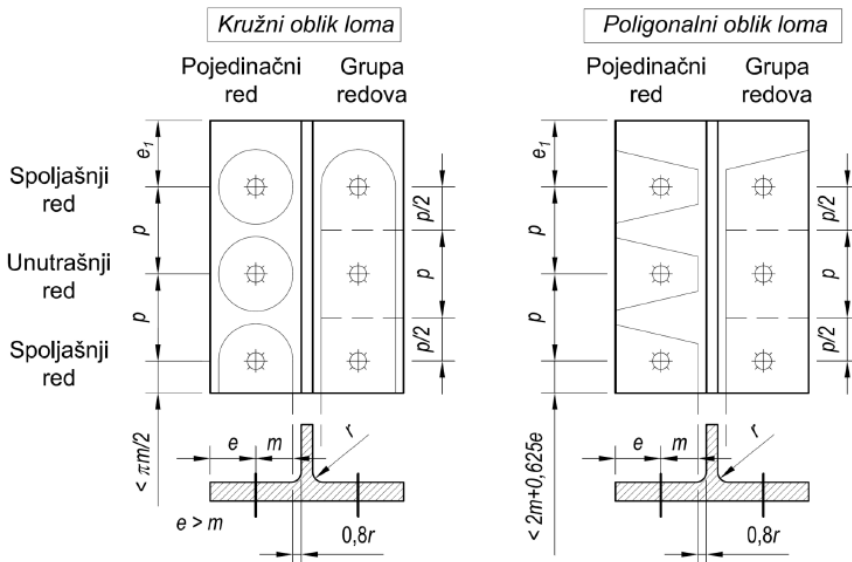
- Predstavlja zamenjujuću dužinu ekvivalentnog zategnutog T-elementa koji ima isti plastični moment nosivosti za razmatrani model i oblik loma.
- Postoje dva oblika loma: **kružni** i **poligonalni**;
- Efektivna dužina se razlikuje za **pojedinačne redove** zavrtnjeva i grupe redova zavrtnjeva;
- Takođe na efektivnu dužinu utiče i položaj reda zavrtnjeva, koji kod neukrućenih nožica stuba može biti: **spoljašnji** i **unutrašnji**.
- Kod ukrućenih nožica stuba i kod čelone ploče sa prepustom razlikuju se četiri tipa redova zavrtnjeva: **krajnji red**, **krajnji red uz ukrućenje**, **unutrašnji red**, **red uz ukrućenje**.
- Pod redom zavrtnjeva, u ovom kontekstu, se smatraju horizontalni redovi!

Redovi zavrtnjeva kod ukrućene nožice stuba



- 1 - krajnji red zavrtnjeva uz ukrućenje
- 2 - krajnji red zavrtnjeva
- 3 - unutrašnji red zavrtnjeva
- 4 - red zavrtnjeva uz ukrućenje

Kružni i poligonalni oblik loma kod neukrućenih nožica stuba



U EC su tabelarno date formule za određivanje efektivnih dužina za* :

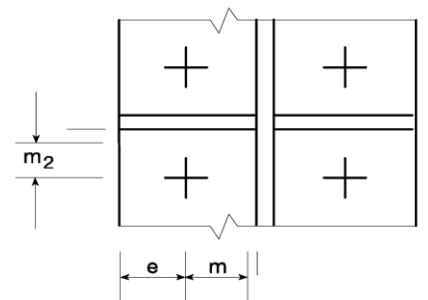
Efektivne dužine za neukrućene nožice stuba

Efektivne dužine za ukrućene nožice stuba

Efektivne dužine za čeonu ploču

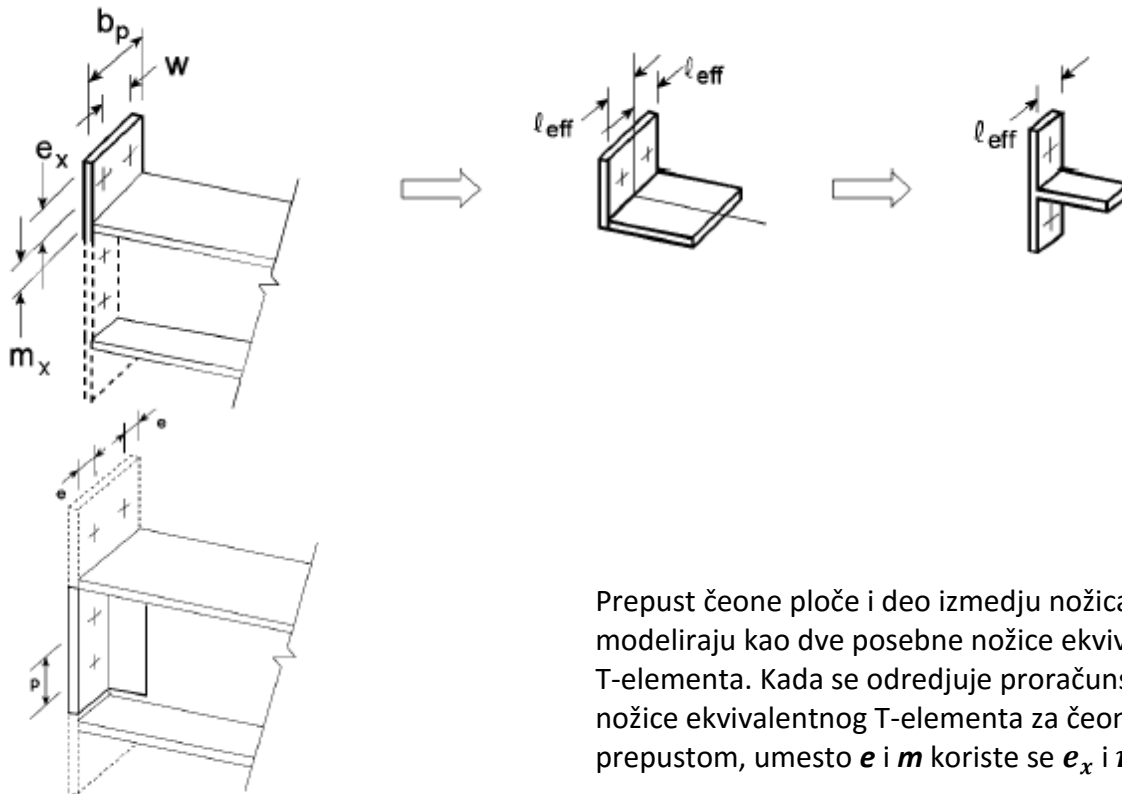
Koeficijent α javlja se u formulama za efektivne dužine za ukrućene nožice stuba.

$$\lambda_1 = \frac{m}{m + e} \quad \lambda_1 = \frac{m_2}{m + e}$$



* Efektivne dužine su date posebno za red zavrtnjeva posmatran pojedinačno i posmatran kao deo grupe zavrtnjeva. Nezavisno kako posmatran posebno se analizira kružni oblik i poligonalni oblik loma.

Modeliranje prepusta čeone ploče kao posebnog T-elementa



Prepust čeone ploče i deo između nožica grede se modeliraju kao dve posebne nožice ekvivalentnog T-elementa. Kada se određuje proračunska nosivost nožice ekvivalentnog T-elementa za čeone ploče sa prepustom, umesto e i m koriste se e_x i m_x .

47. Nosivost smičućeg polja rebra stuba kod momentne veze greda-stub

Nosivost smičućeg polja rebra stuba

- Za jednostrane i dvostrane veze kod kojih su visine greda slične, proračunska nosivost neukrućenog polja rebra stuba na smicanje je:

$$V_{wp,Rd} = \frac{0.9 f_{y,wc} A_{vc}}{\sqrt{3} \gamma_{m0}}$$

A_{vc} površina smicanja stuba, prema EN 1993-1-1.

- Proračunska nosivost na smicanje može da se poveća primenom ukrućenja ili dodatnih limova na rebru.
- Kada se poprečna ukrućenja na rebru postavljaju i u zoni pritiska i u zoni zatezanja, proračunska plastična nosivost polja rebra stuba na smicanje može da se poveća za:

$$V_{wp,add,Rd} = \frac{4M_{pl,fc,Rd}}{d_s} \quad \text{ali} \quad V_{wp,add,Rd} \leq \frac{2M_{pl,fc,Rd} + 2M_{pl,st,Rd}}{d_s}$$

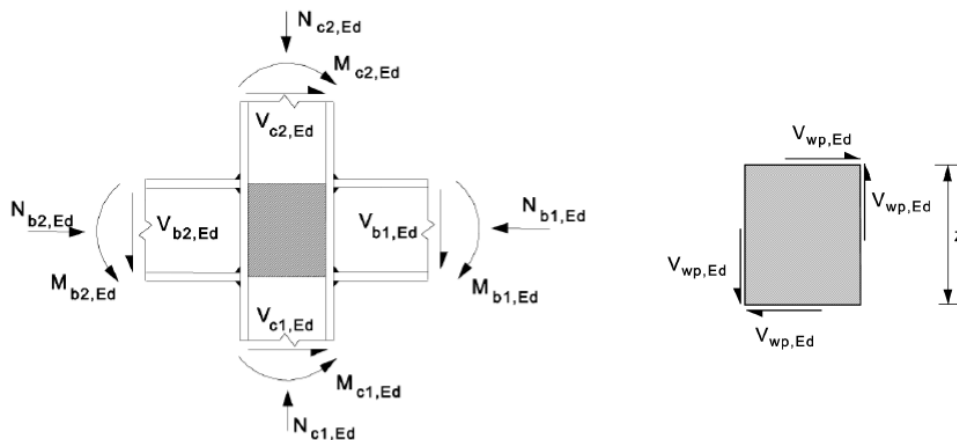
d_s osovinsko rastojanje između ukrućenja;

$M_{pl,st,Rd}$ i $M_{pl,fc,Rd}$ plastični momenti nosivosti ukrućenja i nožice stuba;

Kontrola nosivosti smičućeg polja rebra stuba

Proračunska nosivost polja rebra stuba na smicanje mora da bude veća ili jednaka od proračunske sile smicanja koja se u opštem slučaju određuje na sledeći način:

$$V_{wp,Ed} = \frac{M_{b1,Ed} - M_{b2,Ed}}{z} - \frac{V_{c1,Ed} - V_{c2,Ed}}{2} \leq V_{wp,Rd}$$



48. Nosivost zone pritiska kod momentnih veza greda-stub

Nosivost rebra stuba na poprečni pritisak

$$F_{c,wc,Rd} = \frac{\omega k_{wc} b_{eff,c,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{m0}} \leq \rho \frac{\omega k_{wc} b_{eff,c,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{m1}}$$

ω koeficijent redukcije pomocu koga se uzima u obzir interakcija smicanjem

k_{wc} koeficijent redukcije usled normalnog napona pritiska u stubu

$b_{eff,c,wc}$ efektivna sirina rebra stuba u zoni pritiska

ρ koeficijent redukcije za izbočavanje limova

- za zavarene spojeve: $b_{eff,c,wc} = t_{fb} + 2\sqrt{2}a_b + 5(t_{fc} + s)$
- za spojeve sa ceonom plocom i zavrtnjevima: $b_{eff,c,wc} = t_{fb} + 2\sqrt{2}a_p + 5(t_{fc} + s) + s_p$
- za spojeve sa ugaonicima na nozicama: $b_{eff,c,wc} = 2t_a + 0.6r_a + 5(t_{fc} + s)$

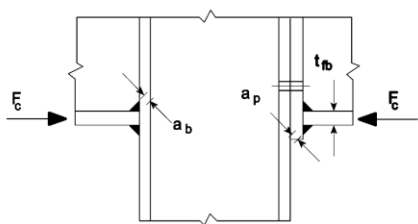
s_p duzina dobijena prostiranjem sile kroz ceonu ploču pod uglom od 45° (minimum t_p , a kad je duzina ceone ploče ispod nozice dovoljna $2t_p$)

$s = r_c$ za valjane I ili H preseke stuba

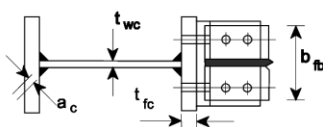
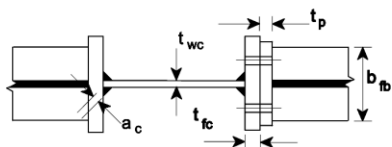
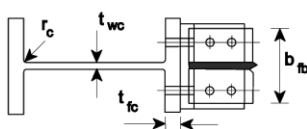
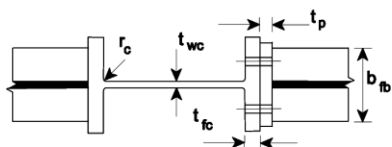
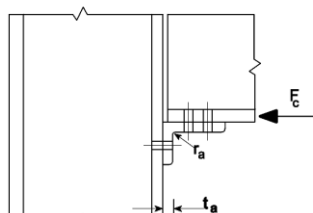
$s = \sqrt{2}a_c$ za zavarene I ili H preseke stuba

Označavanje geometrije veze u zoni pritiska

Zavarena veza Čeona ploča



Ugaonici na nožicama



Koeficijent redukcije usled izbočavanja rebra

$$\rho = 1.0 \quad \text{ako je } \bar{\lambda} \leq 0.72$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0.2}{\bar{\lambda}_p^2} \quad \text{ako je } \bar{\lambda} > 0.72$$

$$\bar{\lambda}_p = 0.932 \sqrt{\frac{b_{eff,c,wc} d_{wc} f_{y,wc}}{E t_{wc}^2}}$$

$\bar{\lambda}_p$ relativna vitkost rebra na izbočavanje

$$d_{wc} = h_c - 2(t_{fc} + r_c) \text{ za valjanje I ili H preseke stuba}$$

$$d_{wc} = h_c - 2(t_{fc} + \sqrt{2}a_c) \text{ za zavarene I ili H preseke stuba}$$

Koeficijent redukcije usled normalnog napona pritiska k_{wc}

$$k_{wc} = 1 \quad \text{kada je } \sigma_{com,Ed} \leq 0.7 f_{y,wc}$$

$$k_{wc} = 1.7 - \frac{\sigma_{com,Ed}}{f_{y,wc}} \quad \text{kada je } \sigma_{com,Ed} > 0.7 f_{y,wc}$$

$\sigma_{com,Ed}$ proračunska vrednost napona pritiska u rebru stuba usled globalnih uticaja;

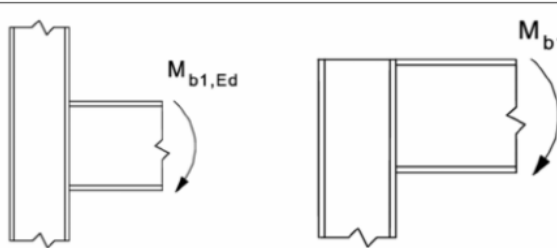
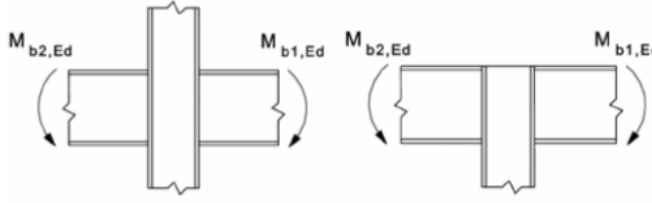
U opštem slučaju koeficijent redukcije k_{wc} je **1,0** i nije neophodna redukcija. Može se izostaviti u početnim proračunima, kada su naponi nepoznati, a proverava se naknadno.

Koeficijent redukcije usled smicanja ω

| Parametar za transformaciju β | Koeficijent redukcije ω |
|---|---|
| $0 \leq \beta \leq 0,5$ | $\omega = 1$ |
| $0,5 < \beta < 1$ | $\omega = \omega_1 + 2(1-\beta)(1-\omega_1)$ |
| $\beta = 1$ | $\omega = \omega_1$ |
| $1 < \beta < 2$ | $\omega = \omega_1 + (\beta-1)(\omega_2-\omega_1)$ |
| $\beta = 2$ | $\omega = \omega_2$ |
| $\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3(b_{eff,c,wc} t_{wc} / A_{vc})^2}}$ | $\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{1 + 5,2(b_{eff,c,wc} t_{wc} / A_{vc})^2}}$ |
| A_{vc} | površina smicanja poprečnog preseka stuba |
| β | parametar za transformaciju |

Parametar za transformaciju β zavisi od konfiguracije veze (jednostrana i dvostrana) i naprezanja veze (kod dvostranih veza);

Približne vrednosti parametra β

| Tip veze | Dejstvo | Vrednost β |
|---|-----------------------------|-------------------|
|  | $M_{b1,Ed}$ | $\beta \approx 1$ |
|  | $M_{b1,Ed} = M_{b2,Ed}$ | $\beta = 0$ *) |
| | $M_{b1,Ed} / M_{b2,Ed} > 0$ | $\beta \approx 1$ |
| | $M_{b1,Ed} / M_{b2,Ed} < 0$ | $\beta \approx 2$ |
| | $M_{b1,Ed} + M_{b2,Ed} = 0$ | $\beta \approx 2$ |
| *) U ovom slučaju je vrednost koeficijenta β tačna, a ne približna. | | |

Nosivost nožice grede na pritisak

$$F_{c,fb,Rd} = \frac{M_{c,Rd}}{h - t_{fb}}$$

h visina grede;

t_{fb} debljina nožice grede;

$M_{c,Rd}$ proračunski moment nosivosti poprečnog preseka grede, redukovano ukoliko je neophodno da bi se uzeo u obzir uticaj smicanja, prema EN 1993-1-1;

Ovaj uslov uglavnom nije kritičan;

Ispunjenje ovog uslova ostvaruje se pri dimenzionisanju grede;

49. Nosivost zone zatezanja kod momentnih veza greda-stub

Nosivost rebra stuba na poprečno zatezanje

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega b_{eff,t,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{m0}}$$

ω koeficijent redukcije za interakciju sa smicanjem panela rebra stuba koji se određuje na isti način kao u slučaju pritisnutog rebra stuba

$b_{eff,t,wc}$ efektivna širina rebra stuba

- Za veze sa čeonom pločom i zavrtnejevima efektivna širina rebra stuba jednaka je efektivnoj dužini ekvivalentnog T-elementa kojim se modelira nosivost nožica stuba na savijanje:

$$b_{eff,t,w} = l_{eff,T}$$

- Za veze u kompletno zavarenoj izradi efektivna širina rebra stuba se određuje na osnovu izraza:

$$b_{eff,c,wc} = t_{fb} + 2\sqrt{2}a_b + 5(t_{fc} + s)$$

$s = r_c$ za valjane I ili H preseke stuba

$s = \sqrt{2}a_c$ za zavarene I ili H preseke stuba

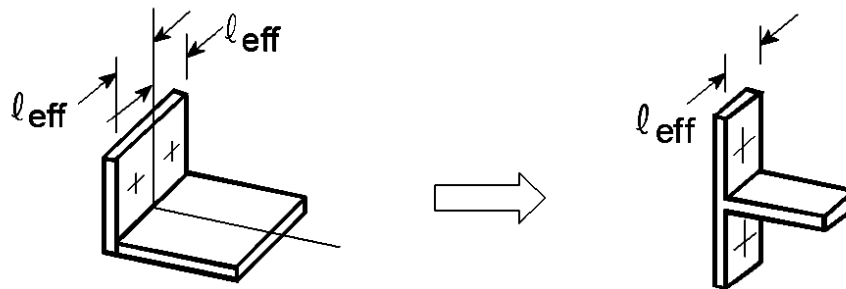
Nosivost rebra grede na zatezanje

$$F_{t,wb,Rd} = \frac{b_{eff,t,wb} t_{wb} f_{y,wb}}{\gamma_{m0}}$$

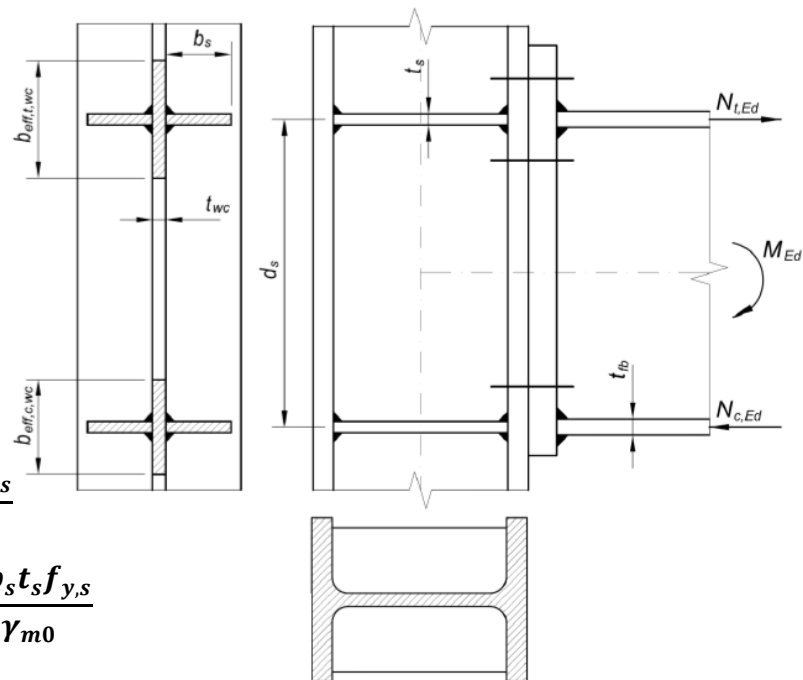
- Efektivna širina zategnutog dela rebra grede $b_{eff,t,wb}$ je jednaka efektivnoj dužini ekvivalentnog T-elementa koji predstavlja čeonu ploču opterećenu na savijanje:

$$b_{eff,t,wb} = l_{eff,T}$$

- Kod čeonih ploča sa prepustom kada se analizira nosivost prepuštenog dela čeonu ploče umesto rebra grede koje ne postoji na tom delu, treba razmatrati nožicu grede.
- U tom slučaju se za efektivnu širinu uzima efektivna dužina ekvivalentnog T-elementa kojim se modelira nosivost prepusta (ali ne više od širine nožice grede b_f), a za debljinu se uzima debljina nožice grede t_{fb} ;



Povećanje nosivosti primenom ukrućenja



$$F_{t,wc,Rd} = \frac{b_{eff,t,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{m0}} + \frac{2b_s t_s f_{y,s}}{\gamma_{m0}}$$

$$F_{c,wc,Rd} = \frac{\omega k_{wc} b_{eff,c,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{m0}} + \frac{2b_s t_s f_{y,s}}{\gamma_{m0}}$$

Primenom ukrućenja na rebru stuba, u produžetku nožica grede povećava se nosivost sledećih komponenta veze: **nosivost rebra stuba na pritisak**, **nosivost rebra stuba na zatezanje**, **nosivost smičućeg polja rebra stuba** i **nosivost ukrućene nožice stuba na savijanje**.

50. Proračun momenta nosivosti veza greda-stub (opšti slučaj, postupak proračuna i ograničenja)

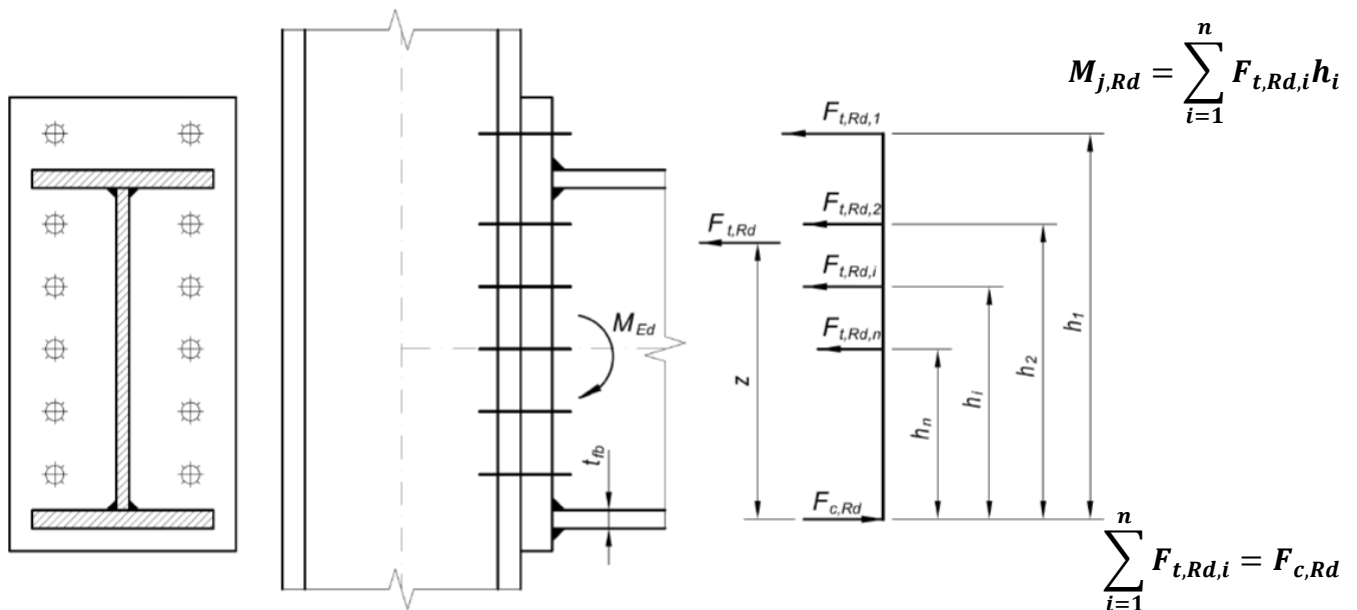
Proračunski moment nosivosti veza sačeonom pločom

- Nosivost određene zone veze (zatezanja, pritiska) se određuje kao minimalna vrednost nosivosti svih komponenta koje učestvuju u prenošenju sile;
- Moment nosivosti veze jednak je proizvodu nosivosti odgovarajuće zone i kraka unutrašnjih sila (između centra pritiska i centra zatezanja);
- Postoje ograničenja u pogledu nosivosti pojedinih zona nosivosti veze:

$$F_{c,Rd} = \min(F_{c,wc,Rd} ; F_{c,fb,Rd}) \quad F_{t,Rd} = \min(F_{t,wc,Rd} ; F_{t,fc,Rd} ; F_{t,ep,Rd} ; F_{t,wb,Rd})$$

$$F_{Rd} = \min\left(F_{c,Rd} ; F_{t,Rd} ; \frac{V_{wp,Rd}}{\beta}\right)$$

Moment nosivosti veza sa više aktivnih redova zavrtnjeva u zoni zatezanja - opšti slučaj



Postupak proračuna i ograničenja

- Prvo se određuje nosivost komponenta u zoni pritiska $F_{c,Rd}$ i smicanja $V_{wp,Rd}$;
- Potom se određuje nosivost na zatezanje za prvi red zavrtnjeva, najudaljniji od centra pritiska $F_{t,Rd,1}$, posmatrajući ga kao pojedinačni red, (ostali redovi zavrtnjeva kao da ne postoje):

$$F_{t,Rd,1} = \min(F_{t,wc,Rd} ; F_{t,fc,Rd} ; F_{t,ep,Rd} ; F_{t,wb,Rd})$$

- Nosivost prvog reda zavrtnjeva treba da ispuni uslove:

$$F_{t,Rd,1} \leq F_{c,Rd} \quad F_{t,Rd,1} \leq V_{wp,Rd}/\beta$$

- Ako su ispunjeni prethodni uslovi prelazi se na proračun sledećeg (drugog) reda zavrtnjeva, na isti način. $F_{t,Rd,2} = \min(F_{t,wc,Rd} ; F_{t,fc,Rd} ; F_{t,ep,Rd} ; F_{t,wb,Rd})$
- Nosivost drugog (i -tog) reda zavrtnjeva na zatezanje po potrebi redukovati da zbir proračunskih nosivosti redova zavrtnjeva iznad posmatranog reda, uključujući i taj red, ne prekoračuje proračunsku nosivost grupe kao celine (za $F_{t,wc,Rd}$, $F_{t,fc,Rd}$, $F_{t,ep,Rd}$ i $F_{t,wb,Rd}$);
- Nosivost drugog (ili i -tog) reda zavrtnjeva treba po potrebi redukovati kako bi bili zadovoljeni uslovi:

$$\sum_i F_{t,Rd,i} \leq F_{c,Rd} \quad \sum_i F_{t,Rd,i} \leq V_{wp,Rd}/\beta$$

51. Proračun momenta nosivosti veza gređa-stub (uprošćen postupak)

Uprošćen postupak proračuna momenta nosivosti $M_{j,Rd}$ veze sa čeonom pločom

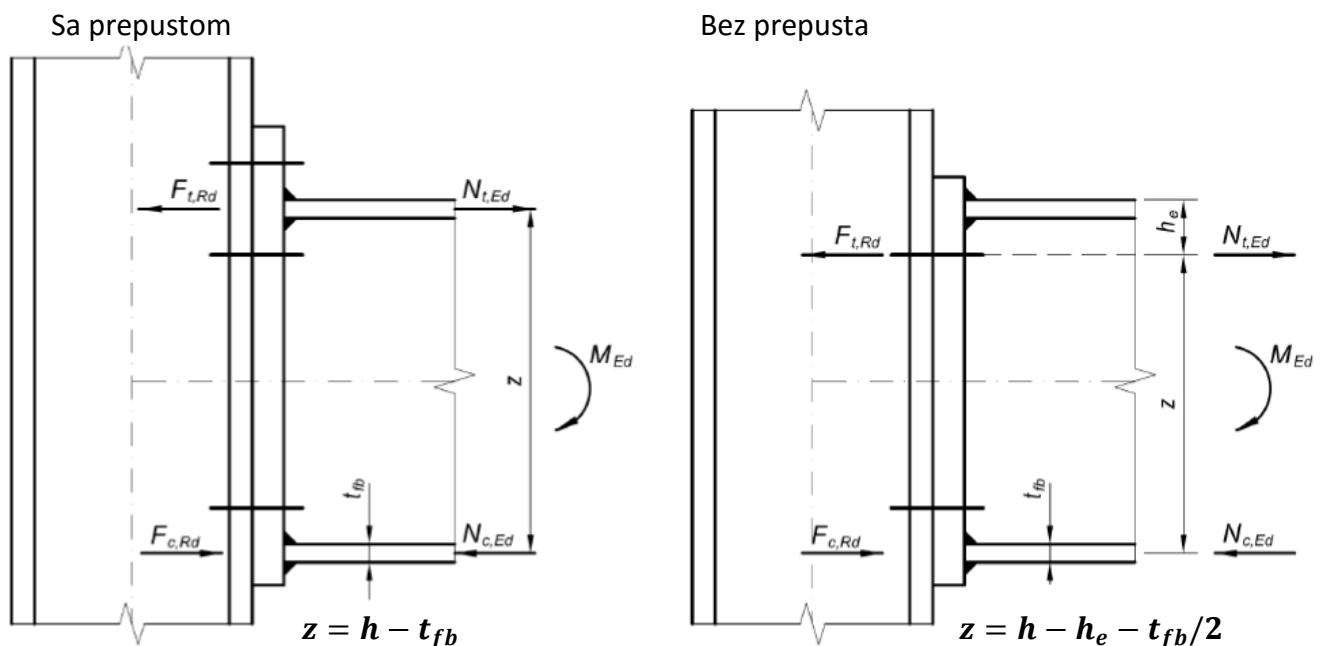
Uprošćen postupak može da se primeni za:

- čeone ploče bez prepusta sa jednim aktivnim redom zavrtnjeva u zoni zatezanja i
- čeone ploče sa prepustom sa dva aktivna reda zavrtnjeva u zoni zatezanja, kod kojih su zavrtnjevi u zoni zatezanja simetrični u odnosu na nožicu gređe, kod kojih je: $F_{Rd} \leq 3.8F_{t,Rd}$

U tom slučaju čitava zategnuta zona čeone ploče se posmatra kao jedna komponenta. Deo čeone ploče može da se posmatra kao T-element za određivanje sile u redu zavrtnjeva $F_{1,Rd}$, a usvaja se da je: $F_{2,Rd} = F_{1,Rd}$, pa je $F_{Rd} = 2F_{1,Rd}$.

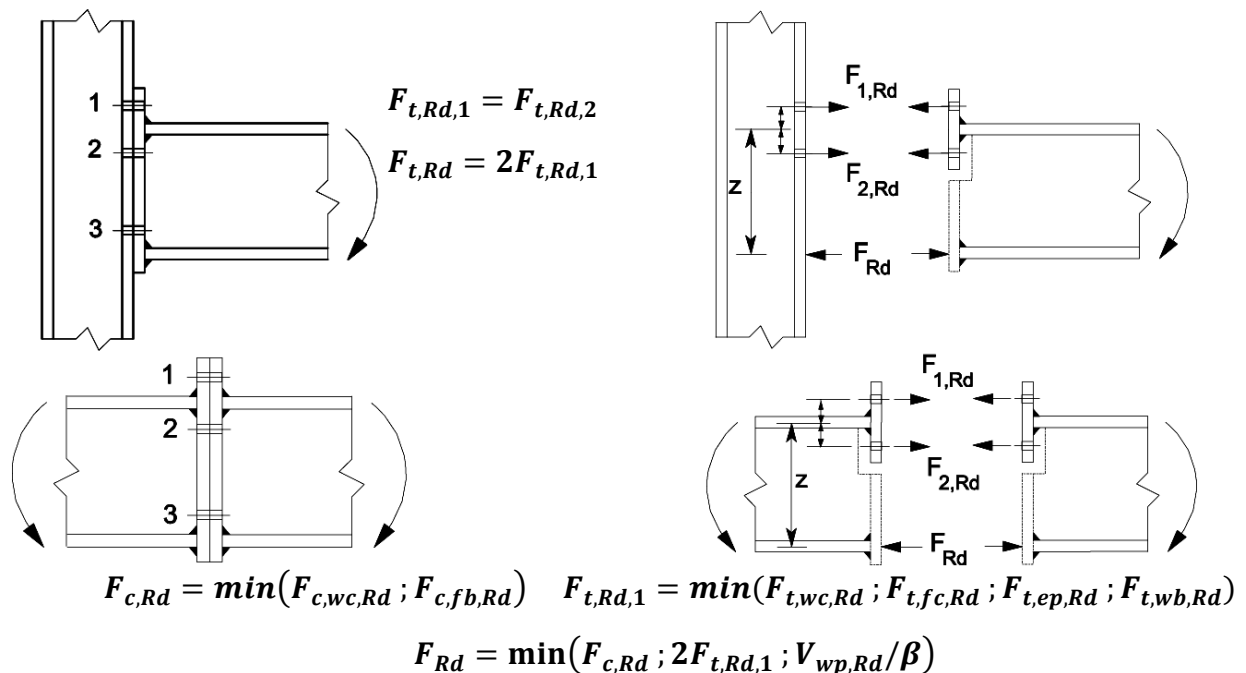
Krak sila i kontrola momenta nosivosti $M_{j,Rd}$ kod veza sa čeonom pločom

$$M_{Ed} \leq M_{j,Rd} = F_{Rd} z$$



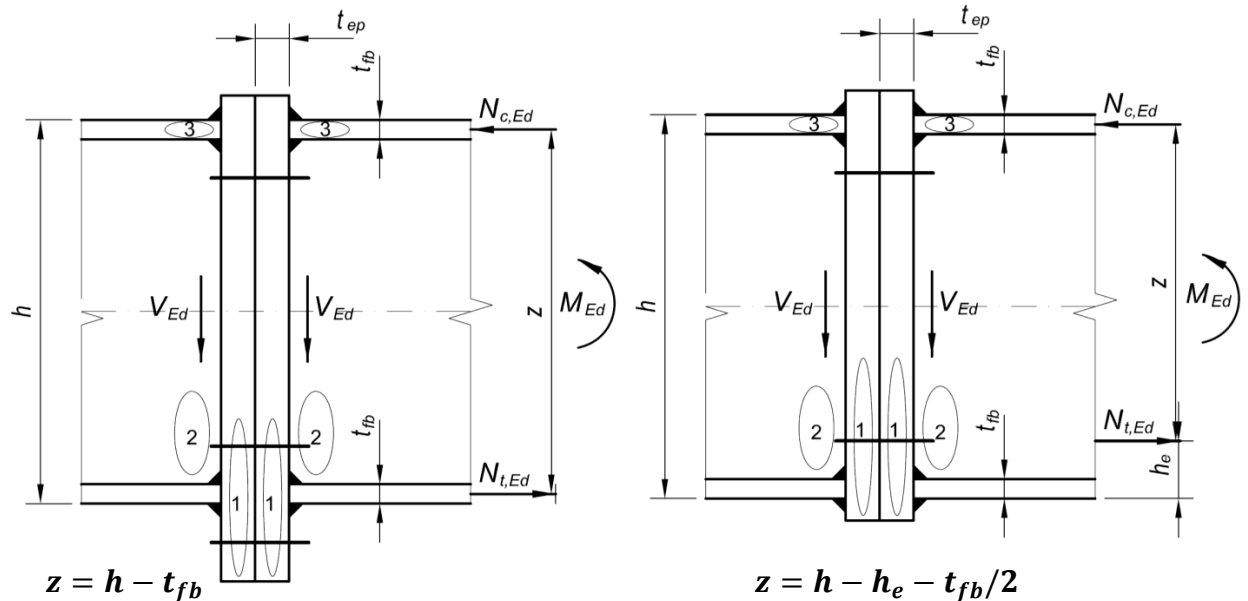
z je krak sila koji predstavlja rastojanje izmedju centra pritiska i centra zatezanja

Uprošćen model nosivosti kod čeonih ploča sa prepustom i dva reda zavrtnjeva



Montažni nastavci nosača sa čeonom pločom

- Principi proračuna mogu da se primene i za montažne nastavke nosača sa čeonom pločom.
- Proračun je jednostavniji jer otpadaju sve komponente nosivosti koje se odnose na stub (smicanje polja suba, nosivost rebra stuba na pritisak i zatezanje i nosivost nožice stuba na savijanje).
- Nosivost zone pritiska jednaka je nosivosti nožice grede na pritisak. $F_{c,Rd} = F_{c,fb,Rd}$
- Nosivost zone zatezanja je jednaka manjoj od nosivosti čeone ploče na savijanje i rebra grede na zatezanje: $F_{t,Rd} = \min(F_{t,ep,Rd} ; F_{t,wb,Rd})$



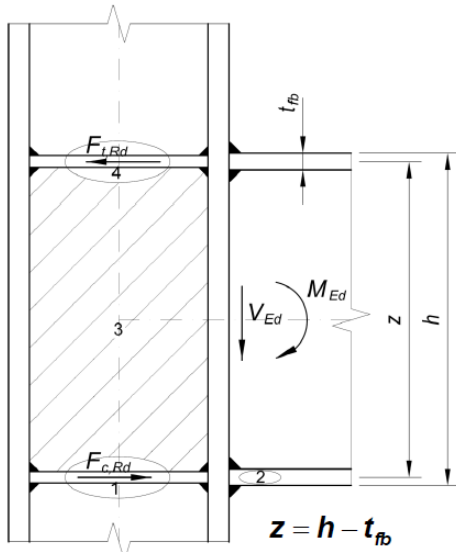
Preporuke za projektovanje veza sa čeonom pločom

- Debljina čeone ploče treba da se usvoji u funkciji prečnika zavrtnja;
- Rastojanja izmedju zavrtnjeva mogu da budu manja od minimalno propisanih za smičuće spojeve; Neophodno je da se obezbedi prostor za nesmetanu ugradnju;
- Preporučuje se primena ukrućenja na rebru stuba, jer značajno povećavaju nosivost i krutost veze (bez ukrućenja su polu-krute veze);
- U slučaju velikih naprezanja mogu se primeniti široke čeone ploče sa po 4 zavrtnja u redu (po širini); Evrokod 3 ne daje eksplicitan postupak proračuna za široke čeone ploče;

Preporučene debljine čeone ploče

| Tip veze | | Debljina čeone ploče t_{ep} |
|----------|-------------|----------------------------------|
| | uska (2M) | $1,0d$ |
| | široka (4M) | $1,25d$ |
| | uska (2M) | $1,5d$ |
| | široka (4M) | $1,7d$ |

Veza greda-stub u zavarenoj izradi



Komponente veze koje treba proveriti su:

1. poprečni pritisak rebra stuba;
2. pritisnuta nožica grede;
3. smičuće polje rebra stuba;
4. poprečno zatezanje rebra stuba;

Po pravilu se postavljaju ukrućenja na rebru stuba, pa je nosivost rebra stuba na poprečni pritisak i zatezanje u tom slučaju znatno povećana (nije merodavna);

Šavovi treba da imaju adekvatnu nosivost!

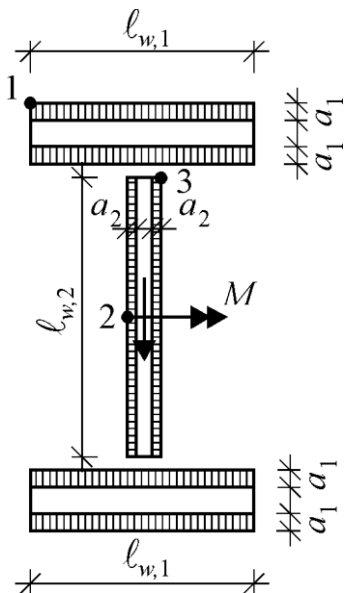
smičuće polje rebra stuba
poprečni pritisak rebra stuba

Proračun šavova

- Šavovi su prisutni kod veza sa čeonom pločom i veza u kompletno zavarenoj izradi;
- Nosivost šavova ne sme da bude manja od nosivosti najslabije komponente u razmatrane zone naprezanja;
- Kada se na mestu veze predviđa **pojava plastičnog zgloba** šavovi treba da se odrede tako da njihov moment nosivosti $M_{w,Rd}$ bude veći ili jednak od manje od sledeće dve vrednosti:
 - plastičnog momenta nosivosti grede $M_{pl,b,Rd}$
 - α puta proračunski moment nosivosti veze $M_{j,Rd}$

$\alpha = 1,4$ za okvirne sisteme sa spregovima (sa zanemarljivim uticajima II reda);
 $\alpha = 1,7$ za sve ostale slučajeve.
- Uglavnom se primenjuju ugaoni šavovi!
- Dimenzije ugaonih šavova mogu da se odrede kao za statički pokriven nastavak prema debljini lima koji se sapaja (nožica ili rebro), ili na osnovu kontrole naprezanja u šavovima;

Proračun šavova za vezu grede I preseka sa čeonom pločom ili nožicom stuba



Tacka 1: $\sigma_w = \frac{M_{y,Ed}}{W_{y,w}}$

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \sigma_w / \sqrt{2}$$

$$\sigma_{\perp} = \frac{M_{y,Ed}}{\sqrt{2}W_{y,w}} \leq \frac{0.9f_u}{\gamma_{m2}}$$

$$\sigma_u = \sqrt{\left(\frac{\sigma_w}{\sqrt{2}}\right)^2 + 3\left(\frac{\sigma_w}{\sqrt{2}}\right)^2} \leq \frac{\beta f_u}{\gamma_{m2}} \rightarrow \frac{M_{y,Ed}}{W_{y,w}} \leq \frac{f_u}{\sqrt{2}\gamma_{m2}\beta_w}$$

Tacka 2:

$$\tau_{\parallel} = \frac{V_{Ed}S_{y,w,2}}{2I_{y,w}a_2} \approx \frac{V_{Ed}}{2a_2l_{w,2}} \leq f_{v,w,d}$$

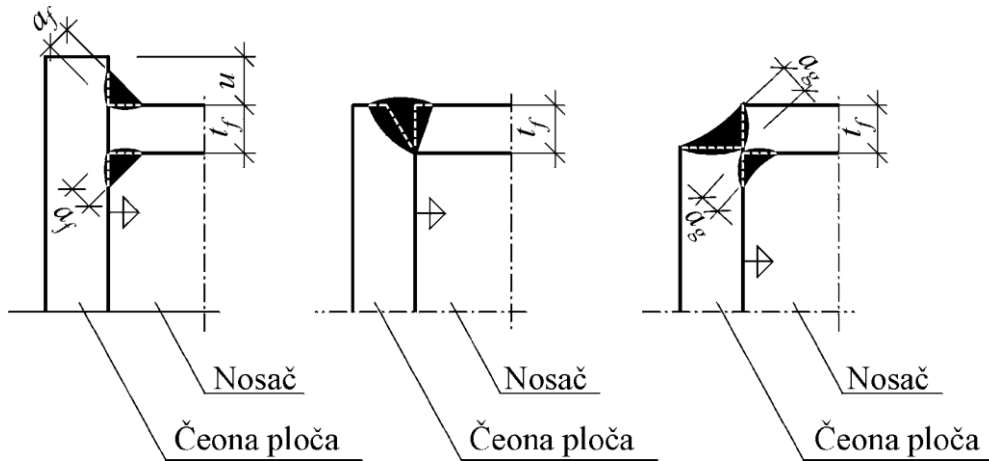
Tacka 3:

$$\sigma_w = \frac{M_{y,Ed}}{I_{y,w}} z_3 \quad \sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma_w}{\sqrt{2}} \quad \tau_{\parallel} = \frac{V_{Ed}S_{y,w,3}}{2I_{y,w}a_2}$$

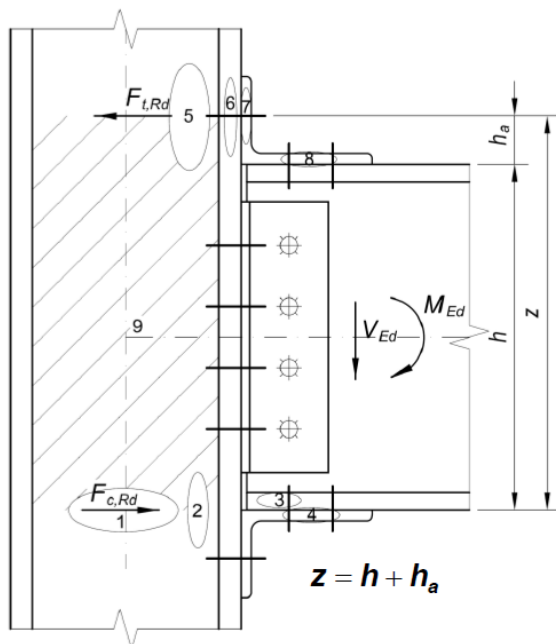
$$\sigma_{\perp} = \frac{M_{y,Ed}}{\sqrt{2}I_{y,w}} z_3 \leq \frac{0.9f_u}{\gamma_{m2}}$$

$$\sigma_u = \sqrt{(\sigma_{\perp})^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w\gamma_{m2}}$$

Veza čeone ploče sa zategnutom nožicom nosača



Veze greda-stub sa ugaonicima na nožicama



Zona pritiska:

1. Nosivost rebra stuba na izbočavanje;
2. Nosivost rebra stuba na gnječenje;
3. Nosivost nožice grede na pritisak;
4. Nosivost kraka ugaonika na pritisak i zavrtnjeva na smicanje

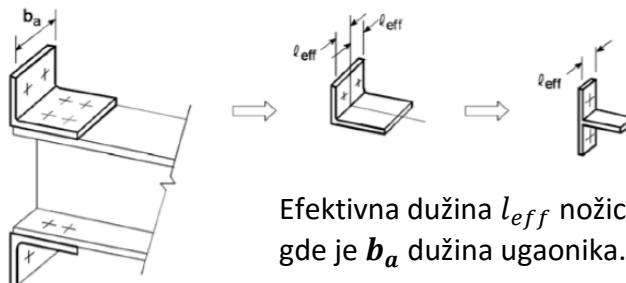
Zona zatezanja:

5. Nosivost rebra stuba na zatezanje;
6. Nosivost nožice stuba na savijanje i zavrtnjeva na zatezanje (T-element);
7. Nosivost ugaonika na savijanje i zavrtnjeva na zatezanje (T-element);
8. Nosivost kraka ugaonika na zatezanje i zavrtnjeva na smicanje

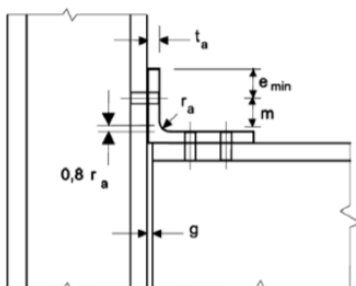
Zona smicanja:

9. Nosivost smičućeg polja rebra stuba;

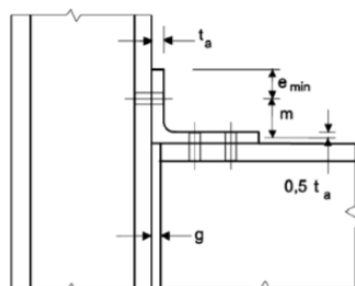
Ekvivalentna dužina i dimenzije ugaonika na nožicama



Efektivna dužina l_{eff} nožice ekvivalentnog T-elementa je $0,5b_a$, gde je b_a dužina ugaonika.



Razmak $g \leq 0,4t_a$



Razmak $g > 0,4t_a$

Dimenzije e_{min} i m za ugaonike na nožicama spojene zavrtnjevima

53. Oblikovanje poprečnih preseka punih limenih nosača

Primena

- U mostogradnji (glavni i kolovozni nosači ...)
- U zgradarstvu (kranski nosači, podni nosači, podvlake...)

Statički sistemi:

- Gredni sistemi (prosta greda i kontinualan nosač);
- Okvirni nosači;
- Sistemi sa kosim zategama;
- Viseći sistemi;

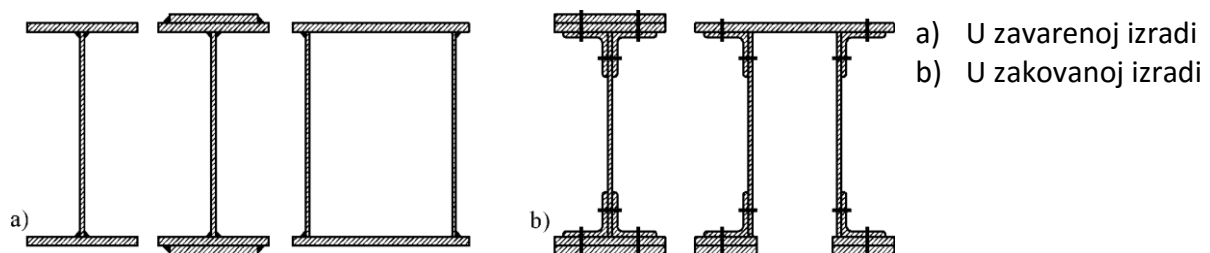
Osnovne prednost punih limenih nosača u odnosu na valjane

- Manja težina konstrukcije,
- Velike mogućnosti oblikovanja poprečog preseka,
- Savlađivanje velikih raspona i prihvatanje velikih opterećenja,
- Variranje dimenzija poprečnog preseka i prilagođavanje dimenzija preseka stvarnim potrebama (pokrivanje dijagrama momenata)
- Mogućnost optimizacije poprečnog preseka.
- **Nedostatak** veća jedinična cena u odnosu na valjane profile!

Oblici poprečnih preseka

Puni limeni nosači mogu da budu:

- **Jednozidni** - otvorenog poprečnog preseka (bisimetrični ili monosimetrični I preseki)
- **Višezidni** – otvorenog ili zatvorenog - sandučastog poprečnog preseka (jednoćelijskog ili višećelijskog)



Primena sandučastih punih limenih nosača

- Kada nije moguće bočno prižavanje (imaju veliku torzionu krutost i krutost na savijanje oko slabije ose inercije);
- Kada je ograničena građevinska visina, odnosno visina konstrukcije;
- U slučaju velikih raspona i opterećenja;
- U slučaju značajnih torzionih uticaja;

Oblikovanje poprečnog preseka jednozidnih punih limenih nosača

Visina nosača (rebra):

Zavisí od raspona nosača, intenziteta opterećenja i deformacijskih kriterijuma!

- U visokogradnji $h = L/20 - L/35$
- Kod drumskih mostova $h = L/15 - L/25$
- Kod železničkih mostova $h = L/10 - L/15$

Debljina rebra:

U funkciji visine rebra (h_w) i intenziteta napreznja:

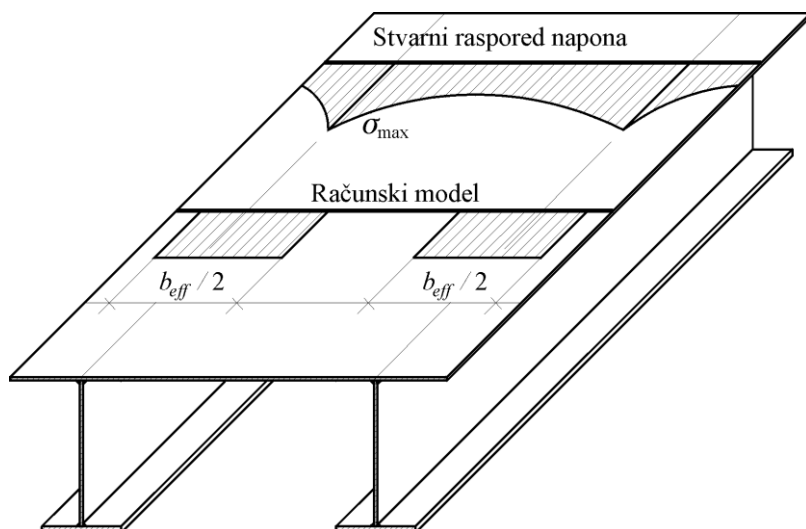
$$t_w[mm] = \begin{cases} 8 + 2h_w[m] & \text{za manja opterećenja} \\ 9 + 2.5h_w[m] & \text{za veća opterećenja} \end{cases}$$

U funkciji kvaliteta celika

$$t_w[mm] = \begin{cases} h_w/120 & S235 \\ h_w/100 & S355 \end{cases}$$

Pri proračunu sanducastih nosaca sa širokim pojasevima obavezno treba odrediti efektivnu sirinu pojasa s obzirom na neravnomernu raspodelu normalnih napona usled uticaja smicanja poznatog kao shear lag efekat. Ovo je posebno izrazeno kod širokopojasnih nosaca manjih raspona. Kod pritisnutih pojasnih lamela treba proveriti i lokalnu stabilnost lima na izbocavanje, pa se efektivna sirina odredjuje na osnovu interakcije izbocavanja i shear lag efekta. Problem izbocavanja uglavnom se resava postavljanjem poduznih i poprecnih ukrucenja, cime se obezbedjuje da, sa stanovista izbocavanja, citava lamela bude aktivna.

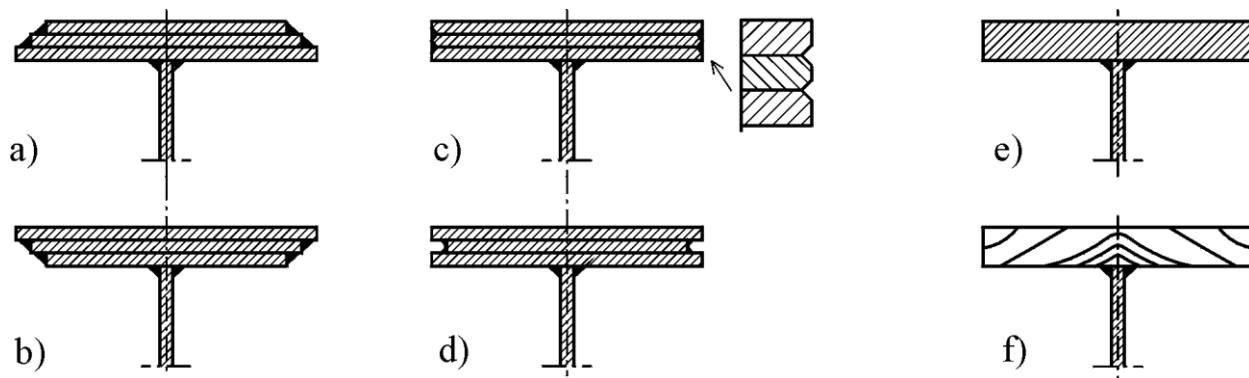
Efektivna širina pojasa – shear lag efekat



Dimenzije pojasnih lamela kod jednozidnih nosača

- Maksimalna širina pojasne lamele uslovljena je vitkošću konzolnog prepusta ($\lambda_k = c/t_f$);
- Da bi kompletna pojasna lamela bila efektivna (klase 3), neophodno je da bude ispunjen uslov: $c/t_f < 14\varepsilon$, odnosno $t_f > c/14\varepsilon$, gde je c referentna dužina konzolnog prepusta pojasne lamele (nožice);
- Preporučena maksimalna debljina pojasne lamele (t_f) je:
 - 50 mm za S235
 - 30 mm za S355
- Primena kvalitetnih čelika (normalizovanih - N, termomehanički valjanih M ili HISTAR) omogućava korišćenje limova veće debljine bez redukcije mehaničkih svojstava (f_y i f_u) i problema sa zavarivanjem!

Uobičajeni oblici poprečnog preseka pojasnih lamela



Resenje sa **slike a** je povoljno sto se tice same tehnike zavarivanja. Poduzni i ceoni ugaoni savovi mogu da se izvedu u jednom potezu oko citave pojasne lamele. Resenje sa **slike b** je staticki povoljno, medjutim poduzni i ceoni savovi ne lezu u istoj ravni, pa je prelaz sa jednog na drugi komplikovan. Resenje pod **c** je estetski najprihvatljivije ali zahteva dodatnu obradu ivica. Resenje pod **d** je najnepovoljnije zbog stvaranja zljeba u koji ce da upada prasina i prljavstina samim tim smanjuje se korozivna otpornost.

Potrebna površina pojasne lamele A_f

Uslov (za preseke klase 3):

$$W_{y,el} \geq \frac{M_{y,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \text{ - potreban otporni moment}$$

$$I_y = \frac{1}{12} h_w^3 t_w + 2A_f \left(\frac{h_w}{2} \right)^2$$

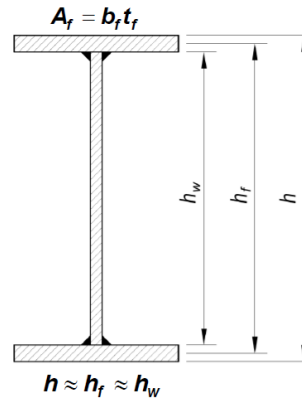
$$W_{y,el} = \frac{I_y}{h_w / 2} = \frac{1}{6} h_w^2 t_w + A_f h_w$$

$$A_f \geq \frac{M_{y,Ed} / h_w}{f_y / \gamma_{M0}} - \frac{1}{6} h_w t_w$$

Alternativno

$$A_f \approx \frac{M_{y,Ed} / h_w}{f_y / \gamma_{M0}} - 0,15 h_w t_w$$

$$A_f \approx 0,9 \frac{M_{y,Ed} / h_w}{f_y / \gamma_{M0}}$$



54. Kontrole graničnih stanja kod punih limenih nosača

Granična stanja nosivosti - ULS:

- Kontrola nosivosti poprečnih preseka (V_{Rd} , M_{Rd});
- Kontrola nosivosti nosača na bočno-torziono izvijanje ($M_{b,Rd}$);
- Kontrola lokalnog naprezanja (npr. od pritiska točka kod kranških nosača i mostova) i interakcija sa globalnim naponima;
- Kontrola nosivosti na izbočavanje (usled normalnih napona pritiska i smicanja, ili lokalnih poprečnih koncentrisanih sila);
- Kontrola nosivosti na zamor (dinamički opterećene konstrukcije);

Granična stanja upotrebljivosti - SLS:

- Kontrola deformacija (ugiba i obrtanja);
- Kontrola vibracija (ako je potrebno);
- Kontrola napona (ako je potrebno);

Kontrole nosivosti poprečnih preseka treba sprovesti u svim merodavnim presecima, za sve potencijalno kritične kombinacije uticaja!

55. Oblici punih limenih nosača i pokrivanje dijagrama momenata (stvarni i teorijski početak ojačanja)

- Prilagođavanjem nosivosti poprečnih preseka nosača stvarnim uticajima može se smanjiti količina čelika;
- Ovo nije racionalno kod nosača malih raspona;
- Kontrola SLS (ugiba,...) treba da se sprovede sa stvarnom geometrijom nosača!

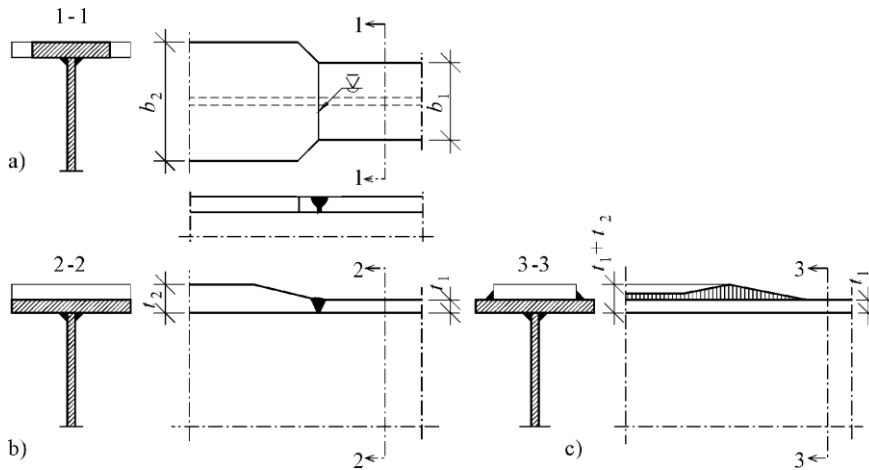
Promena geometrijskih karakteristika preseka može se ostvariti:

- promenom visine rebra nosača;
- promenom površine pojasnih lamela (nožica).

Promena površine pojasne lamele – ojačanje se može isvesti:

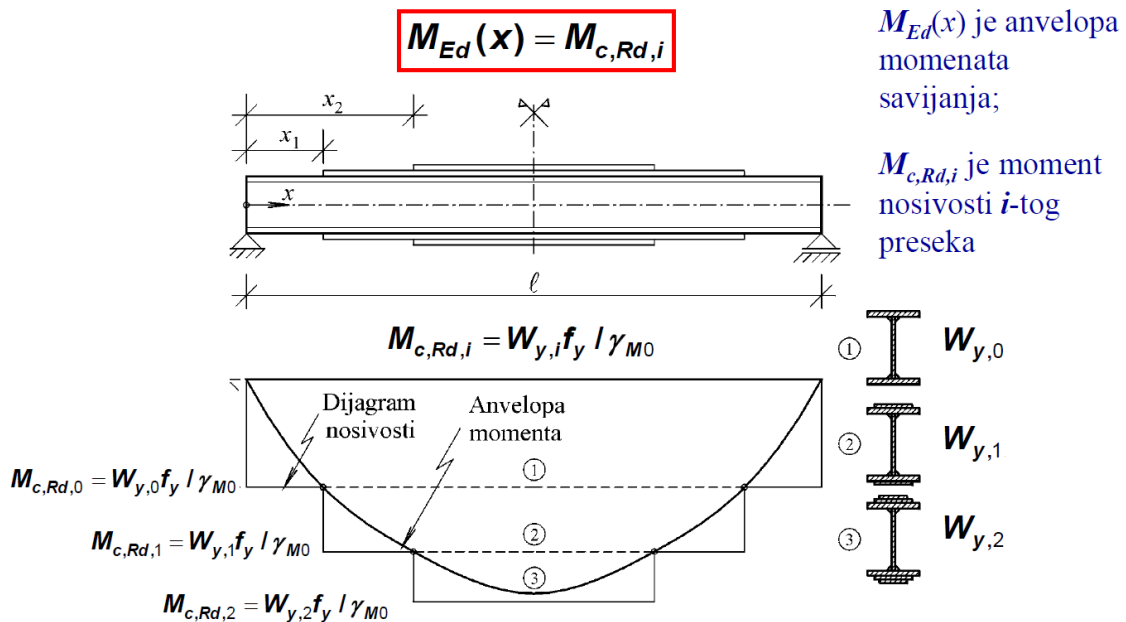
- a) promenom širine pojasnih lamela;
- b) promenom debljine pojasnih lamela;
- c) primenom dodatnih pojasnih lamela.

Ojačanja pojasne lamele



Dakle, bez obzira na koji način se ostvaruje promena površine pojasa, razlikuju se presek koji ima minimalnu nosivost i jedan ili više preseka ojačanih preseka u zavisnosti od stepena iskoriscenja nosaca. Položaj pocetka i zavrsetka ojačanja zavisi od anvelope momenata savijanja i nosivosti osnovnog i ojačanog preseka. Odredjivanje teorijskog pocetka ojačanja se naziva pokrivanje dijagrama momenata savijanja i može da se izvrši grafickim ili numerickim putem.

Graficko odredjivanje teorijskog pocetka ojačanja vrši se tako što se na jednom crtežu u istoj razmeri nanese anvelopa momenata savijanja i horizontalne linije koje predstavljaju nosivost osnovnog i ojačanih preseka. Preseci ovih linija sa anvelopom momenata predstavljaju teorijske pocetke i zavrsetke ojačanja pojasnih lamela.



Numericko odredjivanje teorijskog pocetka ojačanja zasniva se na poznavanju analitickog izraza za anvelopu momenata. Anvelopa momenata je funkcija koja zavisi od jedne promenljive, to jest od poduzne koordinate x . Iz uslova

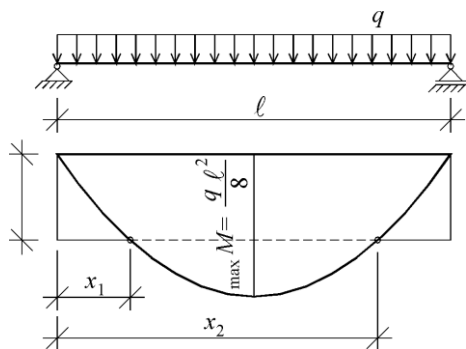
$$M(x) = M_{c,Rd,i}$$

Gde je $M_{c,Rd,i}$ nosivost i -tog preseka, a $M(x)$ funkcija anvelope momenata, može da se odredi teorijski pocetak ojačanja, odnosno pocetak naredne lamele($i+1$).

Za prostu gredu opterećenu jednako podeljenim opterećenjem, može se relativno jednostavno odrediti teorijski pocetak ojačanja. U ovom slučaju anvelopa momenata je poznata kvadratna funkcija, pa se uslov transformise na sledeći način:

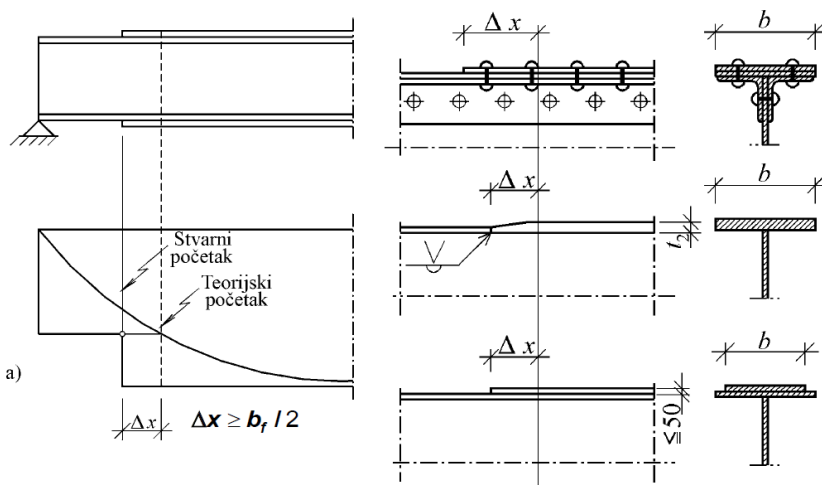
$$M(x) = \frac{qL}{2}x - \frac{q}{2}x^2 = M_{nos,i}$$

Resenje kvadratne jednacine u opstem slucaju ima dva realna resenja, koja predstavljaju teorijski pocetak i zavrsetak ojacanja, a dobijaju se u sledecem obliku:



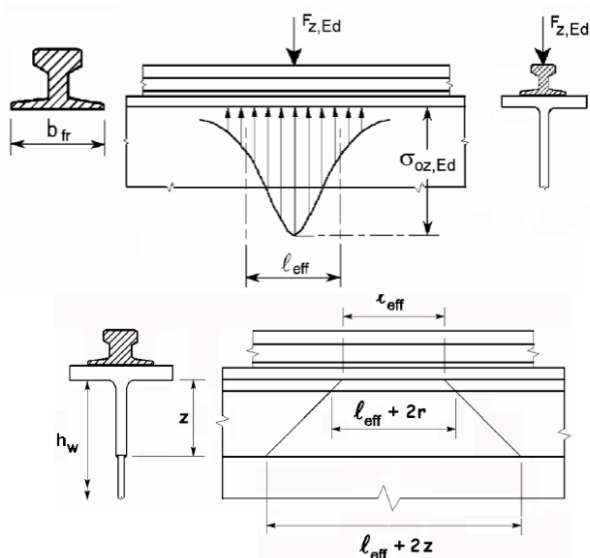
$$x_{1,2} = \frac{l}{2} \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{M_{c,Rd,0}}{M_{max,Ed}}} \right)$$

Stvarni pocetak ojacanja



56. Lokalna naprezanja rebra punog nosaca usled lokalnih koncentrisanih sila. Interakcija naprezanja

Lokalna naprezanja rebra kranskog nosaca usled pritiska točka



Naponi u rebru, neposredno ispod gornje nožice:

$$\sigma_{oz,Ed} = \frac{F_{z,Ed}}{l_{eff} t_w}$$

$$\tau_{oxz,Ed} = 0.2 \sigma_{oz,Ed}$$

Normalni napon po visini rebra:

$$\sigma_{oz,Ed}(z) = \frac{F_{z,Ed}}{(l_{eff} + 2z) t_w}$$

Propagacija normalnog napona pod uglom od 45°

Efektivna dužina

Kada je sina kruto vezana sa nozicom (zavarena)

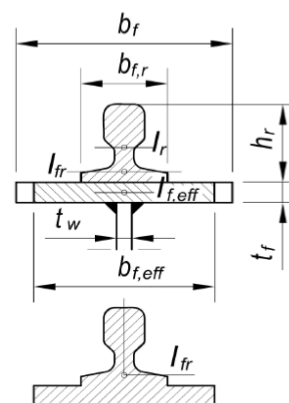
$$l_{eff} = 3.25^3 \sqrt{I_{rf}/t_w}$$

Kada sine nije kruto vezana sa nozicom

$$l_{eff} = 3.25^3 \sqrt{(I_r + I_{f,eff})/t_w}$$

Kada je sina oslonjena preko podmetaca od elastomera

$$l_{eff} = 4.25^3 \sqrt{(I_r + I_{f,eff})/t_w}$$



I_r moment inercije sine oko horizontalne tezisne ose

$I_{f,eff}$ moment inercije efektivnog dela nozice ($b_{f,eff}$) oko horizontalne tezisne ose

I_{rf} moment inercije zajednickog preseka sine i efektivnog dela nozice ($b_{f,eff}$), oko horizontalne tezisne ose

$$b_{f,eff} = b_{fr} + h_r + t_f$$

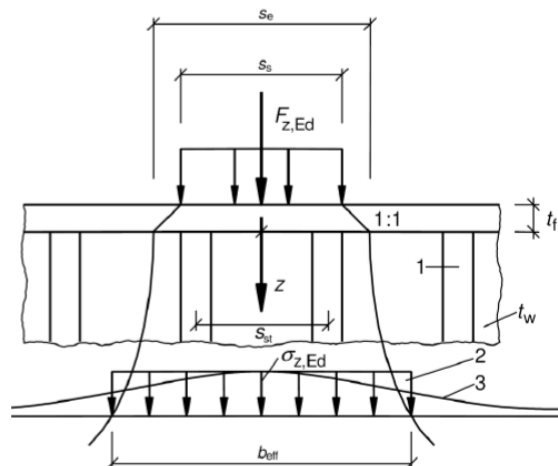
Lokalna naprezanja rebra usled poprečnog pritiska (*patch load*)

$$\sigma_{z,Ed} = \frac{F_{z,Ed}}{b_{eff}(t_w + a_{st,1})}$$

$$b_{eff} = s_e \sqrt{1 + \left(\frac{z}{s_e n}\right)^2}$$

$$n = 0.636 \sqrt{1 + \frac{0.878 a_{st,1}}{t_w}}$$

$$s_e = s_s + 2t_f$$



$a_{st,1}$ bruto površina poprečnog preseka ukrucenja "razmazana" na dužini s_e . Konzervativno može da se usvoji kao površina ukrucenja podeljena sa s_{st} .

t_w debljina rebra

z rastojanje do nozice

Kontrola interakcije naprezanja u rebro nosača

$$\sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + \sigma_{oz,Ed}^2 + \sigma_{x,Ed}\sigma_{oz,Ed} + 3(\tau_{xz,Ed} + \tau_{oxz,Ed})^2} \leq f_y/\gamma_{m0}$$

$\sigma_{x,Ed}$ proračunska vrednost normalnog napona usled globalnih uticaja u nosaču ($M_{y,Ed}$ i eventualno N_{Ed});

$\tau_{xz,Ed}$ proračunska vrednost smičućeg napona usled globalnih uticaja u nosaču (V_{Ed});

$\sigma_{oz,Ed}$ proračunska vrednost normalnog napona usled lokalnog pritiska (točak kрана ili drugo poprečno opterećenje - *patch load*);

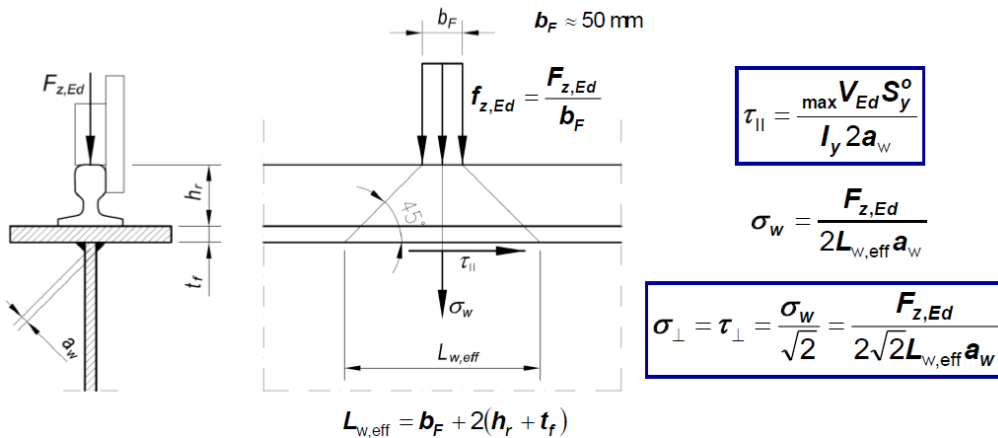
$\tau_{oxz,Ed}$ proračunska vrednost smičućeg napona usled lokalnog pritiska;

$$\sigma_{x,Ed} = \frac{N_{Ed}}{A} + \frac{M_{y,Ed}}{I_y} z$$

$$\tau_{xz,Ed} = \frac{V_{Ed} S_y}{I_y t_w}$$

57. Proračun šavova za vezu rebra sa nožicom kod kranskih nosača

Veza pojasne lamele sa rebrom nosača
Opšti slučaj - kranski nosači

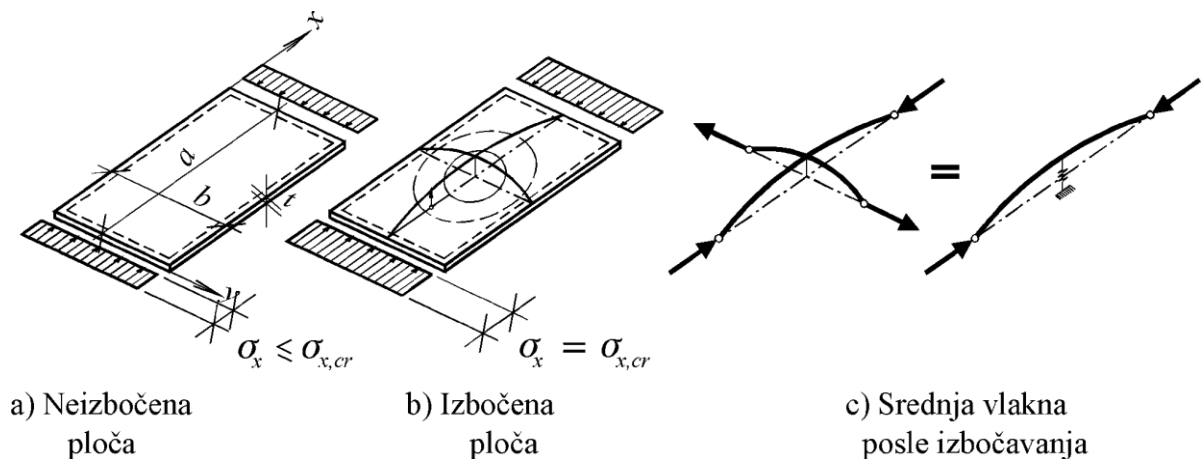


Kontrola napona u ugaonim šavovima

$$\sigma_u = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{||}^2 + \tau_{\perp}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}}$$

58. Izbočavanje pravougaone ploče (teorijske osnove)

Pravougaona ploča opterećena normalnim naponom pritiska σ_x duž sve paralelne ivice i zglobno oslonjena duž sve četiri ivice, pri malim naprezanjima nema deformacije upravne na svoju srednju ravan. Povećanjem napona ploča se postepeno deformise upravno na svoju srednju ravan, a nastale deformacije su elasticne jer se nakon uklanjanja opterećenja ploča vraća se u prvobitan položaj. Međutim, ako se opterećenje i dalje povećava, u jednom trenutku dolazi do trajne deformacije -izbočine, koja ostaje i nakon uklanjanja opterećenja. Ploča prelazi u drugo, indiferentno ravnotežno stanje, a napon pri kojem dolazi do pojave izbočavanja naziva se kritičan napon elasticnog izbočavanja – $\sigma_{x,cr}$.

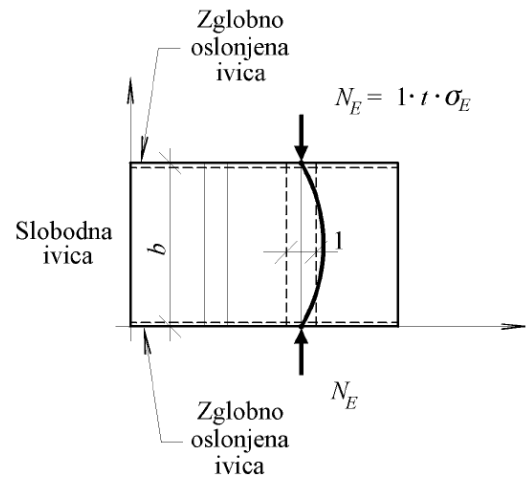


Problem izbočavanja može da se objasni na uprosćenom linijskom modelu u vidu rostilja obrazovanog od poduznih i poprecnih srednjih vlakana (slika c). Poduzna vlakna su pritisnuta, ali ne mogu slobodno da se izviju, jer ih sprečavaju poprečna zategnuta vlakna, koja na neki način predstavljaju elastičan oslonac. Ukoliko nije obezbeđeno oslanjanje poduznih ivica ploče, koje su paralelne sa pravcem delovanja sile, poprečna vlakna gube stabilizujuću ulogu, pa se problem izbočavanja ploče svodi na izvijanje površinskog elementa upravno na svoju ravninu. Tada za traku jedinice širine Ojlerov napon izvijanja glasi :

$$\sigma_E = \pi^2 \frac{E}{\lambda^2} = \pi^2 \frac{E}{b/(\sqrt{12} t)^2} = \frac{\pi^2 E}{12} \left(\frac{t}{b}\right)^2$$

Ojlerov napon izbočavanja:

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2$$



59. Kritičan napon elastičnog izbočavanja – parametri od uticaja

Naponska stanja koja izazivaju izbočavanje

Do izbočavanja može da dođe usled dejstva:

- Normalnog napona pritiska σ_x i/ili σ_y
- Smičućeg napona τ_{xy}
- Kombinacije normalnog napona pritiska i smičućeg napona
- Lokalne poprečne sile pritiska;

Za razliku od izvijanja, izbočavanje ne mora obavezno da predstavlja i gubitak globalne stabilnosti konstrukcije, ili njenog dela. Postoji **postkritična** rezerva nosivosti.

Osnove linearno-elastične teorije izbočavanja

- Materijal je idealno elastičan;
- Nema početnih geometrijskih imperfekcija;
- Opterećenje deluje u srednjoj ravni ploče;
- Deformacije upravno na ravan ploče (w) su male.

Diferencijalna jednačina izbočavanja

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + \sigma_x \frac{t}{D} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0$$

$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$ krutost ploče na savijanje

σ_x normalni napon pritiska u srednjoj ravni ploče;

t debljina ploče;

w nepoznata pomeranja, upravna na ravan ploče;

Rešenje diferencijalne jednačine

Pretpostavlja se rešenje u obliku dvostrukog Furijeovog reda:

$$w(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \sin \frac{m\pi}{a} x \sin \frac{n\pi}{b} y$$

$$A_{mn} \left\{ \pi^4 \left[\left(\frac{m}{a} \right)^2 + \left(\frac{n}{a} \right)^2 \right]^2 - \pi^2 \left(\frac{m}{a} \right)^2 \sigma_x \frac{t}{D} = 0 \right\}$$

Iz uslova o egzistenciji netrivialnog resenja $A_{mn} \neq 0$, moze da se odredi izraz za normalni napon:

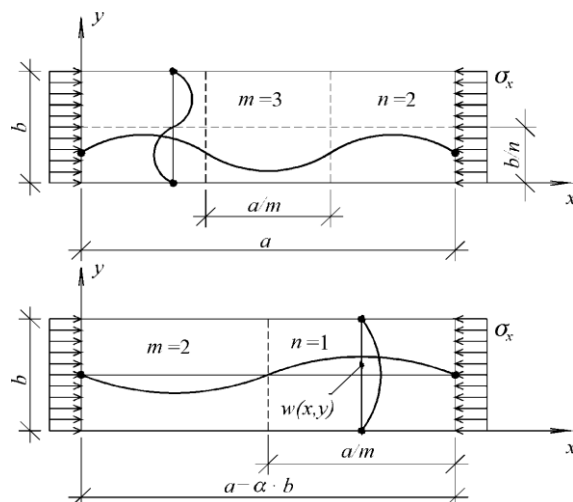
$$\sigma_x = \left[\left(\frac{m}{a} \right)^2 + \left(\frac{n}{a} \right)^2 \right]^2 \pi^2 \left(\frac{a}{m} \right)^2 \frac{D}{t}$$

Prethodnim izrazom odredjen je napon σ_x , pri kojem dolazi do izbočavanja, u funkciji parametara m i n , koji imaju jasno fizicko znacenje i predstavljaju broj polutalasa izbočavanja u pravcu x , odnosno y ose, respektivno. Ako se sa α oznaci odnos duzine i sirine ploce i krutost ploce na savijanje D zameni svojim izrazom, dobija se :

$$\sigma_x = \left[\frac{m}{\alpha} + n^2 \frac{\alpha}{m} \right]^2 \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2$$

$$\sigma_x = \left[\frac{m}{\alpha} + n^2 \frac{\alpha}{m} \right]^2 \sigma_E = k \sigma_E$$

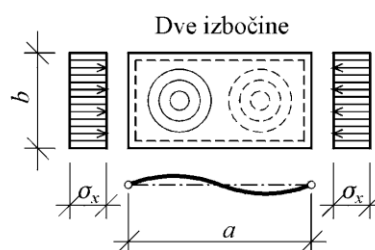
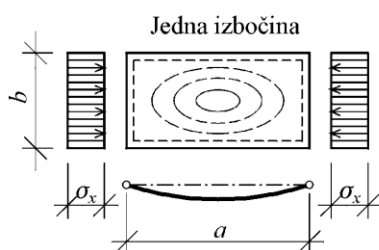
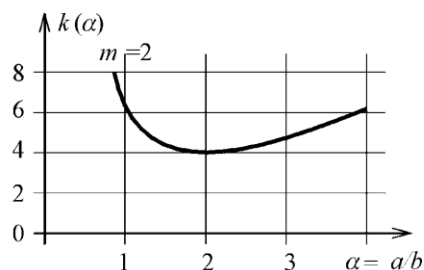
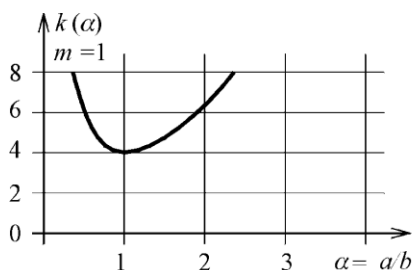
$$k = \left[\frac{m}{\alpha} + n^2 \frac{\alpha}{m} \right]^2$$



Kako je Ojlerov napon, za zadatu geometriju ploce, konstantan, vrednost kritičnog napona elasticnog izbočavanja dobija se kada koeficijent k ima minimalnu vrednost. Lako se uocava da koeficijent k ima minimalne vrednosti za $n = 1$, to jest kada se po sirini ploce javlja samo jedan polutalas, odnosno izbočina. U tom slucaju izraz za koeficijent k ima sledeci oblik:

$$k = \left[\frac{m}{\alpha} + \frac{\alpha}{m} \right]^2$$

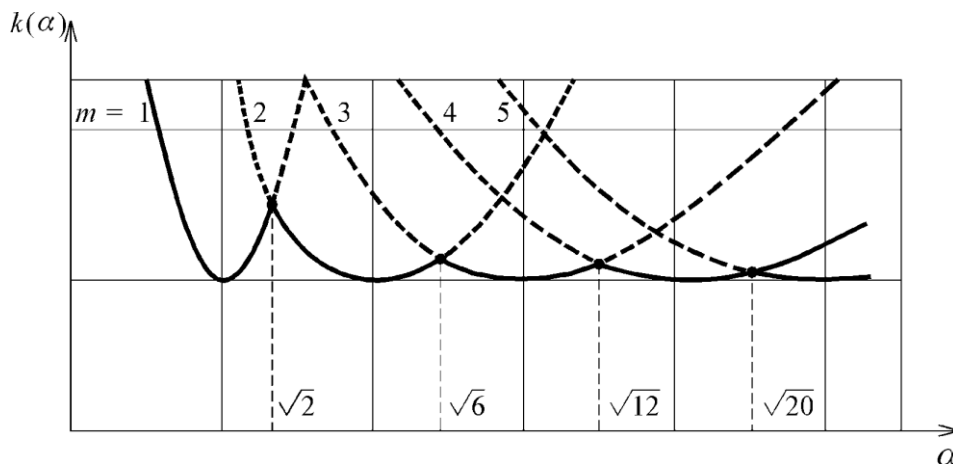
Imajuci u vidu fizicko znacenje parametra m , on moze da ima samo celobrojne vrednosti od 1 do j gde je j broj polutalasa po duzini ploce. Na taj nacun dobija se familija krivih za $m = 1, 2, 3, \dots, j$.



Za $m = 1$ funkcija ima sledeci oblik :

$$k = \left(\frac{1}{\alpha} + \alpha\right)^2$$

a koeficijent k ima minimalnu vrednost $k_{min} = 4.0$ za $\alpha = 1$. Na slican nacin moze da se pokaze da, kada je $m=2$, koeficijent k ima istu minimalnu vrednost $k_{min} = 4.0$ za $\alpha = 2$. Daljom analizom moze da se utvrdi da sve krive imaju iste minimalne vrednosti $k_{min} = 4.0$ i da je polozej minimuma odredjen brojem polutalasa izbocavanja $\alpha(m) = m$. Obvojnica minimalnih vrednosti familije krivih prikazana je na sledecoj slici .



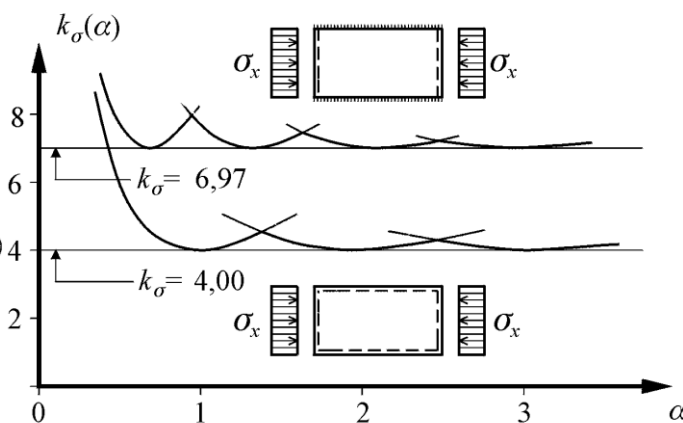
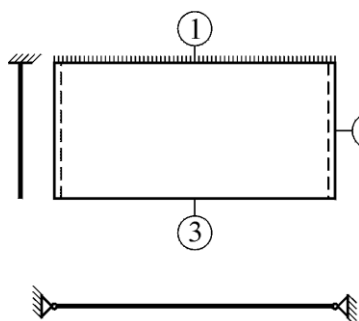
Parametri koji utiču na vrednost kritičnog napona

- **Dimenzije ploče** (debljina t , dužina a i širina b) - uvode se u proračun preko Ojlerovog napona;
- **Uslovi oslanjanja ploče** - uvode se u proračun preko koeficijenta k (k_σ ili k_τ);
- **Način naprezanja ploče** - uvodi se u proračun preko koeficijenta k (k_σ ili k_τ);

Uticao uslova oslanjanja

U klasicnoj teoriji savijanja ploca razlikuju se tri vida oslanjanja. Ivica ploce moze da bude ukljestena, zgloбно oslonjena ili slobodna. Kod ploca cije su ivice ukljestene vrednost kritičnog napona veća je nego kod zgloбно oslonjenjih.

- ① Uklještena ivica
- ② Zgloбно oslonjena ivica
- ③ Slobodna ivica

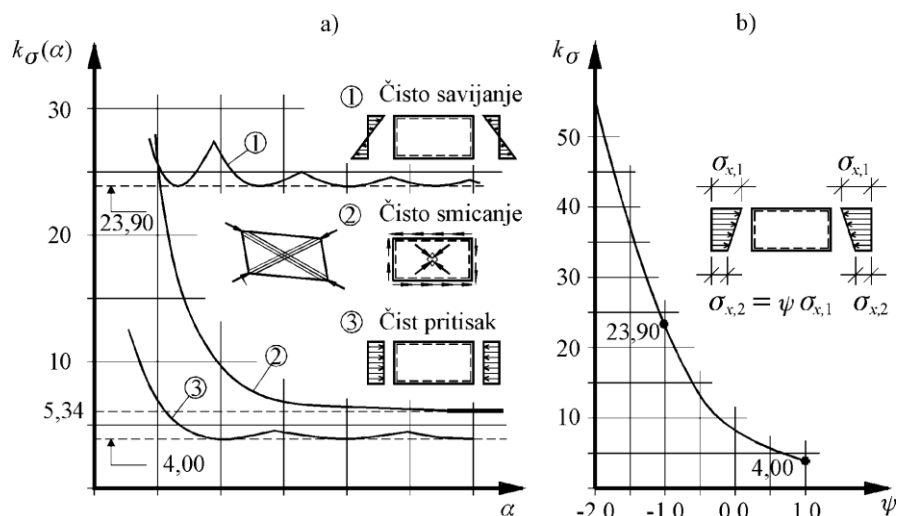


Uticao načina naprezanja

Nacin naprezanja znatno utice na vrednost kritičnog napona elasticnog izbocavanja. Sto se tice normalnih napona, vec je receno da kod ploca opterećenih normalnim naponom zatezanja, nema opasnosti od pojave lokalne nestabilnosti. Medjutim, ako je bar deo ploce opterećen normalnim naponom pritiska, postoji realna opasnost od pojave izbocavanja. Kako zona pritiska raste, opada vrednost kritičnog napona, a raste opasnost od pojave izbocavanja. Prema tome, ploca koja je po citavoj visini opterećena konstantnim naponom pritiska predstavlja najnepovoljniji slucaj sa stanovista izbocavanja.

Problem izbacivanja javlja se i kod ploca opterecenim čistim smicanjem. Do izbacivanja ploca smicanjem dolazi usled dejstva glavnog napona pritiska, koji deluje u dijagonalnom pravcu. Kritican napon, slicno kao kod ploce opterecene normalnim naponom pritiska, moze da se odredi na sledeci nacin:

$$\tau_{xy,cr} = k_{\tau} \sigma_E$$



U tabeli su date vrednosti koeficijenata k_{σ} i k_{τ} za nekoliko karakteristicnih slucajeva naprezanja i oslanjanja.

| Uslovi oslanjanja | Normalni naponi (k_{σ}) | | | | | Smičuci naponi (k_{τ}) |
|-------------------|----------------------------------|--------------|------------|---------------|-------------|---|
| | $\psi = 1$ | $\psi = 0.5$ | $\psi = 0$ | $\psi = -0.5$ | $\psi = -1$ | |
| | 4,00 | 5,32 | 7,81 | 13,40 | 23,90 | $\alpha \geq 1: k_{\tau} = 5,34 + \frac{4}{\alpha^2}$ $\alpha < 1: k_{\tau} = 4 + \frac{5,34}{\alpha^2}$ |
| | 6,97 | 9,27 | 13,54 | 24,50 | 39,52 | $\alpha \geq 1: k_{\tau} = 9 + \frac{3,3}{\alpha^2}$ $\alpha < 1: k_{\tau} = 7 + \frac{5,3}{\alpha^2}$ |
| | 5,41 | - | 11,73 | - | 23,94 | $\alpha \geq 1: k_{\tau} = 7,5 + \frac{4}{\alpha^2}$ $\alpha < 1: k_{\tau} = 6,5 + \frac{5}{\alpha^2}$ |
| | 5,41 | - | 9,54 | - | - | - |
| | 1,28 | - | 5,91 | - | 2,134 | - |
| | 1,28 | - | 1,608 | - | - | - |
| | 0,426 | - | 1,702 | - | 0,851 | - |
| | 0,426 | - | 0,567 | - | - | - |

Rebra punih limenih nosaca, zbog svoje velike vitkosti posebno su osetljiva na izbacivanje. Uslovi oslanjanja rebra su takvi da se, sa zadovoljavajucom tacnoscu, kao proracunski model moze koristiti ploca zglobno oslonjena na sve cetiri strane. Kako su nosaci optereceni na savijanje, normalan napon σ_x se linearno menja po visini rebra. Za slucajeve koji nisu obuhvaceni tabelom, koeficijent k_{σ} moze da se odredi u funkciji parametra ψ :

$$k_{\sigma} \begin{cases} 8.2/(1.05 + \psi) & \text{za } 0 < \psi < 1 \\ 7.81 - 6.29\psi + 9.78\psi^2 & \text{za } -1 < \psi < 0 \\ 5.98(1 - \psi)^2 & \text{za } -3 < \psi < -1 \end{cases}$$

60. Nosivost pravougaone ploče na izbočavanje – koncept efektivnog preseka

Ponasanje ploce u postkriticnoj fazi moze da se opise proračunskim modelom koji podrazumeva konstantan raspored napona na efektivnoj sirini b_{eff} . Efektivna sirina ploce koja ostaje aktivna i nakon elasticnog izbočavanja. Ona moze da se odredi iz uslova da je kritican napon elasticnog izbočavanja za plocu efektivne sirine b_{eff} jednak naponu na granici razvlacenja. Prema tome :

$$f_y = \sigma_{x,cr}(b_{eff}) = k_\sigma \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{b_{eff}} \right)^2$$

Daljom transformacijom:

$$f_y = \sigma_{x,cr}(b_{eff}) = k_\sigma \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{b_{eff}} \right)^2 \left(\frac{b}{b_{eff}} \right)^2 = \sigma_{x,cr} \left(\frac{b}{b_{eff}} \right)^2$$

izraz za efektivnu sirinu dobija sledeci oblik:

$$b_{eff} = b \sqrt{\sigma_{x,cr}/f_y}$$

$\sigma_{x,cr}$ kritican napon elasticnog izbočavanja za plocu sirine b .

Ako se, slicno kao kod izvijanja stapa i bocno torzionog izvijanja nosaca, uvede relativna vitkost ploce $\bar{\lambda}_p$ koja je definisana izrazom:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{f_y/\sigma_{x,cr}}$$

Efektivna sirina ploce moze da se napise na sledeci nacin:

$$b_{eff} = b \frac{1}{\bar{\lambda}_p} = \rho b$$

$$\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p}$$

ρ je Karmanova hiperbola koje daje zavisnost izmedju relativne vitkosti ploce i efektivne sirine. Ona ne obuhvata uticaj strukturnih i geometrijskih imperfekcija koje su neminovne kod realnih ploca.

$$\rho = \rho(\bar{\lambda}_p) \leq 1$$

ρ koeficijent redukcije za realne ploce treba da uzme u obzir strukturne i geometrijske imperfekcije.

61. Efektivne širine konzolnih i unutrašnjih delova preseka

Određivanje koeficijenta redukcije ρ :

- za unutrašnje pritisnute delove poprečnog preseka:

$$\rho = 1.0 \quad \text{za} \quad \bar{\lambda}_p \leq 0.5 + \sqrt{0.085 - 0.055\psi}$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0.055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \quad \text{za} \quad \bar{\lambda}_p > 0.5 + \sqrt{0.085 - 0.055\psi}$$

- za konzolne pritisnute delove poprečnog preseka:

$$\rho = 1.0 \quad \text{za} \quad \bar{\lambda}_p \leq 0.748$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0.188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1.0 \quad \text{za} \quad \bar{\lambda}_p > 0.748$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{x,cr}}} = \sqrt{\frac{f_y}{k_\sigma \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu)} \left(\frac{t}{\bar{b}}\right)^2}} = \frac{\bar{b}/t}{28.4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}}$$

$\bar{\lambda}_p$ relativna (bezdimezionalna) vitkost ploče na izbocavanje

\bar{b} odgovarajuća širina razmatranog dela preseka

t debljina lima (ploče)

ψ odnos normalnih napona ($\psi = \sigma_2/\sigma_1$ gde je σ_1 maksimalni normalni napon pritiska na razmatranom delu preseka, a σ_2 normalni napon na suprotnoj ivici istog dela preseka)

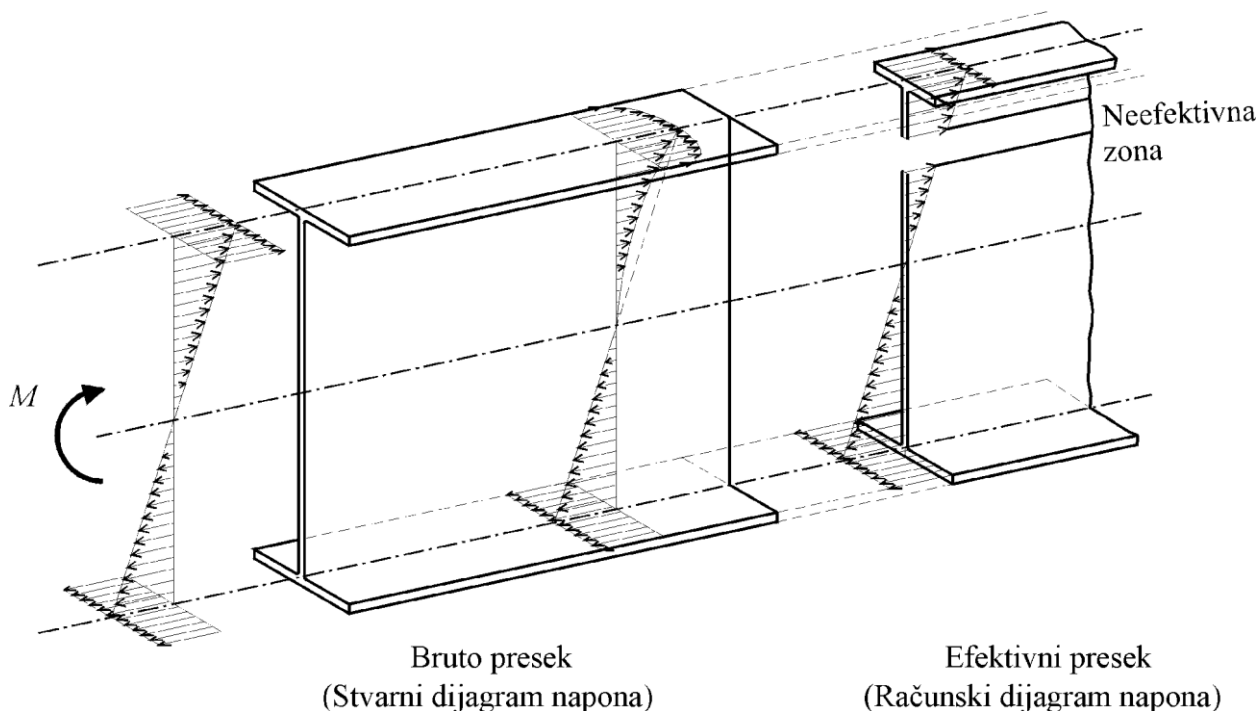
k_σ koeficijent izbocavanja koji zavisi od granicnih uslova (uslova oslanjanja po konturi razmatranog dela preseka) i odnosa napona ψ .

$\sigma_{x,cr}$ elastičan kritičan napon izbocavanja $\sigma_{cr} = k_\sigma \sigma_E = k_\sigma 190000 (t/\bar{b})^2$ u [N/mm²]

$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$ gde je f_y granica razvlacenja u [N/mm²]

62. Efektivni poprečni presek. Povećanje nosivosti primenom ukrućenja

Efektivni poprečni presek – puni limeni nosači



Postupak proračuna prema konceptu efektivnog preseka

- Na ovaj način može da se sprovede proračun stabilnosti na izbočavanje usled dejstva normalnih napona pritiska (poprečni preseki klase 4);
- Sračunavaju se efektivne širine pojedinih, pritisnutih delova poprečnog preseka (pritisnuta nožica i deo rebra nosača);
- Neefektivni delovi poprečnog preseka tretiraju se kao "rupe";
- Određuju se geometrijske karakteristike preostalog, efektivnog poprečnog preseka (A_{eff} , I_{eff} , W_{eff} , ...) i vrši kontrola nosivosti: $M_{Ed} \leq M_{c,Rd}$
- Nosivost se može povećati postavljanjem podužnih ukrućenja (uglavnom na rebru).

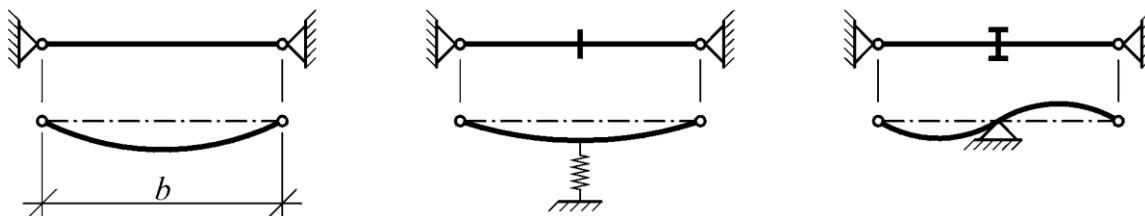
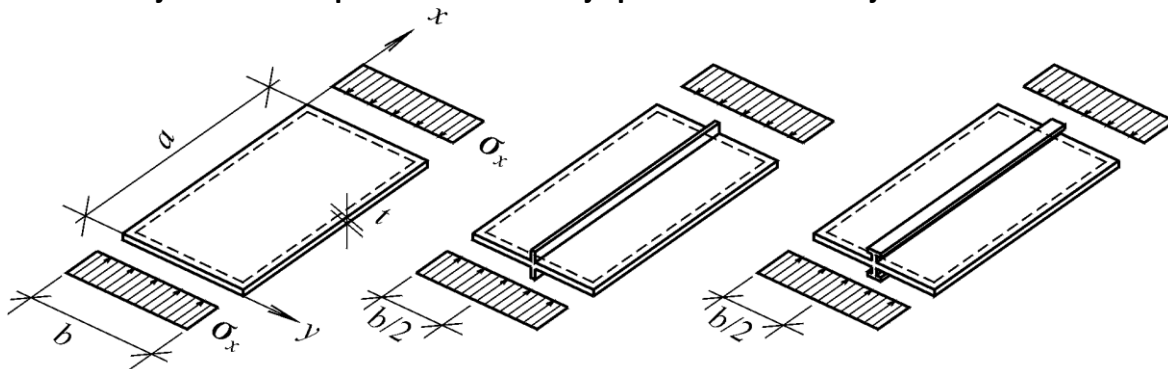
Granične vitkosti pritisnutih delova poprečnog preseka prema EC3

Za nožice - konzolne pritisnute elemente ($k_\sigma = 0.426$; $\psi = 1$) : $\bar{b}/t \leq 14\epsilon$

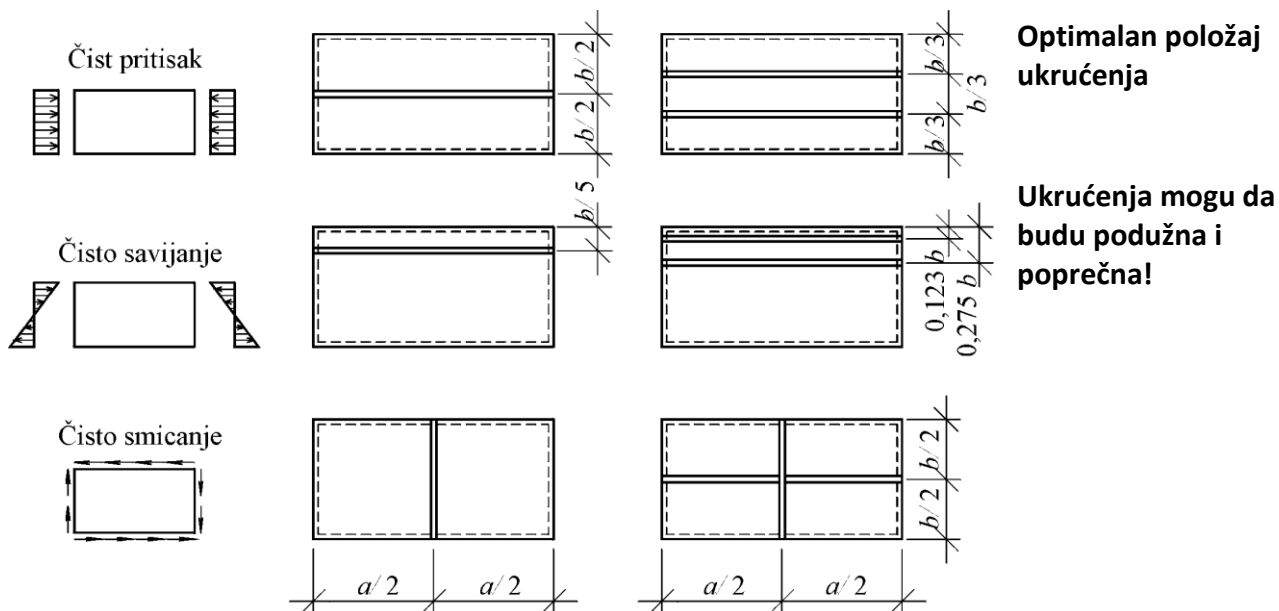
Za rebra – u slučaju čistog savijanja ($k_\sigma = 23.9$; $\psi = -1$) : $\bar{b}/t \leq 124\epsilon$

Za rebra – u slučaju čistog pritiska ($k_\sigma = 4.0$; $\psi = 1$) : $\bar{b}/t \leq 42\epsilon$

Povećanje stabilnosti ploče na izbočavanje primenom ukrućenja



Postavljanjem ukrućenja na sredini polja, tj deljenjem polja na pojedinačna polja širine $b/2$ postize se četverostruko veći Ojlerov, a samim tim i kritičan napon izbočavanja.



63. Izbočavanje ukrućene ploče usled normalnih napona pritiska (efektivni presek, redukovana debljina)

Izbočavanje ukrućenih ploča usled normalnog napona pritiska

Proracun nosivosti na izbočavanje ukrućenih ploča prema EC3 se zasniva na konceptu efektivnog poprečnog preseka. Za limove sa poduznim ukrućenjima moraju da se uzmu u obzir uticaji lokalnog izbočavanja svih pritisnutih pojedinačnih polja kao i uticaji globalnog izbočavanja ukrućenog lima.

Efektivna površina preseka svakog pojedinačnog polja treba da se odredi kao u slučaju neukrućenog lima, pomoću koeficijenta redukcije ρ_{loc} , koji se određuje posebno za unutrašnje, odnosno za konzolne delove poprečnog preseka. Na ovaj način se uzima lokalno izbočavanje neukrućenog lima između poduznih ukrućenja i/ili rebara nosaca. Pored toga neophodno je da se proverí i globalno izbočavanje ukrućene ploče.

Efektivna površina pritisnute zone ukrućenog lima treba da se odredi na osnovu :

$$A_{c,eff} = \rho_c A_{c,eff,loc} + \sum b_{edge,eff} t$$

ρ_c koeficijent redukcije kojim se uzima u obzir uticaj globalnog izbočavanja ukrućene ploče.

t debljina ukrućene ploče (lima)

$b_{edge,eff}$ širine ivičnih pritisnutih delova lima uz rebro punog limenog elementa koji ne učestvuje u globalnom izbočavanju ukrućene ploče

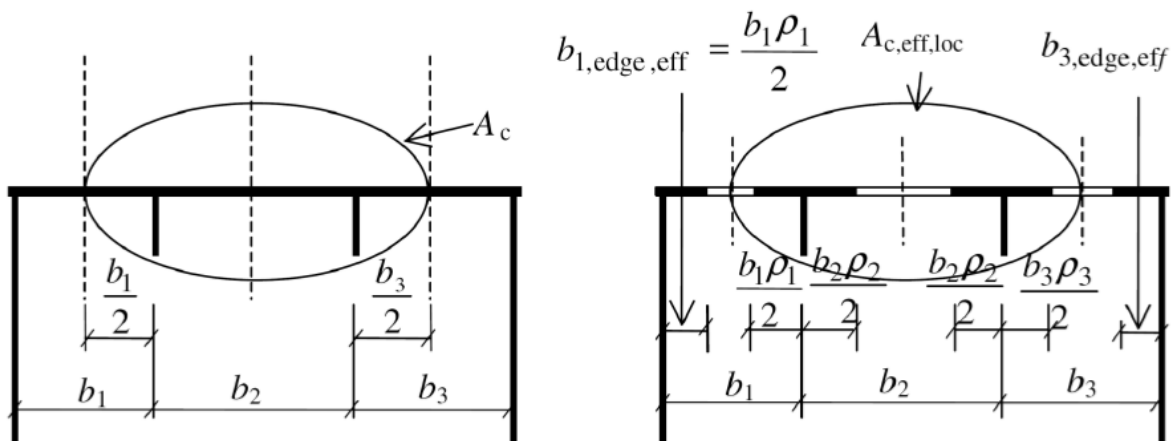
$A_{c,eff,loc}$ efektivna površina preseka svih ukrućenja i pojedinačnih polja koja su potpuno ili delimično pritisnuta, izuzimajući ivične delove širine $b_{edge,eff}$

$$A_{c,eff,loc} = A_{sl,eff} + t \sum \rho_{loc,i} b_i = A_{sl,eff} + \sum b_{i,eff}$$

$A_{sl,eff}$ suma efektivnih preseka svih poduznih ukrućenja koja se nalaze u pritisnutoj zoni, čiji je bruto poprečni presek A_{sl}

$\rho_{loc,i}$ koeficijent redukcije usled lokalnog izbočavanja i-tog pojedinačnog polja

$b_{i,eff}$ efektivna širina i-tog pritisnutog pojedinačnog polja



Pri određivanju koeficijenta redukcije ρ_c , pored površinskog ponasanja ploče, odnosno čistog izbočavanja treba da se uzme u obzir i stubni tip izbočavanja. koeficijent ρ_c se određuje na osnovu interpolacije, između koeficijenta redukcije ρ za čisto izbočavanje ploče i koeficijenta redukcije χ_c za stubno ponasanje – izvijanje stuba.

Kada postoje i “shear lag” efekti, što može biti slučaj nosaca sa širokim pojasevima, efektivna površina pritisnute zone ukrućenog lima $A_{c,eff}$ treba da se odredi kao $A_{c,eff}^*$ uzimajući u obzir, ne samo efekte izbočavanja, već i “shear lag” efekte.

Koeficijent redukcije ρ za čisto izbočavanje se određuje u funkciji relativne vitkosti, prema izrazima za neukrucenu ploču, relativna vitkost $\bar{\lambda}_p$ koja se određuje na sledeći način:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\beta_{A,c} f_y / \sigma_{cr,p}}$$

$$\beta_{A,c} = A_{c,eff,loc} / A_c$$

A_c bruto površina pritisnute zone ukrucenog lima, izuzimajući delove pojedinačnih polja koji su oslonjeni na susedne pune limene elemente

$A_{c,eff,loc}$ efektivna površina istog dela ploče, uzimajući u obzir odbitak usled izbočavanja pojedinačnih polja i ukrucenja

$\sigma_{cr,p}$ kritičan napon izbočavanja ukrucene ploče

Kritičan napon izbočavanja ukrucene ploče

$$\sigma_{cr,p} = k_{\sigma,p} \sigma_E$$

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 = 190000 \left(\frac{t}{b}\right)^2 [N/mm^2]$$

$\sigma_{cr,p}$ je elastičan kritičan napon izbočavanja na ivici polja u kojoj se javlja maksimalan napon pritiska.

$k_{\sigma,p}$ se određuje iz literature, za odgovarajući raspored ukrucenja i dijagram normalnih napona, ili na osnovu odgovarajuće numeričke analize (softvera) na bazi MKE (npr. EBplate).

Prema SRPS EN 1993-1-5, za ukrucene limove sa bar tri ekvidistantna poduzna ukrucenja koeficijent izbočavanja $k_{\sigma,p}$ može da se aproksimira sledećim izrazom:

$$k_{\sigma,p} = \frac{2((1+\alpha^2)^2 + \gamma - 1)}{\alpha^2(\psi + 1)(1 + \delta)} \quad \text{ako je } \alpha \leq \sqrt[4]{\gamma}$$

$$k_{\sigma,p} = \frac{4(1 + \sqrt{\gamma})}{(\psi + 1)(1 + \delta)} \quad \text{ako je } \alpha > \sqrt[4]{\gamma}$$

$$\gamma = \frac{I_{sl}}{I_p}; \quad \delta = \frac{\sum A_{sl}}{A_p}; \quad \alpha = \frac{a}{b} \geq 0.5; \quad \psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \geq 0.5; \quad I_p = \frac{bt^3}{12(1-\nu^2)}; \quad A_p = bt;$$

I_{sl} moment inercije lima sa svim poduznim ukrucenjima

I_p moment inercije lima na savijanje

$\sum A_{sl}$ suma bruto površina svih poduznih ukrucenja

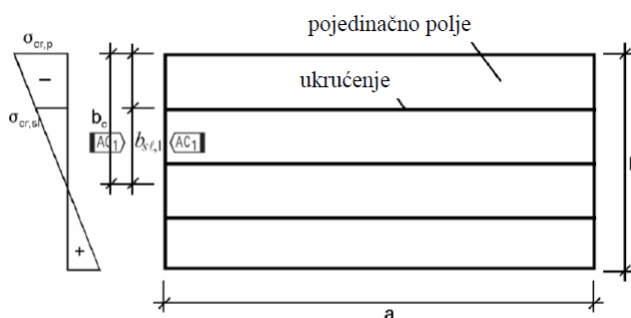
A_p bruto površina lima

σ_1 veći ivični napon pritiska

σ_2 manji ivični napon pritiska

a razmak poprečnih ukrucenja

Rebro nosača sa poduznim ukrucenjima



$$\sigma_{cr,p} = \sigma_{cr,sl} b_c / b_{sl,1}$$

a razmak između poprečnih ukrucenja;

b visina lima (rebra) $b=hw$;

b_c visina pritisnutog dela rebra;

$b_{sl,1}$ rastojanje od neutralne ose do ukrucenja 1 (najopterećenijeg);

Kritičan napon izbočavanja ukrucene ploče $\sigma_{cr,p}$ dobija se ekstrapolacijom kritičnog napona

izbočavanja najopterećenijeg poduznog ukrucenja u zoni pritiska $\sigma_{cr,sl}$

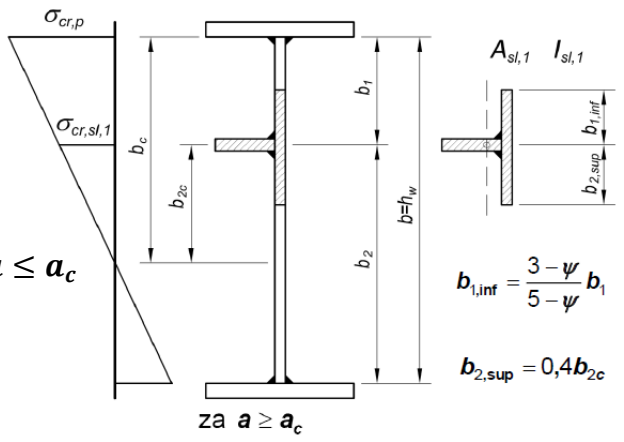
Rebro nosača sa jednim podužnim ukrucenjem u pritisnutoj zoni

Kod limova sa jednim podužnim ukrucenjem u pritisnutoj zoni, sto je veoma cest slucaj kod rebra punih limenih nosaca, proracun kritičnog napona izbočavanja $\sigma_{cr,p}$ moze da se pojednostavi primenom fiktivnog pritisnutog stuba na elasticnim osloncima koji reprezentuju uticaj lima. U opstem slucaju, zanemarujući ukrucenja u zategnutoj zoni, elastican napon izvijanja ukrucenja moze da se odredi na sledeci nacin:

$$\sigma_{cr,p} = \frac{\sigma_{cr,sl} b_c}{b_{sl,1}} \quad b_{sl,1} = b_{2c}$$

$$\sigma_{cr,sl} = \frac{1.05E\sqrt{I_{sl,1}t^3b}}{A_{sl,1}b_1b_2} \quad \text{za } a \geq a_c$$

$$\sigma_{cr,sl} = \frac{\pi^2 EI_{sl,1}}{A_{sl,1}a^2} + \frac{Et^3ba^2}{4\pi^2(1-\nu^2)A_{sl,1}b_1^2b_2^2} \quad \text{za } a \leq a_c$$

$$a_c = 4.33 \sqrt[4]{\frac{I_{sl,1}b_1^2b_2^2}{t^3b}}$$


za $a \geq a_c$

$b_{1,inf} = \frac{3-\psi}{5-\psi} b_1$
 $b_{2,sup} = 0.4b_{2c}$

$A_{sl,1}$ bruto površina ekvivalentnog stuba koga cine ukrucenja i sadejstvujuci delovi lima
 $I_{sl,1}$ moment inercije ekvivalentnog stuba oko njegove tezisne ose, paralelne ravni lima
 b_1 i b_2 rastojanja od poduznih ivica rebra do ukrucenja ($b_1 + b_2 = b$)

Čisto izvijanje - stubno ponašanje

Relativna vitkost $\bar{\lambda}_c$ se odredjuje na osnovu kritičnog napona elasticnog izvijanja $\sigma_{cr,c}$ na sledeci nacin:

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,c}}} \quad \text{za neukrucene limove} \quad \sigma_{cr,c} = \frac{\pi^2 Et^2}{12(1-\nu^2)a^2}$$

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{\beta_{A,c} f_y}{\sigma_{cr,c}}} \quad \text{za ukrucene limove} \quad \sigma_{cr,c} = \frac{\sigma_{cr,sl} b_c}{b_{sl,1}}$$

$$\beta_{A,c} f_y = A_{sl,1,eff} / A_{sl,1} \quad \sigma_{cr,sl} = \pi^2 EI_{sl,1} / A_{sl,1} a^2$$

$A_{sl,1}$ bruto površina poprečnog preseka ukrucenja sa sadejstvujucim delovima lima

$A_{sl,1,eff}$ efektivna površina poprečnog preseka ukrucenja sa sadejstvujucim delovima lima uzimajući u obzir odbitak usled likalnog izbočavanja

$I_{sl,1}$ moment inercije bruto poprečnog preseka ukrucenja sa sadejstvujucim delovima lima (za savijanje izvan rebra)

Koeficijent redukcije usled izvijanja χ_c

Koeficijent redukcije χ_c treba da se odredi na osnovu relativne vitkosti $\bar{\lambda}_c$ i odgovarajuće krive izvijanja. Za neukrucene limove se primenjuje kriva izvijanja **a** sa koeficijentom imperfekcije $\alpha=0.21$. Za ukrucene limove koeficijent imperfekcije treba da se odredi na sledeci nacin:

$$\alpha_e = \alpha + \frac{0.09}{i/e}$$

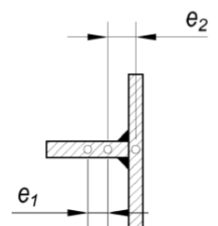
$$i = \sqrt{I_{sl,1} / A_{sl,1}} \quad e = \max(e_1; e_2)$$

e_1 rastojanje od tezista ukrucenja do tezista ekvivalentnog stuba

e_2 rastojanje od tezista lima do tezista ekvivalentnog stuba

$\alpha = 0.34$ (kriva **b**) za ukrucenja zatvorenog poprečnog preseka

$\alpha = 0.49$ (kriva **c**) za ukrucenja otvorenog poprečnog preseka



Interakcija izvijanja i izbočavanja – ρ_c

Interakcija izvijanja i izbočavanja ukrucenog lima se uzima u obzir pomocu koeficijenta redukcije ρ_c koji se odredjuje interpolacijom izmedju vrednosti χ_c i ρ na sledeci nacin:

$$\rho_c = (\rho - \chi_c) \xi (2 - \xi) + \chi_c$$

$$\xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,p}} - 1 \text{ ali } 0 \leq \xi \leq 1$$

$$\xi = 0 \rightarrow \rho_c = \chi_c \quad \text{cisto izvijanje}$$

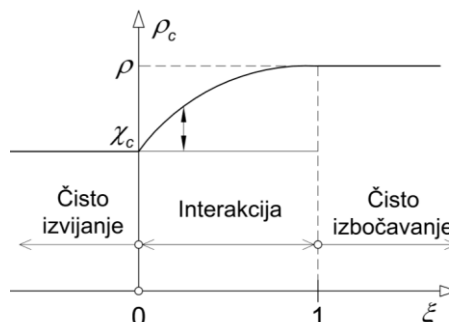
$$\xi = 1 \rightarrow \rho_c = \rho \quad \text{cisto izbočavanje}$$

$\sigma_{cr,p}$ elastičan kritičan napon izbočavanja

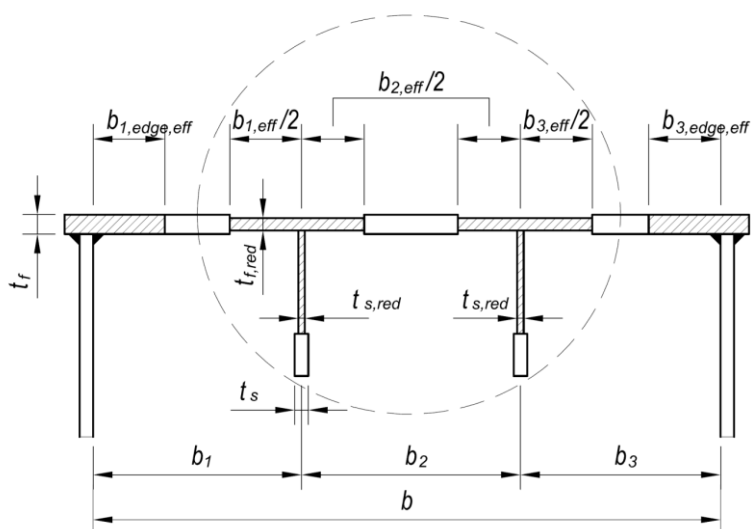
$\sigma_{cr,p}$ elastičan kritičan napon izvijanja

χ_c koeficijent redukcije usled izvijanja

ρ koeficijent redukcije usled izbočavanja



Redukovane debljine u zoni ukrućenja - pritisnuti pojas



$$t_{f,red} = \rho_c t_f$$

$$t_{s,red} = \rho_s t_s$$

$$A_{sl,eff} = \sum b_{s,eff,j} t_{s,j}$$

$$A_{c,eff} = \rho_c \left(A_{sl,eff} + \sum \rho_{loc,i} b_i t_f \right) + \sum b_{edge,eff} t_f$$

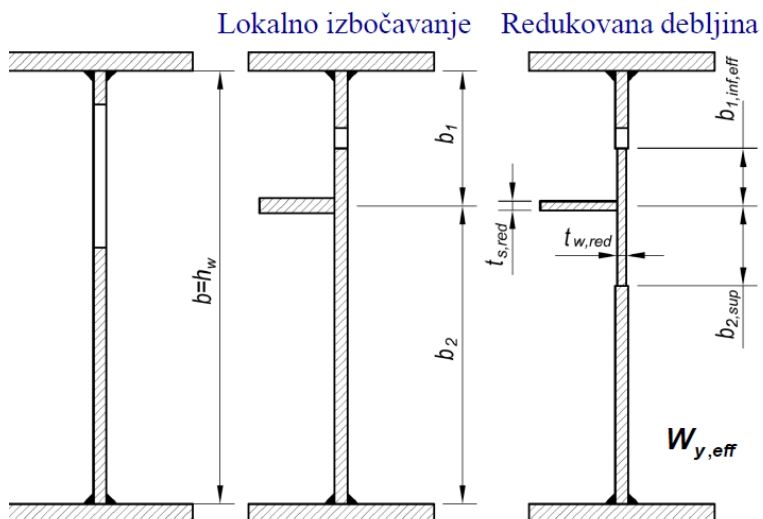
$$A_{c,eff} = \sum b_{s,eff,j} t_{s,red,j} + \sum \rho_{loc,i} b_i t_{f,red} + \sum b_{edge,eff} t_f$$

Efektivan poprečni presek ukrućenog rebra nosača

Kada se primenjuje uprosćena metoda proračuna kritičnog napona za limove sa jednim ili dva poduzna ukrućenja u zoni pritiska, ako je vrednost $\rho_c f_y / \gamma_{m1}$ veća od prosečnog napona u ukrućenju $\sigma_{com,Ed}$ nije potrebna redukcija poprečnog preseka usled interakcije izvijanja i izbočavanja. U suprotnom, neophodno je da se, kao u slučaju ukrućenih limova izloženim konstantnom naponu pritiska, redukuje poprečni presek ukrućenja (slika b). Redukcija preseka ukrućenja takodje nije potrebna kad je ukrućenje potpuno efektivno, odnosno kada je $\rho_c = 1$

Efektivan presek
bez ukrućenja

Efektivan presek
sa ukrućenjem



$$b_{1,inf,eff} = \frac{3 - \psi}{5 - \psi} b_{1,eff}$$

$$b_{1,eff} = \rho_{1,loc} b_1$$

$$b_{2,sup} = 0.4 b_{2c}$$

$$t_{w,red} = \rho_c t_w$$

$$t_{s,red} = \rho_c t_s$$

Kontrola izbočavanja usled normalnih napona pritiska

Primenom metode efektivnog preseka kontrola nosivosti na izbočavanje rasmatranog ukrućenog ili neukrućenog polja, elementa izloženog pritisku i kosom savijanja treba da se sprovede na sledeći način :

$$\eta_1 = \frac{N_{Ed}}{A_{eff} f_y} + \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{y,N}}{W_{y,eff,min} f_y} + \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{z,N}}{W_{z,eff,min} f_y}$$

N_{Ed} proračunska vrednost aksijalne sile pritiska

$M_{y,Ed}$ i $M_{z,Ed}$ proračunske vrednosti momenata savijanja oko y-y i z-z ose, respektivno

$e_{y,N}$ i $e_{z,N}$ eventualni ekscentriciteti tezista efektivnog poprečnog preseka u odnosu na teziste bruto preseka

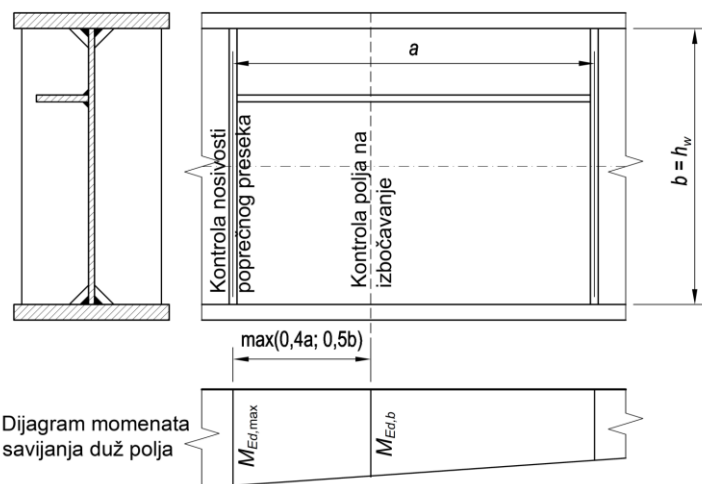
A_{eff} efektivna površina poprečnog preseka koji je izložen čistom pritisku

$W_{y,eff,min}$ elastični otporni moment efektivnog poprečnog preseka oko y-y ose

$W_{z,eff,min}$ elastični otporni moment efektivnog poprečnog preseka oko z-z ose

γ_{m0} parcijalni koeficijent

Uticaji u polju rebra za proračun izbočavanja

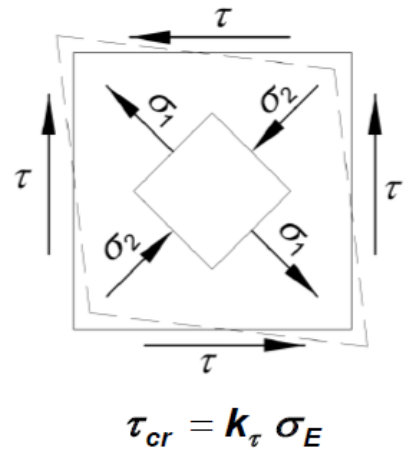


Ako postoji značajna promena momenata savijanja duž razmatranog polja, izbočavanje se proverava za uticaje u preseku na rastojanju $\max(0,4a; 0,5b)$ od ivičnog preseka sa maksimalnim uticajima; Kontrolu nosivosti (bruto) preseka treba sprovести na mestu maksimalnih uticaja.

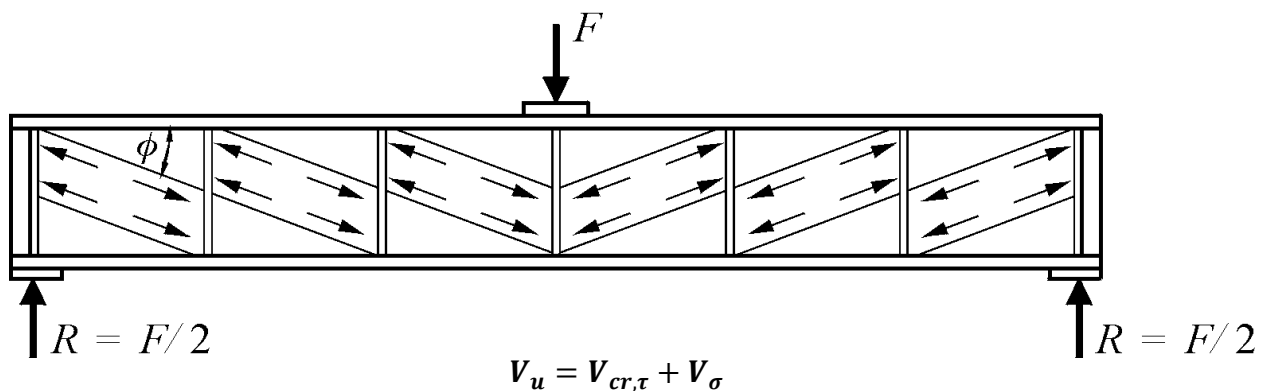
Do izbočavanja ploča smicanjem dolazi usled dejstva glavnog napona pritiska σ_2 , koji deluje u dijagonalnom pravcu, pod uglom od 45° . Oblik i položaj izbočine se u ovom slučaju potpuno razlikuje u odnosu na izbočavanje usled normalnih napona pritiska. Izbočina u vidu jednog ili više izduženih nabora se formira dijagonalno u pravcu delovanja glavnog napona zatezanja σ_1 .

Kod nosača kod kojih je vitkost rebra h_w/t_w veća od $72\varepsilon/\eta$ za neukrućena rebra, odnosno $31\varepsilon/\eta k_t^{0.5}$ za ukrućena rebra, treba da se proveri izbočavanje smicanjem, a na osloncima treba predvideti ukrućenja. ($\eta = 1, 0!$)

Pri izbočavanju smicanjem nakon dostizanja kritičnog napona τ_{cr} i formiranja izbočine ne dolazi do kolapsa odnosno iscrpljenja nosivosti citavog elementa. Nakon dostizanja kritičnog napona τ_{cr} , smicuće polje je sposobno da prihvati dodatne uticaje, odnosno može se reći da postoji **post-kritična rezerva** nosivosti koja se ostvaruje ponasanjem smicućeg polja kao fiktivnog resetkastog nosača sa dojagonalno zategnutim poljem. Ovu resetkastu strukturu čine nožice nosača kao pojasevi, poprečna ukrućenja kao vertikale i dojagonalno izbočeno rebro kao zategnuta dijagonala, odnosno zategnuto polje. Do kolapsa smicućeg polja, dakle, dolazi tek nakon iscrpljenja nosivosti zategnutog poja. Ovakav mehanizam loma je moguć samo kod nosača koji imaju oslonacka ukrućenja koja su sposobna da omoguće ankerisanje horizontalne sile iz zategnutog polja.



Proračunski model za nosivost na izbočavanje smicanjem - Post-kritična rezerva nosivosti



V_u granična nosivost,

$V_{cr,\tau}$ sila pri izbočavanju rebra smicanjem,

V_σ post-kritična rezerva nosivost.

Metoda zategnutog polja - EC3

Rokijev model

Nakon iscrpljenja nosivosti rebra na izbočavanje smicanjem potpunom plastifikacijom zategnutog polja, ne dolazi do loma smicućeg polja. Naime, i nožice nosača također učestvuju u nosivosti smicućeg polja, pa tek nakon njihove plastifikacije i formiranja plasticnih zglobova dolazi do formiranja mehanizma loma i kolapsa polja nosača usled izbočavanja smicanjem. Ovaj mehanizam se sastoji od četiri plasticna zgloba, po dva na svakoj nožici. U opstem slučaju, kod monosimetričnih I nosača, dodatna nosivost koja je posledica dopinosa nožica V_{bf} može da se odredi kao zbir reakcija prostih greda na cijim kajejima su formirani plasricni zglobovi, a koje se nalaze na gornjoj i donjoj nožici:

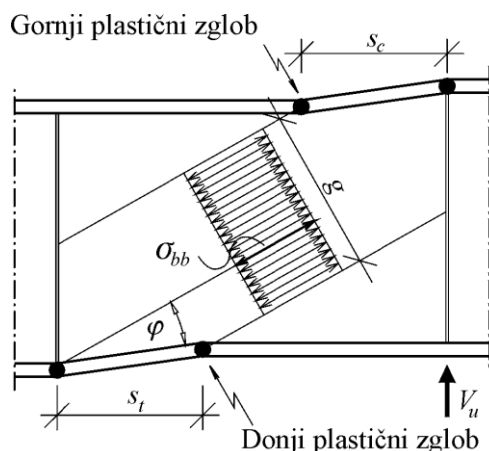
$$V_{bf,Rd} = \frac{2M_{pl,f1}}{s_c} + \frac{2M_{pl,f2}}{s_t}$$

s_c razmak izmedju plasticnih zglobova na gornjoj nozici

s_t razmak izmedju plasticnih zglobova na donjoj nozici

$M_{pl,f1}$ plastican moment nosivosti gornje nozice

$M_{pl,f2}$ plastican moment nosivosti donje nozice



Prema Heglundu razmak izmedju plasticnih zglobova, odnosno raspon proste grede na cijim krajevima se formiraju plasticni zglobovi treba da se odredi na osnovu izraza :

$$c_i = a(0.25 + 1.6 \frac{M_{pl,fi}}{M_{pl,w}})$$

a razmak izmedju poprecnih ukrucenja

$M_{pl,fi}$ plasticni moment nosivosti posmatrane nozice ($i=1,2$)

$M_{pl,w}$ plasticni moment nosivosti rebra

U slucaju obostrano simetricnih I nosaca kod kojih je

$M_{pl,f1} = M_{pl,f2}$ i $s_c = s_t = c$ vazii :

$$V_{bf,Rd} = \frac{4M_{f,Rd}}{c}$$

Doprinos nozica ukupnoj nosivosti na izbocavanje je uglavnom mala, pogotovo ako se ima u vidu da su nozice uglavnom iskoriscene za prijem globalnog momenta savijanja oko glavne y-y ose $M_{y,Ed}$, sto bitno utice na smanjenje plasticnog momenta nosivosti nozica $M_{pl,f}$. Izuzetak mogu da budu krajnja, oslonacka polja nosaca, kod kojih su momenti savijanja mali, a koji imaju nozice znacajnih debljina.

Proracunska nosivost ukrucenog, ili neukrucenog rebra na izbocavanje smicanjem treba da se odredi na osnovu sledeceg izraza:

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd}$$

$V_{bw,Rd}$ doprinos rebra

$V_{bf,Rd}$ doprinos nozica

Pri tome treba istaci da proracunska nosivost rebra na izbocavanje smicanjem ne moze da bude veca od plasticne nosivosti poprecnog preseka na smicanje :

$$V_{b,Rd} \leq V_{pl,Rd} \leq \eta \frac{f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{m1}} = \eta A_w \tau_y / \gamma_{m1}$$

Doprinos rebra

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{m1}}$$

χ_w koeficijent redukcije za izbocavanje smicanjem (tabela)

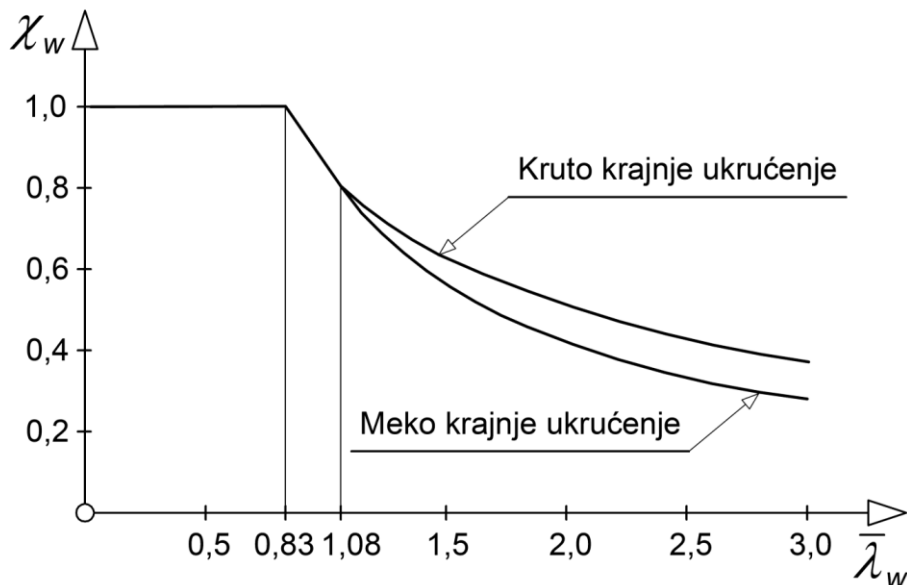
f_{yw} granica razvlacenje rebra

γ_{m1} parcijalni koeficijent sigurnosti

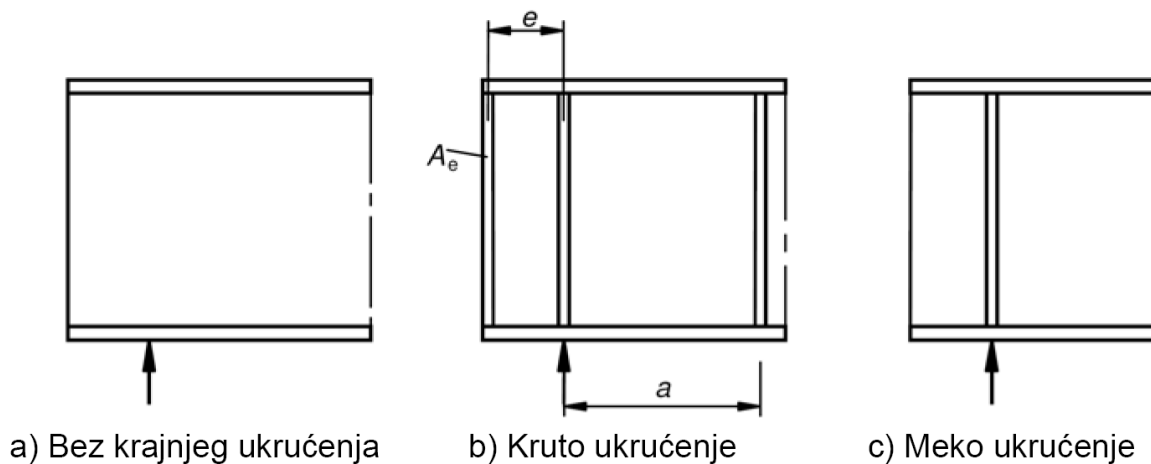
| | Kruto krajnje ukrucenje | Meko krajnje ukrucenje |
|---|--------------------------------|---|
| $\bar{\lambda}_w < 0.83/\eta$ | η | η |
| $0.83/\eta \leq \bar{\lambda}_w < 1.08$ | $0.83/\eta$ | $F_{Rd} = \frac{f_{yw} L_{eff} t_w}{\gamma_{m1}}$ |
| $\bar{\lambda}_w > 0.83/\eta$ | $1.37/(0.7 + \bar{\lambda}_w)$ | |

Prema SRPS EN 1993-1-5/NA $\eta = 1$

Graficka interpretacija koeficijenta redukcije χ_w u funkciji relativne vitkosti $\bar{\lambda}_w$ za kruta i meka krajnja oslonacka ukrućenja za $\eta=1$



Nacin oslanjanja na krajevima nosaca



Relativna vitkost rebra na izbočavanje smicanjem

$$\bar{\lambda}_w = 0.76 \sqrt{f_{yw}/\tau_{cr}} \quad \tau_{cr} = k_\sigma \sigma_E \quad \sigma_E = 190000 \left(\frac{t_w}{h_w} \right)^2 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

- za rebra nosaca sa poprecnim ukrućenjima samo na osloncima ($k_\tau=5.34$)

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w/t_w}{86.4\epsilon}$$

- za rebra nosaca koja pored oslonackih imaju i poprecna medjuukrućenja ili poduzna ukrućenja, ili i poduzna i poprecna ukrućenja

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w/t_w}{37.4\epsilon\sqrt{k_\tau}}$$

- za rebra sa poprecnim i poduznim ukrućenjima:

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_{wi}/t_w}{37.4\epsilon\sqrt{k_{\tau i}}}$$

h_{wi} i $k_{\tau i}$ se odnose na pojedinačno polje koje ima najveću vitkost od svih pojedinačnih polja u okviru posmatranog polja rebra. Uzima se manja vrednost od maksimalne vitkosti pojedinačnih polja i vitkosti ukrućenog polja.

Koeficijent izbočavanja smicanjem - k_τ

Za zglobno oslonjene limove sa krutim poprecnim ukrucenjima, bez poduznih ukrucenja, ili sa vise od dva poduzna ukrucenja, kao i za limove sa jednim ili dva poduzna ukrucenja, kao i za limove sa jednim ili dva poduzna ukrucenja, kod kojih je $\alpha = a/h_w \geq 3$:

$$k_\tau = 5.34 + 4/\alpha^2 + k_{\tau sl} \quad \text{kada je } \alpha \geq 1$$
$$k_\tau = 4 + 5.34/\alpha^2 + k_{\tau sl} \quad \text{kada je } \alpha < 1$$
$$k_{\tau sl} = 9 \left(\frac{h_w}{a} \right)^2 \sqrt[4]{\frac{I_{sl}}{(t_w^3 h_w)^3}} \quad \text{ali ne manje od } \frac{2.1}{t_w} \sqrt[3]{\frac{I_{sl}}{h_w}}$$

$k_{\tau sl} = 0$ kada nema poduznih ukrucenja

a rastojanje uzmedju krutih poprecnih ukrucenja

I_{sl} moment inercije (oko z-z ose) poduznog ukrucenja sa sadejstvujucim delovima ukrucenog lima od po $15t_w \varepsilon$ sa svake strane ukrucenja. Za rebra sa dva ili vise ukrucenja, I_{sl} je zbir krutosti pojedinacnih ukrucenja

Za limove sa jednim ili dva poduzna ukrucenja i odnosom $\alpha < 3$ je:

$$k_\tau = 4.1 + \frac{6.3 + 0.18 \frac{I_{sl}}{t_w^3 h_w}}{\alpha^2} + 2.2 \sqrt[3]{\frac{I_{sl}}{t_w^3 h_w}}$$

Doprinos nozica

Doprinos nozica nosivosti na izbočavanje smicanjem, moze da se uzme u obzir kada njihova nosivost nije u potpunosti iskoriscena za prihvatanje momenta savijanja oko jace glavne ose inercije, odnosno kada je $M_{y,Ed} < M_{y,f,Rd}$, i to na sledeci nacin:

$$V_{bf,Rd} = \frac{b_f t_f^2 f_{yf}}{c \gamma_{m1}} \left(1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right)$$

b_f i t_f sirina i debljina nozice koja ima manju aksijalnu nosivost (to je uvek nozica sa menjom površinom, izuzev u slucaju hibridnih nosaca); Pri tome za b_f ne treba da se usvoji vrednost veca od $15t_f \varepsilon$ sa obe strane rebra.

M_{Ed} proracunska vrednost momenta savijanja oko y-y ose koji deluje na posmatrano polje

$M_{f,Rd} = M_{f,k}/\gamma_{m0}$ moment nosivosti poprecnog preseka koga cine samo efektivne površine nozica

c razmak izmedju plasticnih zglobova, koji treba da se odredi prema sledecem izrazu:

$$c = a \left(0.25 + \frac{1.6 b_f t_f^2 f_{yf}}{t_w h_w^2 f_{yw}} \right)$$

f_{yf} granica razvlacenja materijala od koga je izradjena nozica koja ima manju aksijalnu nosivost

f_{yw} granica razvlacenja materijala od koga je izradjeno rebro nosaca

Doprinos nozica je po pravilu znatno manji od doprinosa rebra!

Kontrola stabilnosti rebra na izbočavanje smicanjem treba da se sprovede za svako merodavno polje smicanja na sledeci nacin :

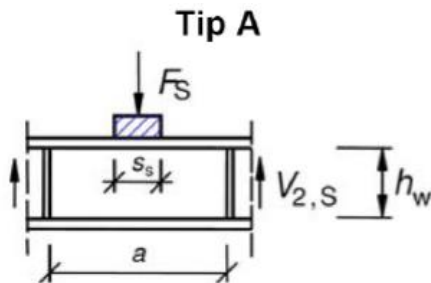
$$\eta_3 = V_{Ed}/V_{b,Rd}$$

V_{Ed} proracunska smicuca sila koja ukljucuje i uticaj smicucih napona usled torzije, ako ona postoji.

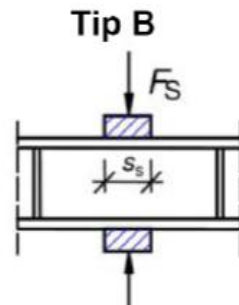
66. Izbočavanje usled dejstva lokalne poprečne sile

U Evrokodu je analiziran problem granicne nosivosti na izbočavanje usled dejstva poprecne koncentrisane sile za tri slucaja naprezanja, odnosno tri modela nanosenja opterecenja:

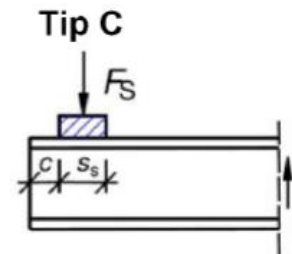
- **Tip A:** opterecenje deluje preko jedne nozice i prihvata se smicucim silama u rebu nosaca
- **Tip B:** opterecenje deluje preko obe nozice i prenosi se direktno kroz rebro
- **Tip C:** opterecenje deluje preko jedne nozice u blizini neukrucenog kraja nosaca



$$k_F = 6 + 2 \left(\frac{h_w}{a} \right)^2$$



$$k_F = 3.5 + 2 \left(\frac{h_w}{a} \right)^2$$



$$k_F = 2 + 6 \left(\frac{s_s + c}{h_w} \right) \leq 6$$

Koeficijenti izbočavanja k_F za razlicite tipove delovanja opterecenja

Za neukrucena i ukrucena rebra nosivost na izbočavanje usled dejstva poprecnih sila treba da se odredi na osnovu sledeceg izraza :

$$F_{Rd} = \chi_F \frac{l_y t_w f_{yw}}{\gamma_{m1}} = \chi_F \frac{F_y}{\gamma_{m1}}$$

χ_F koeficijent redukcije za izbočavanje usled poprecne sile

l_y efektivna opterecena duzina koja odgovara duzini krutog oslonca S_s

t_w debljina rebra

f_{yw} granica razvlacenja rebra

F_y nosivost rebra pri plastifikaciji

$$\chi_F = \frac{0.5}{\bar{\lambda}_F} \leq 1 \quad \bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{F_y}{F_{cr}}} = \sqrt{\frac{l_y t_w f_{yw}}{F_{cr}}} \quad F_{cr} = 0.9 k_F E \frac{t_w^3}{h_w}$$

$\bar{\lambda}_F$ relativna vitkost na izbočavanje

F_{cr} kriticka sila izbočavanja pravougaone ploce usled dejstva lokalne poprecne sile

Kod rebra sa poduznim ukrucenjem na koja deluje poprecno opterecenje (**Tip A**), koeficijent izbočavanja k_F moze da se odredi na sledeci nacin :

$$k_F = 6 + 2 \left(\frac{h_w}{a} \right)^2 + \left(5.44 \frac{b_1}{a} - 0.21 \right) \sqrt{\gamma_s}$$

a razmak izmedju susednih poprecnih ukrucenja

b_1 visina opterecenog pojedinacnog polja, koja predstavlja cisto rastojanje izmedju opterecene nozice i poduznog ukrucenja

γ_s relativna krutost ukrucenja

$$\gamma_s = 10.9 \frac{I_{sl,1}}{h_w t_w^3} \leq 13 \left(\frac{a}{h_w} \right)^3 + 210 \left(0.3 - \frac{b_1}{a} \right)$$

$I_{sl,1}$ moment inercije ukrucenja koje je najblize nozici na koju deluje poprecno opterecenje ukljucujuci sadejstvujuce delove rebra

Opterećena dužina l_y

Za modele opterećenja **Tipa A** i **Tip B**, efektivna opterećena dužina l_y treba da se odredi na osnovu izraza:

$$l_y = s_s + 2t_f \left((1 + \sqrt{m_1 + m_2}) \right) \leq a$$

s_s dužina krutog oslonca

t_f debljina nožice na kojoj deluje poprečna sila

a razmak između susednih poprecnih ukrucenja

Za model opterećenja **Tip C**, efektivna dužina l_y treba da se odredi na sledeći način:

$$l_y = \min(l_{y,1}; l_{y,2})$$

$$l_{y,1} = l_e + t_f \sqrt{\frac{m_1}{2} + \left(\frac{l_e}{t_f}\right)^2 + m_2}$$

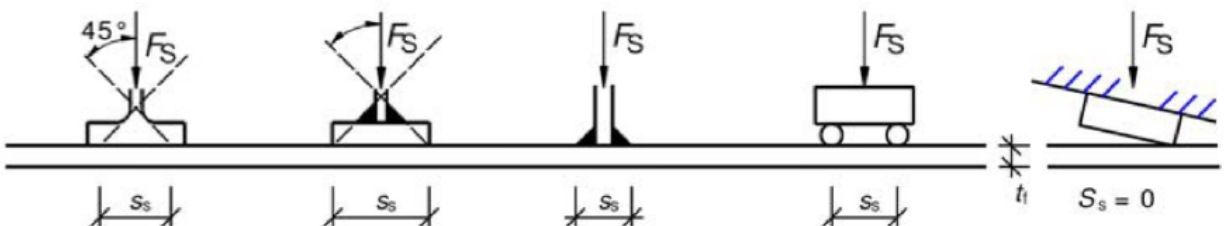
$$l_{y,2} = l_e + t_f \sqrt{m_1 + m_2}$$

$$l_e = \frac{k_F E t_w^2}{2 f_{yw} h_w} \leq s_s + c$$

c rastojanje od kraja prepusta nosaca do mesta početka delovanja poprecne sile

$$m_1 = \frac{f_{yf} b_f}{f_{yw} t_w} \quad m_2 = \begin{cases} 0.02 \left(\frac{h_w}{t_f}\right)^2 & \text{za } \bar{\lambda}_F > 0.5 \\ 0 & \text{za } \bar{\lambda}_F \leq 0.5 \end{cases}$$

Dužina krutog oslonca s_s je jednaka dužini na kojoj se aplicirano opterećenje raspoređuje u rebro nosaca pod nagibom od 44° , ali uz uslov da s_s ne može da bude veće od visine rebra nosaca h_w . Ukoliko nekoliko koncentrisanih sila deluje na bliskom rastojanju, nosivost treba da se proveri za svaku silu pojedinačno, kao i za ukupnu silu sa dužinom krutog oslonca s_s koja je jednaka rastojanju između centara delovanja spoljasnih koncentrisanih sila.



Kontrola nosivosti na lokalno izbocavanje usled poprecne koncentrisane sile treba da se sprovede na sledeći način :

$$\eta_2 = \frac{F_{Ed}}{F_{Rd}} \leq 1$$

F_{Ed} proraćunska vrednost poprecne koncentrisane sile

F_{Rd} proraćunska nosivost na lokalno izbocavanje usled dejstva poprecne sile

67. Interakcije izbočavanja (usled normalnih i smičućih napona, usled normalnih napona i poprečne sile)

Interakcija izbočavanja usled normalnog i smičućeg napona

Interakcija izbočavanja usled savijanja i smicanja rebra kod nosaca I ili sanducastih preseka ne treba da se kontrolise kad je ispunjen uslov:

$$\bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}} \leq 0.5$$

V_{Ed} proračunska vrednost sile smicanja

$V_{bw,Rd}$ doprinos rebra nosivosti na izbočavanje smicanjem

U suprotnom, kada je $\bar{\eta}_3 > 0.5$, neophodna je kontrola izbočavanja usled normalnih i smičućih napona. Tada je neophodno da bude zadovoljen sledeći uslov:

$$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) (2\bar{\eta}_3 - 1)^2 \leq 1 \quad \text{za } \bar{\eta}_1 \geq \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}$$

$$\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} \quad \bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}}$$

M_{Ed} proračunska vrednost momenta savijanja

$M_{f,Rd}$ proračunski plastični moment nosivosti poprečnog preseka koga čine samo efektivne površine nožica

$M_{pl,Rd}$ proračunski plastični moment nosivosti poprečnog preseka koga čine efektivne površine nožica i citavo rebro, bez obzira na njegovu klasu

Plastični moment nosivosti $M_{f,Rd}$ može da se usvoji kao proizvod granice razvlačenja, efektivne površine nožice koja ima najmanju vrednost $A_f f_y / \gamma_{m0}$ i rastojanja između težista nožica

Interakcija izbočavanja usled normalnog napona i poprečne sile

Ako je nosač izložen dejstvu koncentrisane poprečne sile F_{Ed} koja deluje na pritisnutoj nožici i dejstvu momenta savijanja M_{Ed} i aksijalne sile N_{Ed} pored pojedinačnih kontrola nosivosti na izbočavanje treba da se proveriti i interakcija:

$$\eta_2 + 0.8\eta_1 \leq 1.4$$

$$\eta_1 = \frac{N_{Ed}}{\frac{f_y A_{eff}}{\gamma_{m0}}} + \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{y,N}}{\frac{f_y W_{y,eff}}{\gamma_{m0}}} + \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{z,N}}{\frac{f_y W_{z,eff}}{\gamma_{m0}}}$$

$$\eta_2 = \frac{F_{Ed}}{F_{Rd}}$$

Ako koncentrisana sila F_{Ed} deluje na zategnutoj nožici, vrši se samo kontrola nosivosti na izbočavanje usled lokalne sile i kontrola uporednog napona u rebro nosača

$$\sigma_{eq,Ed} = \sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + \sigma_{x,Ed} \sigma_{z,Ed} + \sigma_{z,Ed}^2 + 3\tau_{Ed}^2} \leq f_y / \gamma_{m0}$$

Ukrućenja

Primenom ukrućenja povećava se nosivost na izbočavanje.

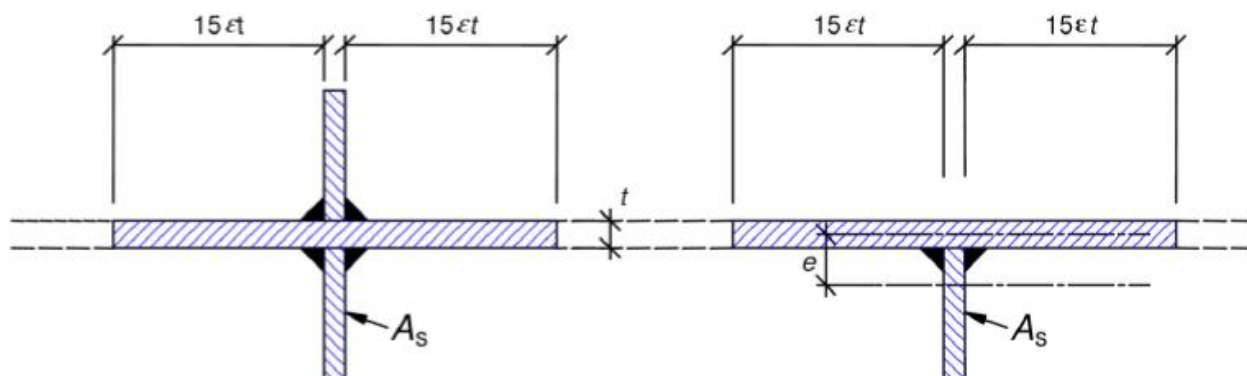
Ukrućenja se prema svom položaju mogu podeliti na:

- podužna (ili horizontalna);
- poprečna (ili vertikalna).

Prema načinu oblikovanja mogu da budu:

- otvorenog poprečnog preseka (ravan lim, L, T);
- zatvorenog poprečnog preseka.

Pri kontroli nosivosti ukrućenja usvaja se presek sa sadejstvujućim delom rebra nosača od $15\epsilon t$ sa svake strane ukrućenja.



Poprečna ukrućenja rebra

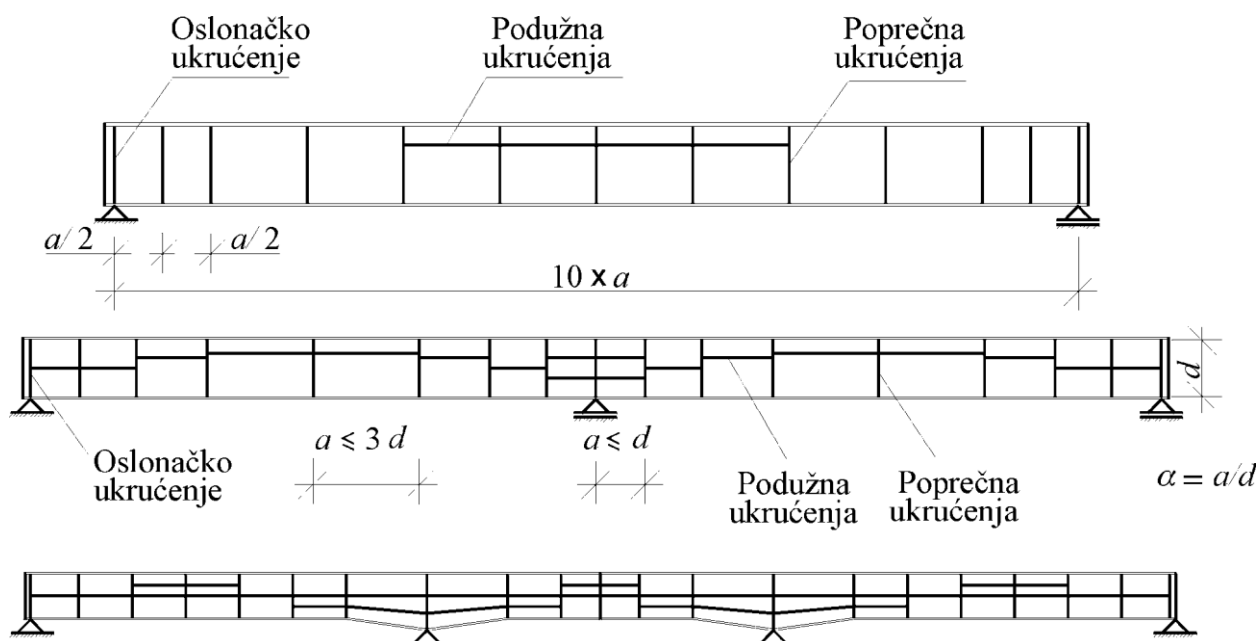
Povećavaju nosivost rebra na izbočavanje;

Obezbeđuju pravilno unošenje koncentrisanih sila i oslonačkih reakcija u rebro nosača;

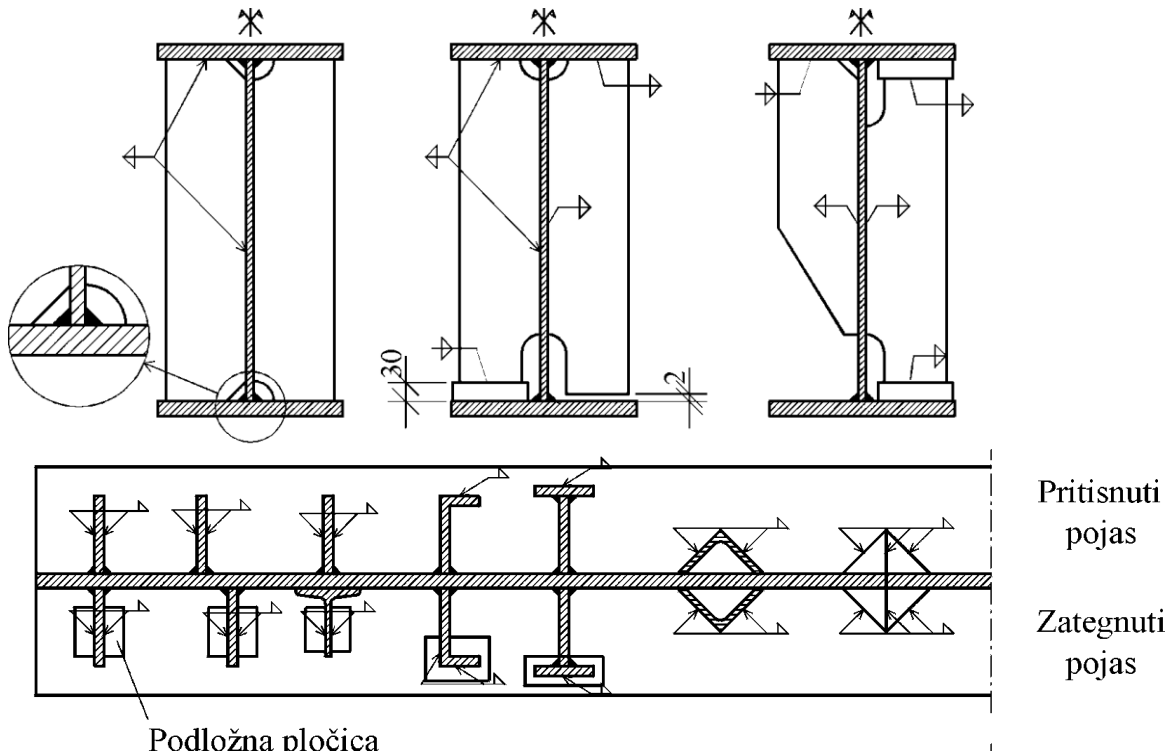
Mogu da budu:

- Oslonačka ukrućenja;
- Međuukrućenja;

Dispozicija ukrućenja na rebro nosača

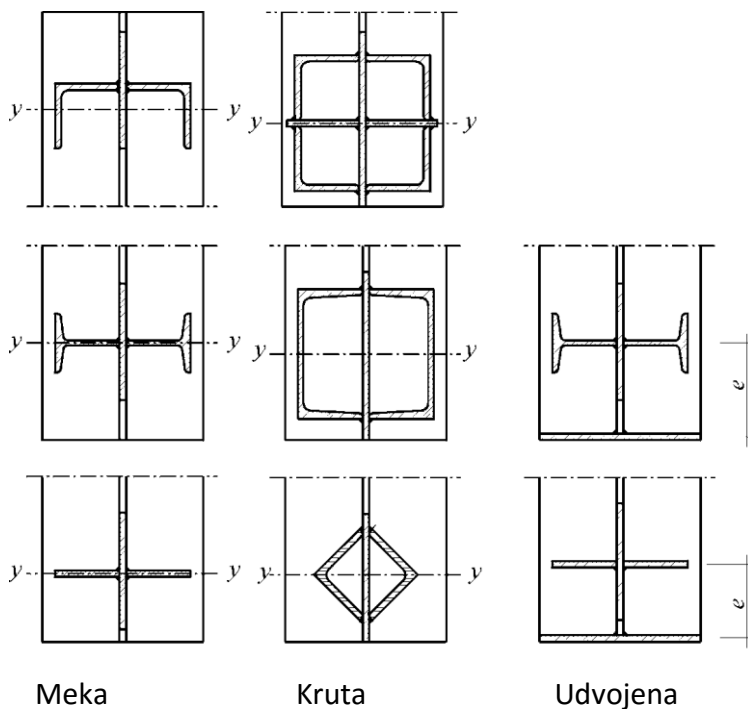


Oblikovanje poprečnih ukrutenja



Oslonačka ukrutenja

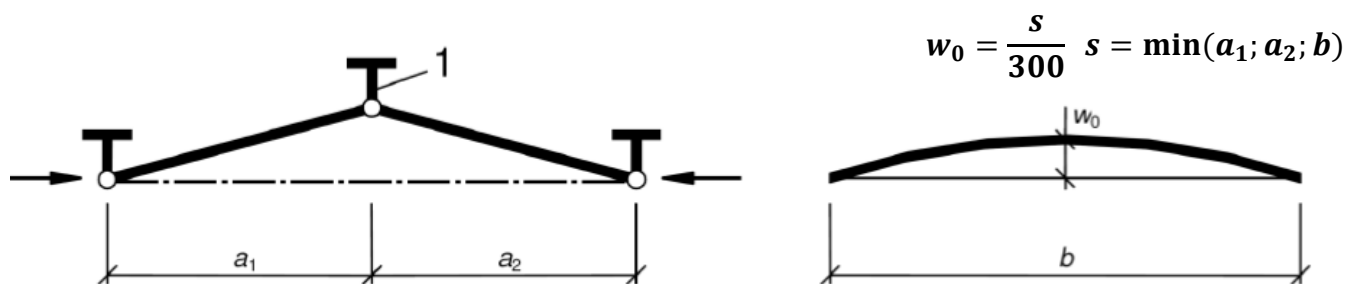
Osnovna uloga oslonackih ukrutenja je da prihvate reakciju oslonca i obezbede njeno pravilno unosenje u rebro nosaca. Pored toga, krajnja oslonacka ukrutenja treba da obezbede i ankerisanje horizontalne komponente normalnog napona iz poslednjeg zategnutog polja σ_h koja nastaje usled izbočavanja smicanjem. Pod pojmom krajnja oslonacka ukrutenja podrazumevaju se oslonacka ukrutenja koja se nalaze na krajevima nosaca. Ovo se ne odnosi na srednje oslonce kontinualnih greda. Po svojoj konstrukciji, krajnja oslonacka ukrutenja mogu da budu **kruta** i **meka**.



Nosivost oslonackih ukrutenja na izvijanje izvan ravni nosača određuje se na osnovu dužine izvijanja $L_{cr} = 0,75h_w$, koristeći krivu izvijanja c .

Ukoliko postoji ekscentricitet ukrutenja u odnosu na srednju ravan rebra on se mora uzeti u obzir!

Proračun krutosti poprečnih ukrucenja



Primenom elasticne analize drugog reda treba dokazati da:

- maksimalni napon u ukrucenju nije veci od f_y/γ_{m0}
- dodatni ugib ukrucenja nije veci od $b/300$

Može se smatrati da su oba kriterijuma zadovoljena ako moment inercije poprečnih ukrucenja I_{sl} zadovoljava uslov :

$$I_{sl} > \frac{\sigma_m}{E} \left(\frac{b}{\pi}\right)^4 \left(1 - w_0 \frac{300}{b} u\right) \quad \sigma_m = \frac{\sigma_{cr,c}}{\sigma_{cr,p}} \frac{N_{Ed}}{b} \left(\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2}\right)$$

$$u = \frac{\pi^2 E e_{max}}{f_y 300 b / \gamma_{m1}} \geq 1$$

e_{max} maksimalno rastojanje od krajnjeg vlakna ukrucenja do njegovog tezista.

N_{Ed} maksimalna sila pritiska u susjednim poljima, ali ne manja od maksimalnog napona pritiska pomnoženog polovinom efektivne površine pritisnute zone polja, uključujući i ukrucenja.

$\sigma_{cr,c}$ i $\sigma_{cr,p}$ su kritični naponi za čisto izvijanje i izbočavanje.

Zahtevane krutosti poprečnog ukrucenja

Kada se ne sprovodi preciznija analiza sledeći uslov treba da bude zadovoljen:

$$\frac{I_T}{I_P} \geq 5.3 \frac{f_y}{E} \quad \text{ili} \quad \sigma_{cr} \geq \theta f_y \quad \theta = 2$$

I_T Sen Venanova torziona konstanta za ukrucenje.

I_P polarni moment inercije ukrucenja oko ivice spojene sa limom.

σ_{cr} kritičan napon torzionog izvijanja ukrucenja.

Pored toga, **zbog izbočavanja smicanjem**, efektivni presek međuukrucenja koje deluje kao kruti oslonac za polje rebra treba da ima minimalan moment inercije I_{st} :

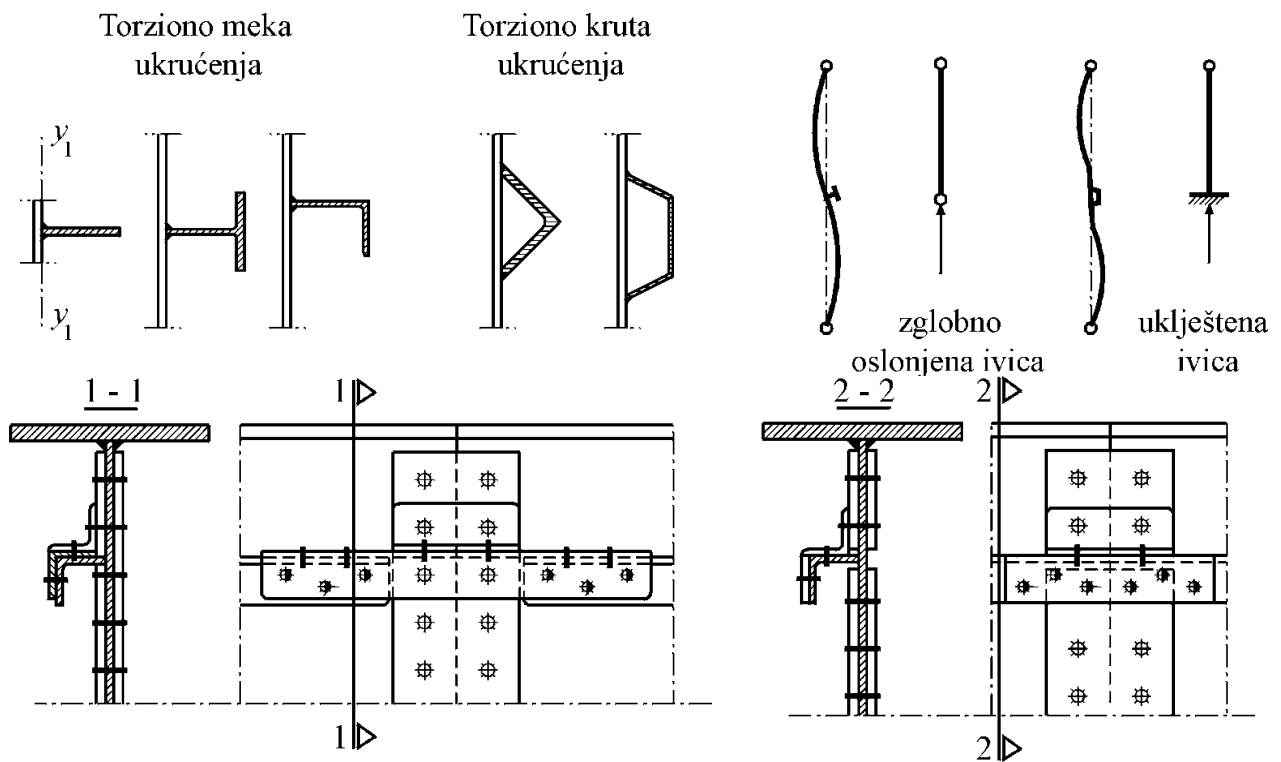
$$I_{st} \geq 1.5 \frac{h_w^3 t_w^3}{a^2} \quad \text{za} \quad \frac{a}{h_w} < \sqrt{2}$$

$$I_{st} \geq 0.75 h_w t_w^3 \quad \text{za} \quad \frac{a}{h_w} \geq \sqrt{2}$$

Podužna ukrućenja

Podužna ukrućenja po pravilu treba da budu kontinuirana na mestima ukrstavnja sa poprečnim ukrućenjima, i u tom slučaju su sposobna da prihvataju podužne normalne napone i učestvuju u nosivosti poprečnog preseka. Tada se podužna ukrućenja uzimaju u obzir pri globalnoj analizi napona i treba da se provere na dejstvo normalnih napona koji nastaju usled naprezanja citavog preseka, a deluju na mestima ukrućenja. Kontrola nosivosti kontinualnih podužnih ukrućenja treba da se sprovede u sklopu kontrole nosivosti na izbocavanje usled normalnih napona pritiska.

Diskontinualna podužna ukrućenja, odnosno podužna ukrućenja koja ne prolaze kroz otvore na poprečnim ukrućenjima, ili nisu spojena sa bilo kojom stranom poprečnog ukrućenja mogu da se koriste samo na rebrima nosaca (nisu dozvoljena kod nožica) i treba da se zanemare pri globalnoj analizi i proračunu napona. Ona se razmatraju samo pri proračunu efektivne širine pojedinačnih rebra i proračunu elastičnog kritičnog napona. Pri tome treba voditi računa da udaljenost kraja podužnog ukrućenja u odnosu na poprečno ukrućenje ne bude velika kako bi se izbeglo formiranje plastičnog mehanizma loma. Kontinuiranje podužnih ukrućenja uvek mora da bude ostvareno na mestima monraznih nastavaka kako bi se obezbedili granicni uslovi u pogledu izbocavanja delimičnih polja.



Zahtevana krutost podužnih ukrućenja treba da bude kao u slučaju poprečnih ukrućenja!

Rešetkasti nosači

Osnovne karakteristike

- Sastoje se od međusobno povezanih aksijalno opterećenih štapova;
- Moment savijanja prenosi se naprežanim pojasnim štapovima, a uticaj transverzalnih sila preuzimaju štapovi ispune;
- Bolje iskorišćenje materijala (konstantna raspodela napona)
- Manja težina u odnosu na pune nosače;
- Mogućnost premošćavanja velikih raspona;
- Transparentnost i mogućnost provodjenja instalacija;
- Komplikovanija izrada u odnosu na pune nosače;
- Veća jedinična cena;

Primena rešetkastih nosača

- **U zgradarstvu** (rožnjače, krovni nosači, podni nosači i podvlake, kranski nosači većih raspona, spregovi i ukrućenja za prijem uticaja od vetra...)
- **U mostogradnji** (glavni nosači, poprečni nosači i ukrućenja, spregovi za prijem vetra spregovi za kočenje i bočne udare,...)

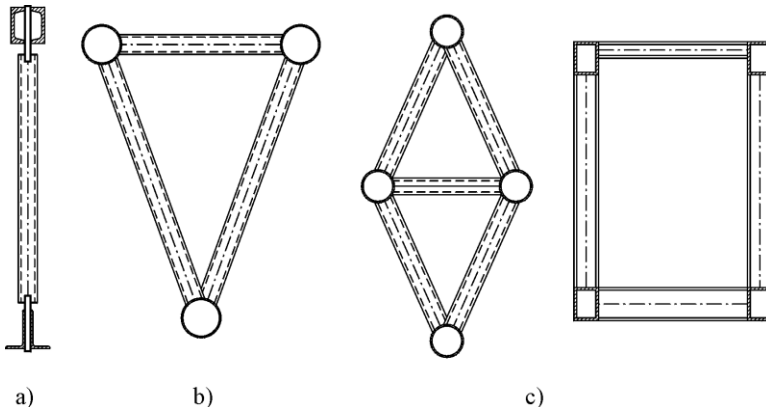
69. Podela rešetkastih nosača

Podela rešetkastih nosača

- Prema broju pojaseva;
- Prema prostornom obliku;
- Prema intenzitetu opterećenja;
- Prema oblikovanju čvorova.

Podela prema broju pojaseva

- Dvopojasni;
- Višepojasni (tropojasni, četvoropojasni,...)

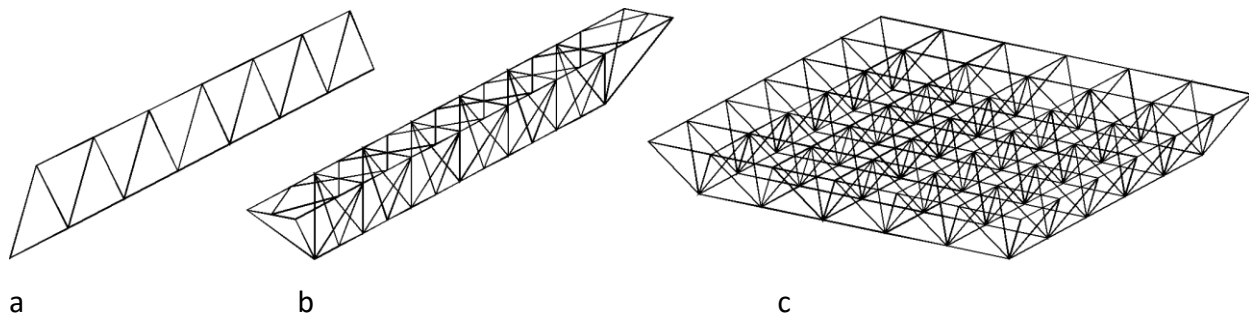


Podela prema prostornom obliku

Ravanski rešetkasti nosači – sistemske linije svih štapova leže u jednoj ravni (slika a)

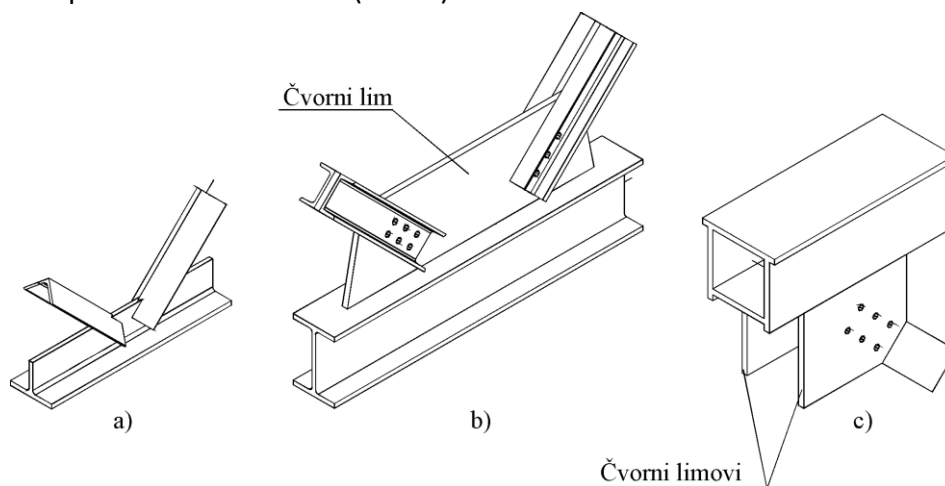
Prostorni rešetkasti nosači – sistemske linije štapova ne leže u jednoj ravni već formiraju prostornu strukturu. Sa statickog stanovišta mogu se podeliti na :

- **linijski** – imaju jasno izrazen pravac pružanja, odnosno jednu dimenziju koja je dominantna u odnosu na druge dve (slika b)
- **površinski** – predstavljaju diskretizaciju ploča, odnosno ljuski i u globalnom smislu ponasaju se slično površinskim nosacima. Kao i kod "punih" površinskih nosaca i kod rešetkastih nosaca dve dimenzije su dominantne u odnosu na treću – visinu rešetkastog nosaca. Momenti savijanja, koji se kod ploča javljaju u dva pravca, prihvataju se, vezom aksijalno napregnutih pojasnih štapova, dok se smicuce sile i kod ovakvih nosaca prihvataju štapovi ispune. (slika c)



Podela prema intenzitetu opterećenja

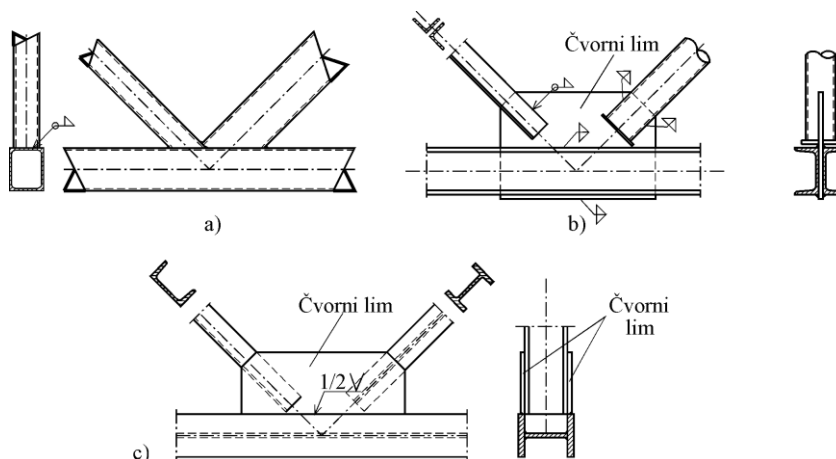
- **Laki** rešetkasti nosači – koriste se uglavnom u zgradarstvu, kada su opterećenja mirna i umerenog intenziteta. (slika a)
- **Srednje teški** rešetkasti nosači – se primenjuju za veće raspone i opterećenja značajnog intenziteta, i to uglavnom kao krovni i podni nosaci, ili kao kranski nosaci u industrijskim objektima. (slika b)
- **Teški** rešetkasti nosači – se po pravilu primenjuju kod izuzetno velikih raspona i opterećenja. Najcesce je to slucaj sa glavnim mostovskim nosacima, koji se izvode kao rešetkasti nosaci za raspone od 30 do 100m. (slika c)



Podela prema načinu oblikovanja čvorova

Rešetkasti nosači **bez čvornih limova** – veza u cvoru se ostvaruje direktnim vezivanjem stapova ispune za pojasne stapove, bilo zavrtnjima ili zavarivanjem. Bez cvornog lima se najcesce izradjuju laki rešetkasti nosaci, ali se takodje mogu konstruisati i srednje teske nosaci od hladno oblikovanih profila zatvorenog (kruznog ili kvadratnog) poprecnog preseka (slika a).

Rešetkasti nosači **sa čvornim limovima** – su nosaci kod kojih se stapovi ispune za pojasne stapove prikljucuju pomocu posebnih, dodatnih limova, koji se nazivaju cvorni limovi. Rešetkasti nosaci kod kojih se za prikljucak koristi jedan cvorni lim nazivaju se **jednozidni rešetkasti nosaci** i primenjuju se za lake i srednje teske nosace u zgradarstvu (slika b). Kada se veza ostvaruje preko dva cvorna lima koji leze u dve paralelne ravni, takvi rešetkasti nosaci se nazivaju **dvozdni rešetkasti nosaci** (slika c).



70. Osnovna pravila za konstruisanje rešetkastih nosača

Osnovna pravila za konstruisanje

1. Opterećenje treba da deluje u čvorovima;
2. Dužina pritisnutih štapova treba da bude što manja;
3. Štapovi treba da budu pravi izmedju čvorova;
4. Sistemne linije štapova treba da se seku u čvoru (centrisani štapovi)
5. Uglovi štapova ispune ne treba da budu suviše oštri (ne manji od 30°);
6. Montažni nastavci pojasnih štapova izvode se izvan čvorova (u neposrednoj blizini) na strani slabije opterećenog štapa);

71. Oblici rešetkastih nosača i oblici poprečnih preseka štapova

Oblik rešetkastog nosača zavisi od oblika pojasnih štapova;

Po svom obliku rešetkasti nosači mogu da budu:

- Rešetkasti nosači **sa paralelnim pojasom**;
- Rešetkasti nosači **sa gornjim pojasom u nagibu** (uglavnom prati nagib krovnih ravni)
- Rešetkasti nosači **sa parabolničnim pojasom** ili pojasevima;

Rešetkasti nosači sa paralelnim pojasevima

Sistemna visina rešetkastih nosača (h) se kreće:

- od $L/10$ do $L/15$ za lake rešetkaste nosače;
- od $L/7$ do $L/9$ za teške rešetkaste nosače;

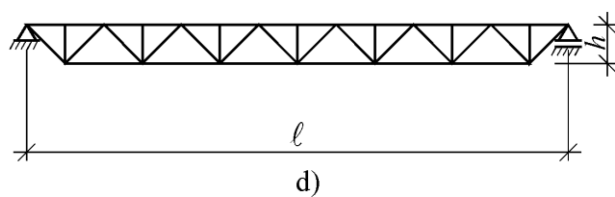
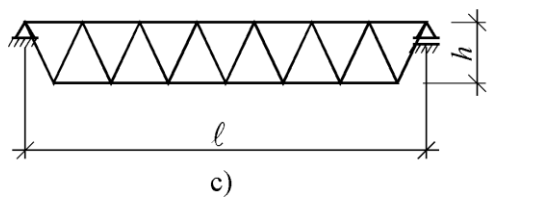
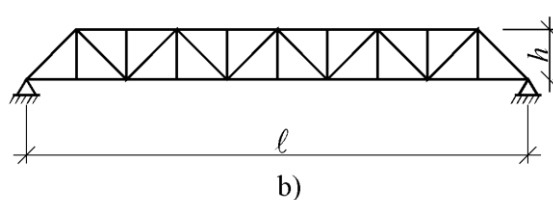
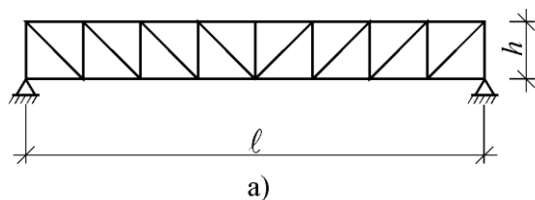
Za kontinualne nosače mogu se usvojiti manje visine.

Rasponi (L) mogu biti:

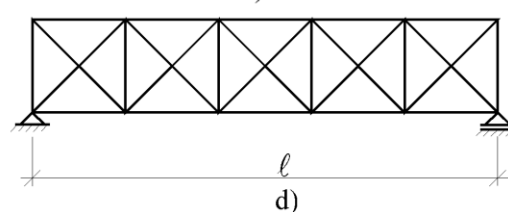
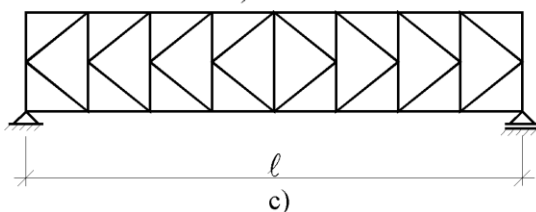
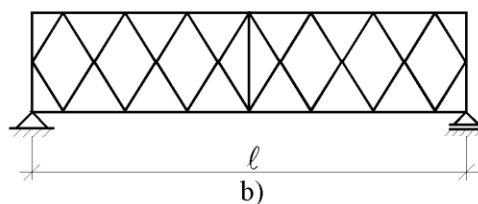
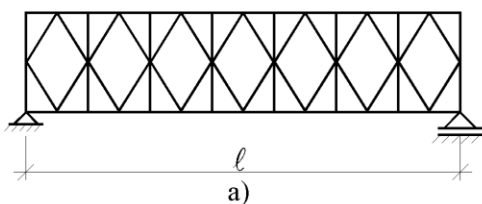
- od 12 do 18 m za rožnjače i podne nosače,
- od 30 do 100 m pa i više (npr. u mostogradnji)

Oblici rešetkastih nosača sa paralelnim pojasevima

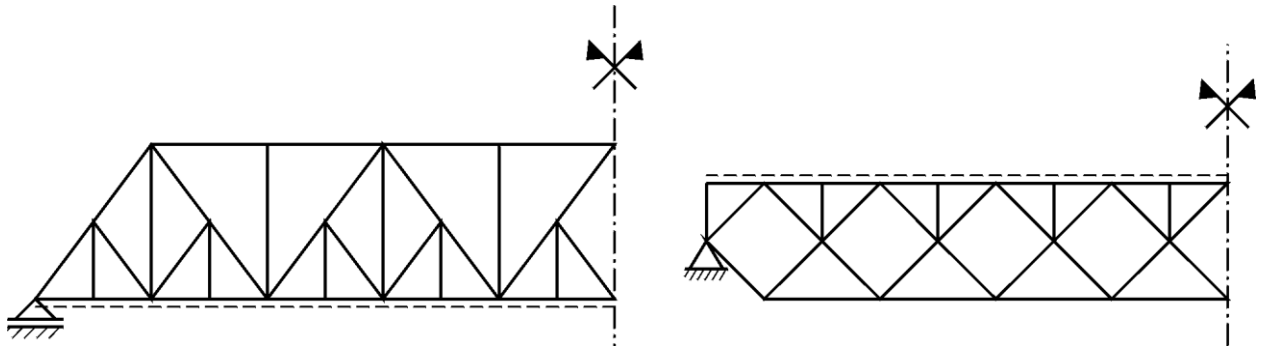
$$h \in (l/7 \text{ — } l/15)$$



Oblici ispune kod spregova



Rešetkasti nosači sa paralelnim pojasovima i sekundarnom ispunom



Primenjuju se kod mostovskih nosaca velikih raspona.

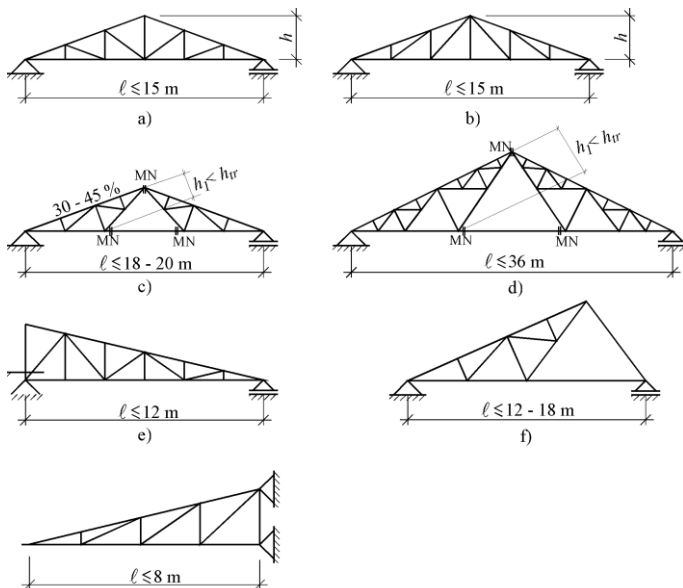
Rešetkasti nosači sa gornjim pojasom u nagibu

Uglavnom se kriste kao krovni nosači, a nagibi gornjeg pojasa prate nagib krovne ravni.

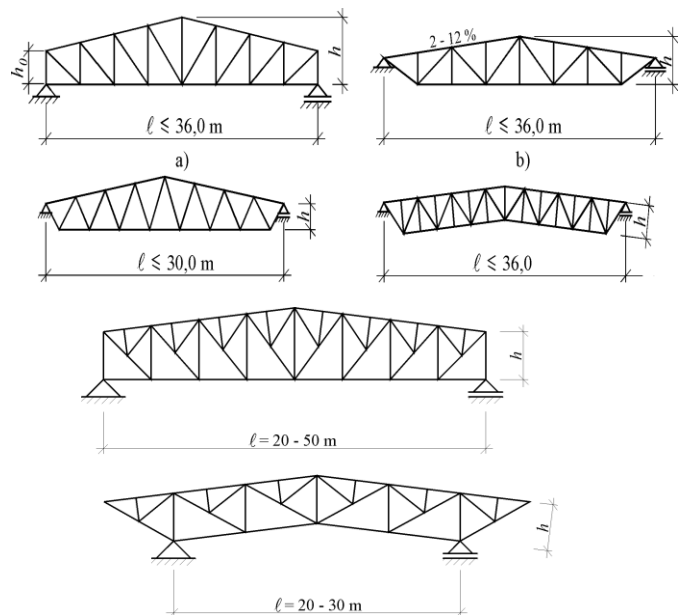
Razlikuju se dva osnovna oblika:

- trougaoni rešetkasti nosači.
- trapezasti ili poligonalni rešetkasti nosači.

Trougaoni rešetkasti nosači



Trapezasti – poligonalni rešetkasti nosači



Oblici poprečnih preseka štapova

Različiti oblici poprečnih preseka primenjuju se za:

- Pojasne štapove,
- Štapove ispunne,
- Zategnute štapove,
- Pritisnute štapove. Izbor oblika poprečnih preseka je jako veliki

Treba voditi računa da izbor oblika pojasnih štaova i štapova ispunne bude u skladu sa predviđenim oblikovanjem čvornog lima!

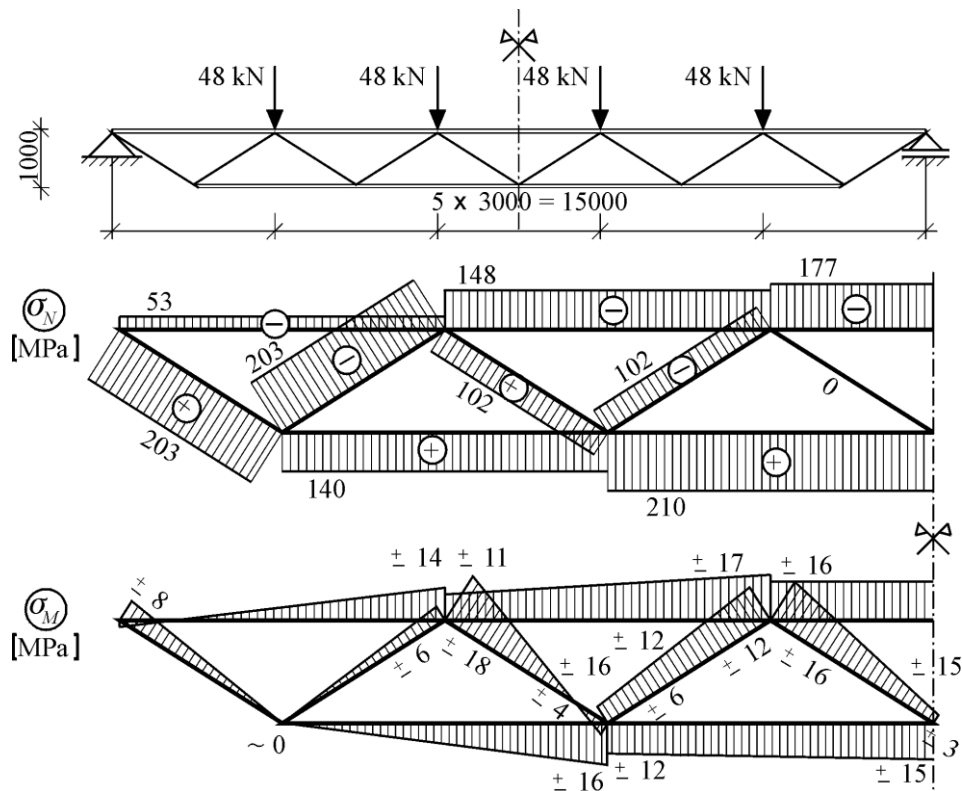
Proračun rešetkatih nosača

Prilikom proračuna uticaja u rešetkastim nosačima pretpostavlja se:

- Da su veze u čvorovima idealno zglobne,
- Da sile deluju isključivo u čvorovima nosača,
- Da su štapovi između čvorova pravi i da su centrisani u čvoru.

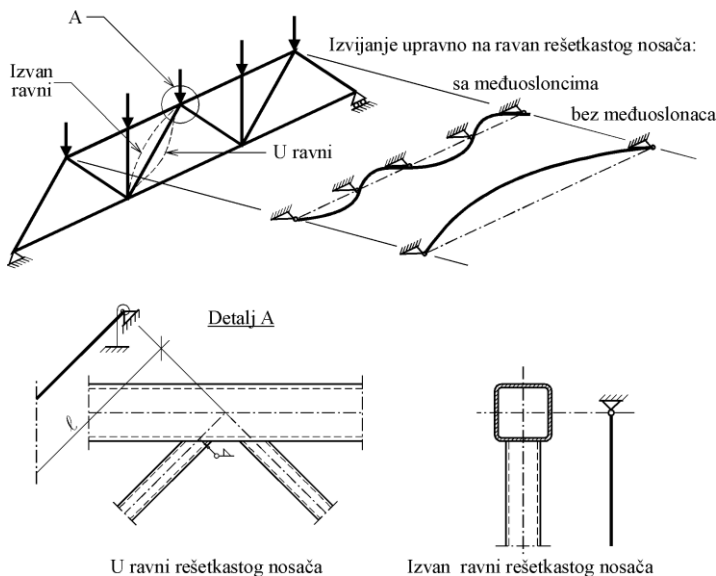
Primarna i sekundarna naprezanja kod rešetkastih nosača

Ovakva odstupanja od idealizovanog proračunskog modela, bilo da je rec o krutim vezama u cvorovima ili ekscentricnom vezivanju, dovode do pojave sekundarnih uticaja. Naime, u stapovima rešetkastih nosača se kao dominantna, odnosno primarna naprezanja javljaju normalni naponi izazvani dejstvom aksijalnih sila (σ_N), dok se uticaji nastali usled momenata savijanja (σ_M) smatraju sekundarnim. Međutim, može se pokazati da uticaji usled momenata savijanja u krutim uglovima mogu da se zanemare. Kao potvrda ove činjenice može da posluži primer sa slike, na kojem se uočava da su normalni naponi usled aksijalnih sila i preko 10 puta veći od sekundarnih napona izazvanih savijanjem. Momenti savijanja u cvorovima rešetkastog nosača određeni su uz pretpostavku o idealno krutim vezama. Kod većine veza izvedenih pomoću zavrtnjeva dolazi do izvesne relativne rotacije, usled ponistavanja zazora između vrata zavrtnja i rupe deformacije priključnih elemenata, pa su usled polukrutog ponasanja ovakvih veza momenti savijanja, a samim tim i sekundarni naponi, još manji i mogu da se zanemare. (pretpostavljam da ovo nema veze sa pitanjem ali mora da se zna).



72. Dužine izvijanja štapova rešetkastih nosača

Određivanje dužine izvijanja pritisnutih štapova



– Posebno se analiziraju **pojasni štapovi i štapovi ispune** (dijagonale i vertikale), kao i izvijanje **u ravni** rešetkastog nosača i **izvan ravni** rešetkastog nosača;

– **Sistemna dužina** u ravni rešetkastog nosača jednaka je rastojanju između čvorova rešetkastog nosača, a izvan ravni je jednaka osovinskom rastojanju između tačaka bočnog pridržavanja;

Dužine izvijanja pojaseva

- **Generalno**, dužina izvijanja pojasnog elementa **u ravni i izvan ravni** jednaka je njegovoj **sistemnoj dužini L** ($\beta = 1$)!
- Za pojase štاپove od I ili H preseka, može se usvojiti da je dužina izvijanja **u ravni** jednaka **$0,9L$** ($\beta = 0,9$), a **izvan ravni** jednaka je sistemnoj dužini **L** ($\beta = 1$)!
- Za pojase štاپove od **šupljih profila**, dužina izvijanja **u ravni i izvan ravni** jednaka je **$0,9L$** ($\beta = 0,9$), gde je **L** sistemna dužina!
- **Za izvijanje izvan ravni sistemna dužina jednaka je rastojanju tačaka bočnog pridržavanja!**

Dužine izvijanja štاپova ispune

- Generalno, dužina izvijanja štاپova ispune **izvan ravni** jednaka je sistemnoj dužini **L** ;
- Dužina izvijanja **u ravni** rešetkastog nosača jednaka je **$0,9L$** **izuzev** u slučaju štاپova od **ugaonika**;
- Kod rešetkastih nosača od **šupljih profila** kod kojih je odnos širine pojasa (b_0) i širine štاپa ispune (b_i) manji od 0,6, dužina izvijanja **u ravni i izvan ravni** je **$0,75L$** ;

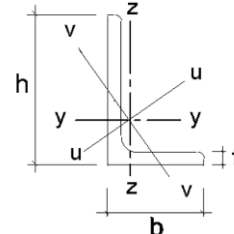
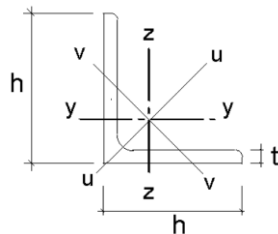
Dužine izvijanja štاپova ispune od L profila

Za štاپove ispune od ugaonika (L profila), kada veza sa pojasom poseduje odredjen stepen uklještenja (zavarena ili sa bar 2 zavrtnja) može se zanemariti ekscentricitet, a ugaonik se proračunava kao centrično pritisnut element sa ekvivalentnom relativnom vitkošću:

$$\bar{\lambda}_{eff,v} = 0.35 + 0.7\bar{\lambda}_v$$

$$\bar{\lambda}_{eff,y} = 0.50 + 0.7\bar{\lambda}_y$$

$$\bar{\lambda}_{eff,z} = 0.50 + 0.7\bar{\lambda}_z$$



U slučaju veze sa samo jednim zavrtnjem ekscentričnost mora da se uzme u obzir, a dužina izvijanja je jednaka sistemnoj dužini L ;

| | |
|-----|---|
| 73. | Proračun i konstruisanje čvorova kod jednozidnih rešetkastih nosača |
|-----|---|

| | |
|-----|--|
| 74. | Proračun veze u čvoru jednozidnog rešetkastog nosača |
|-----|--|

Proračun i oblikovanje detalja čvorova zavisi od:

- tipa rešetkastog nosača (sa čvornim limom ili bez njega),
- oblika poprečnih preseka pojasnih štاپova i štاپova ispune;
- broja čvornih limova (kod čvorova sa čvornim limom);
- vrste spojnih sredstava (zavrtnjevi ili zavarivanje);

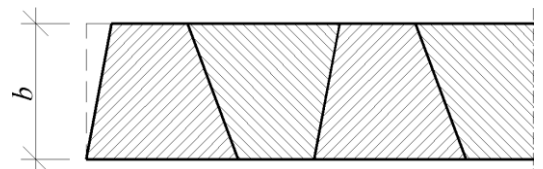
Rešetkasti nosači sa čvornim limom

Čvorni limovi se oblikuju tako da:

- imaju minimalne dimenzije i
- da im je oblik jednostavan za izradu (po mogućstvu da imaju dve paralelne ivice).

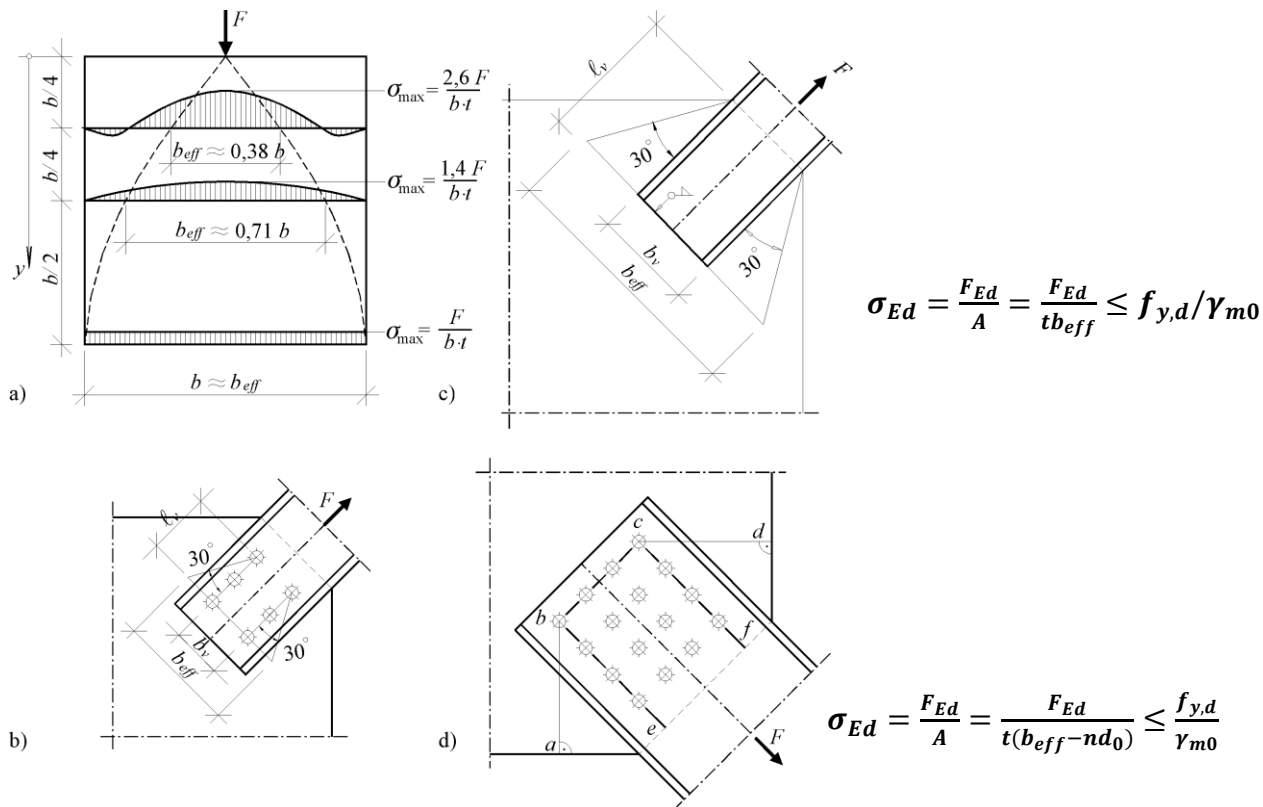
Sto su veće dimenzije cvornog lima, veća je i krutost cvora, pa se zbog toga povećavaju sekundarni uticaji usled momenata savijanja u krutim uglovima. Dimenzije cvornog lima bitno zavise od uglova između štاپova. Isovise ostri uglovi (manji od 30°) prouzrokuju znatno veće dimenzije cvornih limova, pa ih treba izbegavati.

Prilikom oblikovanja cvornih limova treba teziti da bar dve ivice budu paralelne kako bi citava serija cvornih limova mogla da se izreže iz jedne celicne trake uz minimalan otpad. Izrada ovakvih cvornih limova je znatno jednostavnija i jeftinija.



Cvorni lima ima dvojaku funkciju: da omogući uvođenje sila iz stapova ispune u cvor resetkastog nosaca i da obezbedi ravnotežu cvora. Zbog toga se u njemu javlja složeno – dvoosno naponsko stanje, koje se ne može jednostavno analitički definisati. S obzirom na dvojaku funkciju cvornog lima, njegova debljina treba da se odredi na osnovu dva kriterijuma, tj do loma čvornog lima može da dodje **lokalno** u zoni unošenja sila iz štapova ispune, ili **globalno** po čitavoj visini čvornog lima, na mestu teorijskog čvora.

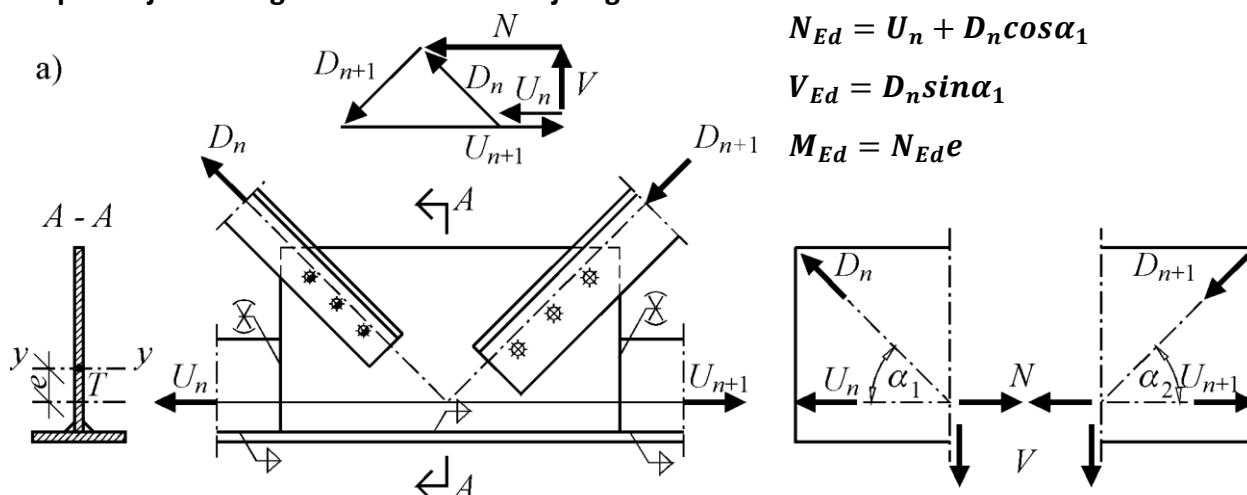
Realan raspored normalnih napona (slika a) u zoni uvođenja sile u cvorni lima, određen na osnovu neke precizne analize, dozvoljava primenu uprosćenog proračunskog modela, koji podrazumeva linearno prostiranje napona pod uglom od 30°. Prema ovom modelu dijagram normalnih napona je konstantan na efektivnoj sirini $b_{eff} = b_v + 2l_v tg30^\circ$ (slika b i c).



Kod širokih zategnutih stapova ispune, koji za cvorni lim vezani sa nekoliko linija zavrtnejeva (slika d), lom cvornog lima može da nastupi po izlomljenim neto preseccim a-b-c-d, ili, ko kratkih veza, e-b-c-f. Tj. treba proveriti i cepanje bloka.

$$F_{Ed} \leq V_{eff,1,Rd}$$

Naprezanja čvornog lima na mestu teorijskog čvora



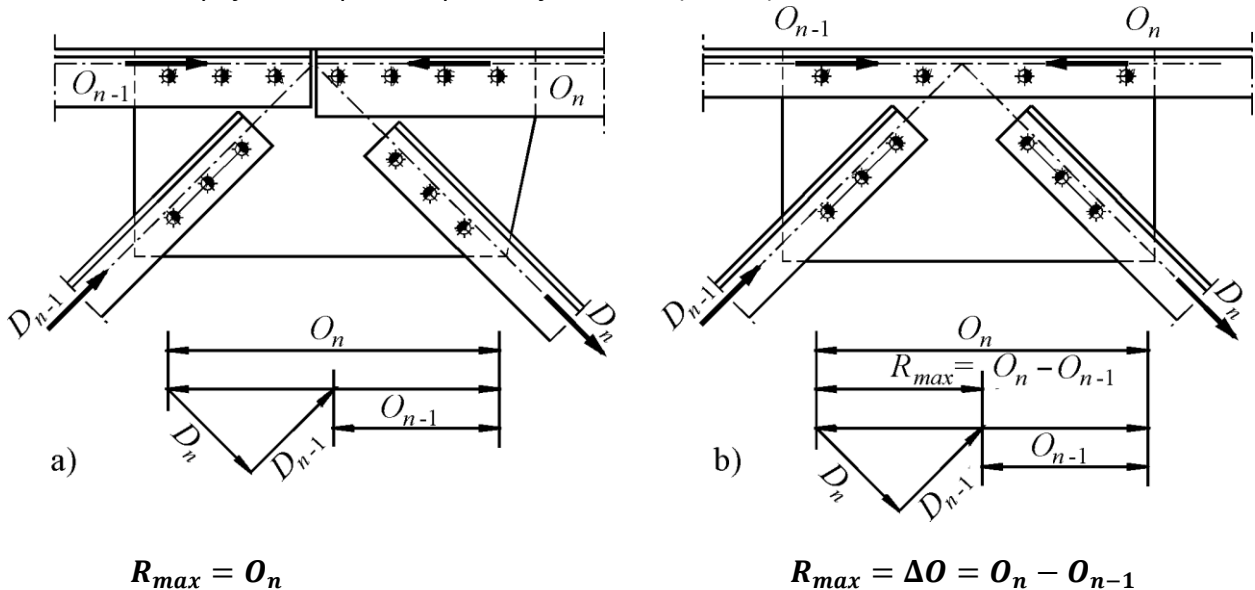
Poprečni presek koga čine zajeno pojasni štap i čvorni lim treba da se preveri na dejstvo presečnih sila N_{Ed} , M_{Ed} i V_{Ed} .

e rastojanje izmedju tezista pojasnih stapova i tezista preseka A-A

Veza čvornog lima sa pojasnim štapovima

Veza čvornog lima sa pojasnim štapovima se uglavnom izvodi zavarivanjem ili, pomoću mehaničkih sredstava. Pri proračunu ove veze, bilo da je ona ostvarena zavarivanjem ili mehaničkim spojnim sredstvima, postoje dva sustinski različita slučaja:

- Kada se pojasni stapovi prekidaju u čvoru (slika a)
- Kada se pojasni stapovi ne prekidaju u čvoru (slika b)

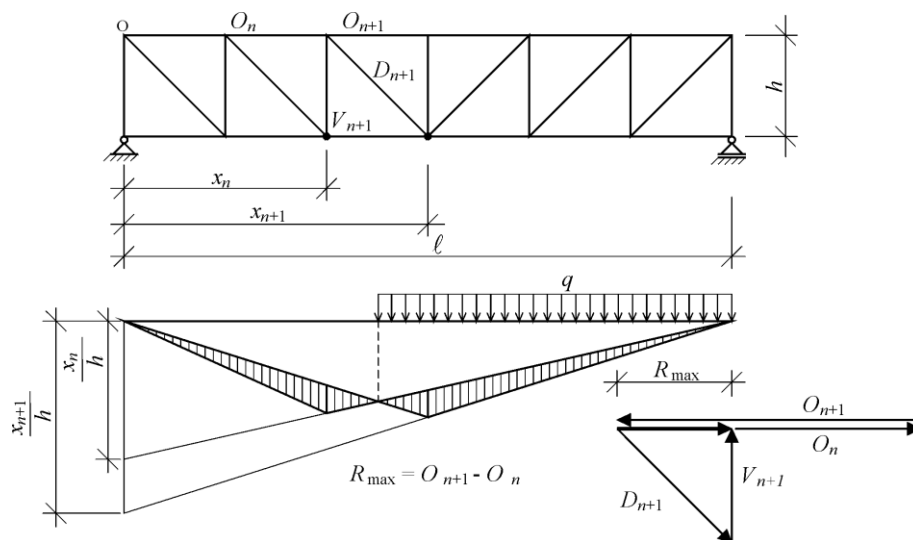


U savremenim čeličnim konstrukcijama prekidanje pojasnih štapova u čvoru nije uobičajeno, a veza čvornog lima sa pojasnim štapovima se, po pravilu, ostvaruje zavarivanjem!

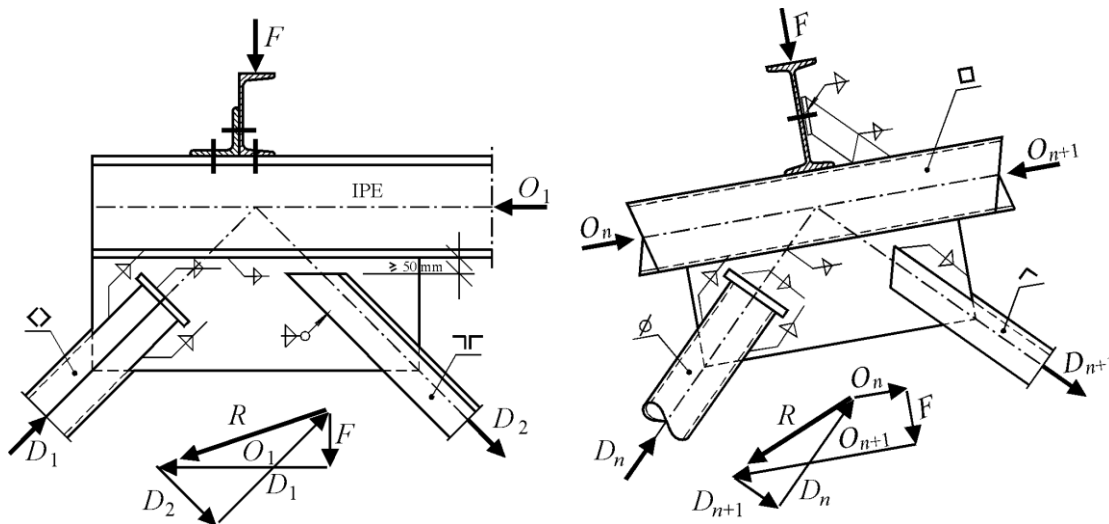
Odredjivanje rezultante štapova ispune u čvoru u slučaju pokretnog opterećenja

Kod resetkastih nosaca koji su izloženi dejstvu pokretnog opterećenja, kao što su mostovski ili kranski nosaci, rezultantu treba odrediti na osnovu uticajne linije za razliku sila. Vrednost maksimalne rezultante može da se odredi i približno prema sledecem izrazu :

$$R_{max} = 1.2 - 1.5(\max O_{n+1} - \max O_n)$$



Ukoliko u čvoru deluje i spoljasje opterećenje u vidu koncentrisane sile, vezu čvornog lima sa pojasnim štapovima treba dimenzionisati i za dejstvo ove sile. Na slici su prikazana dva karakteristična čvora u kojima deluje i spoljasje koncentrisana sila F . Sila R prema kojoj se dimenzionise veza čvornog lima može da se odredi na osnovu plana sila, kao vektorski zbir rezultante štapova ispune i spoljasje sile F . Treba napomenuti da ova sila R deluje u čvoru i da, ukoliko težište pojasnih štapova ne poklapa sa težištem veze, dolazi do ekscentriciteta, koji treba uzeti u obzir pri proračunu spojnih sredstava. Ovaj ekscentricitete prouzrokuje moment savijanja u vezi.



Primer proračuna veze u čvoru rešetkastog nosača

$f_{vw,d} \leq \frac{f_u \sqrt{3}}{\beta_w \gamma_{M2}}$

$\tau_{||} = \frac{\Delta O}{A_w} = \frac{\Delta O}{2 a l}$

$\sigma_M = \frac{M}{W_w} = \frac{\Delta O h / 2}{2 a l^2 / 16}$

$\sigma_F = \frac{F}{2 a l_{eff}}$

$\sigma_w = \sigma_M + \sigma_F$

$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \sigma_w / \sqrt{2}$

$\sigma_u = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{||}^2 + \tau_{\perp}^2)} \leq f_{vw,d}$

$\sigma_{\perp} \leq 0,9 \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}}$

$\tau_{||} = \frac{D_{n+1}}{A_{w,2}} = \frac{D_{n+1}}{4 a_2 l_2} \leq f_{vw,d}$

$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \sigma_w / \sqrt{2}$

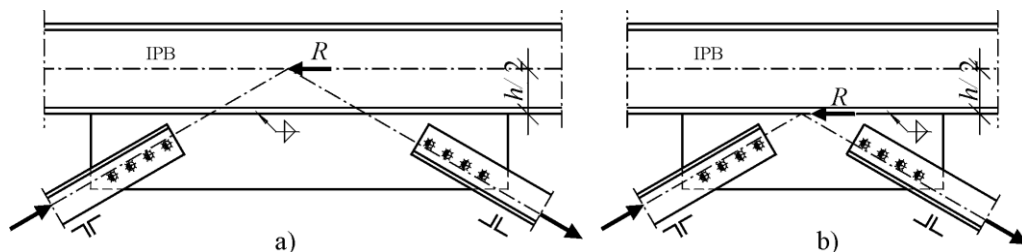
$\sigma_{\perp} \leq 0,9 \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}}$

$\tau_{||} = \frac{D_n}{A_{w,1}} = \frac{D_n}{2 a_1 l_1}$

$\sigma_w = \frac{D_n e}{W_{w,1}} = \frac{D_n e}{2 a_1 l_1^2 / 16}$

$\sigma_u = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{||}^2 + \tau_{\perp}^2)} \leq f_{vw,d}$

Ako su pojasni stapovi masivni, sto je uglavnom slucaj kod resetkastih nosaca ciji je pojas izlozen lokalnom savijanju (npr. kranski nosci), centricna veza stapova ispune prouzrokuje veoma dugacke cvorne limove koji su neracionalni i estetski neprihvatljivi (slika a), pa se u ovakvim slucajevima pribegava ekscentricnom prikljucku stapova ispune (slika b). Na taj nacin se znatno smanjuju dimenzije cvornog lima, kruti pojasni stap se dodatno opterecuje momentom ekscentriciteta $M_p = R e = R h / 2$, koji se javlja kao posledica ovakvog prikljucka, a savovi su oslobodjeni dejstva momenta ekscentriciteta.



Rešetkasti nosači od šupljih profila

Spadaju u rešetkaste nosače bez čvornog lima;

Veze u čvorovima se ostvaruju direktnim zavarivanjem;

Prednosti u odnosu na klasične rešetkaste nosače:

- manja težina,
- jeftinija antikorozijska zaštita (manji odnos O/A)
- povoljniji aerodinamički oblik u odnosu na otvorene preseke;
- velike mogućnosti konstruktorskog i arhitektonskog oblikovanja.

Izrađuju se od:

- šupljih profila **kružnog** poprečnog preseka (CHS);
- šupljih profila **kvadratnog** ili **pravougaonog** preseka (RHS).

Proračun veza prema poglavlju 7 EN 1993-1-8.

Polje primene poglavlja 7 EN 1993-1-8

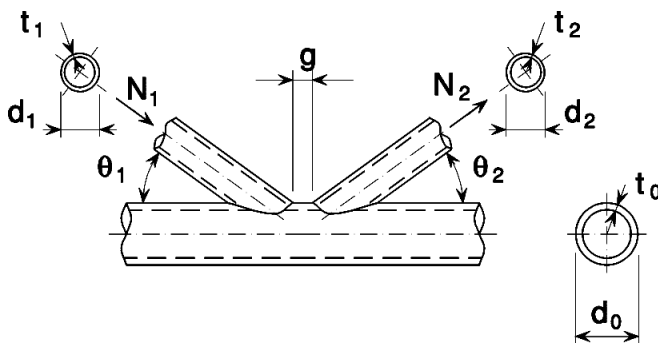
Pravila za proračun veza rešetkastih nosača od šupljih profila data u Evrokodu 3 važe za:

- vrućevaljane (EN10210) i hladnooblikovane (EN10219) šuplje profile izrađene od čelika sa granicom razvlačenja ne većom od 460 MPa; Kada je granica razvlačenja veća od 355 MPa proračunske nosivosti treba redukovati množenjem sa 0,9 (10%).
 - šuplje profile sa debljinom zida t ne manjom od 2,5 mm;
 - pojasne štapove sa debljinom zida t_0 ne većom od 25 mm;
 - rešetkaste nosače sa uglom između pojasa i elemenata ispune ne manjim od 30° (☞ ☞ 30°);
 - pritisnute štapove klase 1 ili 2 za slučaj čistog savijanja;
- Obuhvaćeni su različiti tipovi ravanskih i prostornih čvorova!

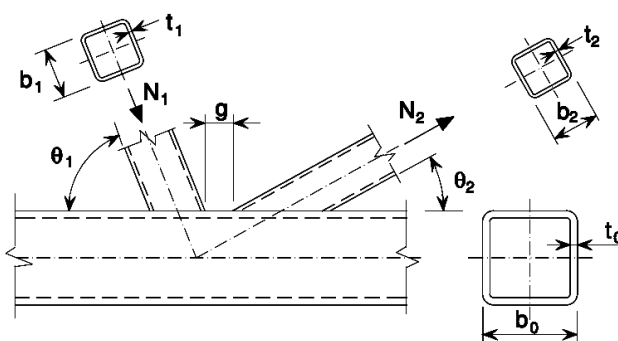
75. Proračun i konstruisanje rešetkastih nosača od šupljih profila kružnog poprečnog preseka

76. Proračun i konstruisanje rešetkastih nosača od šupljih profila pravougaonog poprečnog preseka

Kružni - CHS

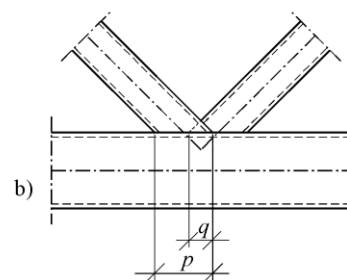
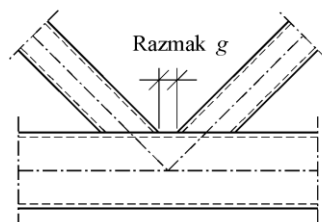
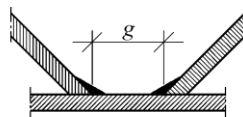


Pravougaoni - RHS



Prilikom direktnog zavarivanja stapova ispune za pojasne stapove, ukoliko se u cvoru vezuje bad dva stapa ispune, sto je najcesce slucaj, razlikuju se dva tipa cvorova:

- a) cvorovi sa razmakom
- b) cvorovi sa preklopom



Minimalni razmak izmedju dva stapa ispune na mestu veze proistice iz potrebe za ostvarenjem kvalitetnih savova i ne treba da je manji od zboru debljina zidova stapova ispune:

$$g \geq t_1 + t_2$$

Preklop se izrazava u procentima:

$$\lambda_{ov} = \frac{g}{p} 100 [\%]$$

i ne treba da bude veci od 25%

Tipovi ravanskih veza u čvorovima

| | | |
|----------------------|-----------------------|----------------------|
| <p>K veza</p> | <p>KT veza</p> | <p>N veza</p> |
| <p>T veza</p> | <p>X veza</p> | <p>Y veza</p> |

Tipovi prostornih čvorova

| | |
|-----------------------|--|
| <p>KK veza</p> | |
| <p>TT veza</p> | |
| <p>XX veza</p> | |

Geometrijski parametri dimenzija poprečnih preseka od šupljih profila

| T, Y i X veze | K i N veze | KT veze |
|--|--|--|
| za šuplje profile kružnog preseka | | |
| $\beta = \frac{d_1}{d_0}$ | $\beta = \frac{d_1 + d_2}{2d_0}$ | $\beta = \frac{d_1 + d_2 + d_3}{3d_0}$ |
| za šuplje profile pravougaonog preseka | | |
| $\beta = \frac{b_1}{b_0}$ | $\beta = \frac{b_1 + b_2 + h_1 + h_2}{4b_0}$ | $\beta = \frac{b_1 + b_2 + b_3 + h_1 + h_2 + h_3}{6b_0}$ |
| za šuplje profile pravougaonog (pojas) i kružnog preseka (ispuna) | | |
| $\beta = \frac{d_1}{b_0}$ | $\beta = \frac{d_1 + d_2}{2b_0}$ | $\beta = \frac{d_1 + d_2 + d_3}{3b_0}$ |
| β odnos srednjeg prečnika ili širine elementa ispune i širine pojasa γ odnos širine ili prečnika pojasa i dvostruke debljine zida $\gamma = \frac{d_0}{2t_0}$ (za CHS) $\gamma = \frac{b_0}{2t_0}$ (za RHS) | | |

Naponi u pojasnim štapovima

$$\sigma_{0,Ed} = \frac{N_{0,Ed}}{A_0} + \frac{M_{0,Ed}}{W_{el,0}} \quad n = (\sigma_{0,Ed}/f_{y,0})/\gamma_{m5}$$

$$\sigma_{p,Ed} = \frac{N_{p,Ed}}{A_0} + \frac{M_{0,Ed}}{W_{el,0}} \quad n_p = (\sigma_{p,Ed}/f_{y,0})/\gamma_{m5}$$

$$N_{p,Ed} = N_{0,Ed} - \sum_{i>0} N_{i,Ed} \cos \theta_i$$

Tipovi loma veza elemenata od šupljih profila

- Lom plastifikacijom površine pojasa** ili njegovog čitavog poprečnog preseka plastični lom površine pojasa ili plastični lom poprečnog preseka pojasa;
- Lom bočnih zidova pojasa** ili **lom rebra pojasa** usled plastifikacije, gnječenja ili nestabilnosti (ulubljenje ili izbočavanje bočnih zidova pojasa ili rebra pojasa) ispod pritisnutog elementa ispune;
- Lom smicanjem pojasa**;
- Lom usled kidanja (proboja) smicanjem** zida šupljeg profila pojasa (pojava prsline koja dovodi do odvajanja elementa ispune od pojasa);
- Lom elemenata ispune** sa redukovanom efektivnom širinom (prsline u šavovima ili u elementima ispune);
- Lom izbočavanjem** elemenata ispune ili šupljeg profila pojasnog elementa na mestu veze.

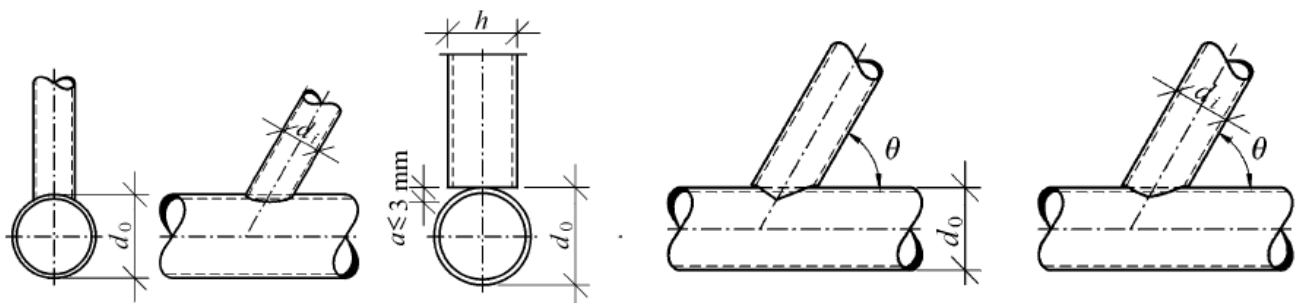
Tipovi loma kod CHS

| Oblik loma | Aksijalno opterećenje | Momenat savijanja |
|------------|-----------------------|-------------------|
| a | | |
| b | | |
| c | | |
| d | | |
| e | | |
| f | | |

Tipovi loma kod RHS

| Oblik loma | Aksijalno opterećenje | Momenat savijanja |
|------------|-----------------------|-------------------|
| a | | |
| b | | |
| c | | |
| d | | |
| e | | |
| f | | |

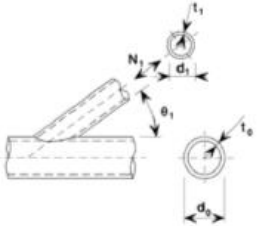
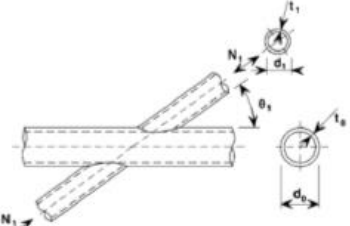
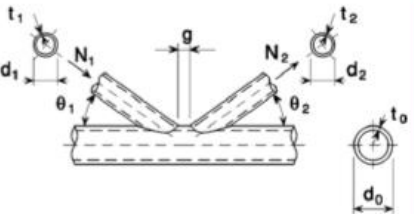
Rešetkasti nosači od šupljih profila kružnog poprečnog preseka (CHS)



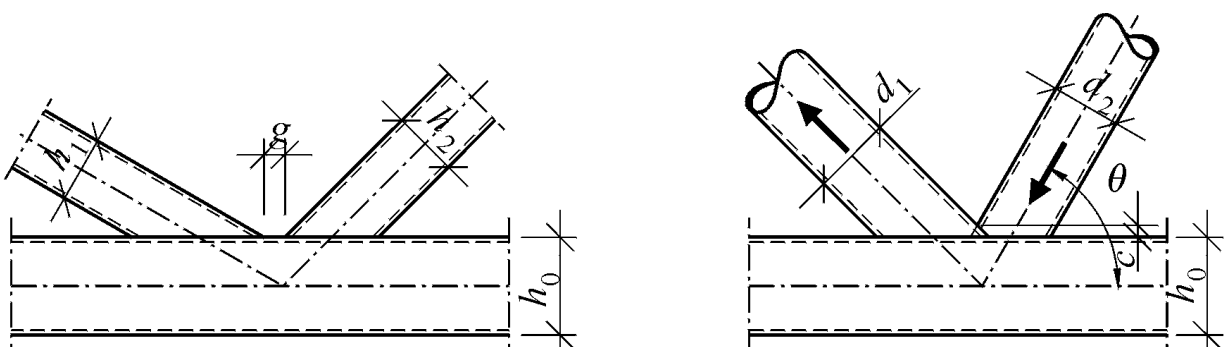
Opseg vazenja za zavarene veze izmedju elemenata ispune i pojaseva od supljih profila kruznog poprečnog preseka

| | | |
|---|---|--|
| $0,2 \leq d_i / d_0 \leq 1,0$ | | |
| Klasa 2 | i | $10 \leq d_0 / t_0 \leq 50$ u opštem slučaju |
| ali | | $10 \leq d_0 / t_0 \leq 40$ za X čvorove |
| Klasa 2 | i | $10 \leq d_i / t_i \leq 50$ |
| $\lambda_{ov} \geq 25\%$ | | |
| $g \geq t_1 + t_2$ | | |

Proračunske nosivosti za različite tipove veza elemenata od CHS

| | |
|--|---|
| <p>Lom plastifikacijom površine pojasa – T i Y veze</p>  | $N_{1,Rd} = \frac{\gamma^{0,2} k_p f_{y0} t_0^2 (2,8 + 14,2\beta^2)}{\sin \theta_1} / \gamma_{M5}$ |
| <p>Lom plastifikacijom površine pojasa – X veze</p>  | $N_{1,Rd} = \frac{k_p f_{y0} t_0^2}{\sin \theta_1} \frac{5,2}{1 - 0,81\beta} / \gamma_{M5}$ |
| <p>Lom plastifikacijom površine pojasa – K i N veze sa razmakom ili preklopom</p>  | $N_{1,Rd} = \frac{k_g k_p f_{y0} t_0^2}{\sin \theta_1} \left(1,8 + 10,2 \frac{d_1}{d_0} \right) / \gamma_{M5}$ $N_{2,Rd} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} N_{1,Rd}$ |
| <p>Lom usled kidanja smicanjem – K, N i KT veze sa razmakom i sve T, Y i X veze</p> <p>Kada je: $d_i \leq d_0 - 2t_0$ $N_{i,Rd} = \frac{f_{y0}}{\sqrt{3}} t_0 \pi d_i \frac{1 + \sin \theta_i}{2 \sin^2 \theta_i} / \gamma_{M5}$</p> | |
| $k_g = \gamma^{0,2} \left[1 + \frac{0,024\gamma^{1,2}}{1 + \exp(0,5g/t_0 - 1,33)} \right]$ $k_p = 1 - 0,3n_p(1 + n_p) \leq 1 \text{ za } n_p > 0 \text{ (pritisak)}$ $k_p = 1 \text{ za } n_p \leq 0 \text{ (zatezanje)}$ | |

Rešetkasti nosači od šupljih profila kvadratnog i pravougaonog poprečnog preseka (RHS)



- Znatno jednostavniji i jeftiniji proces izrade u odnosu na CHS;
- Ravno sečenje, nema posebne obrade krajeva štapova ispune;
- Štapovi ispuni mogu da budu i kružnog poprečnog preseka CHS;
- Postoji mogućnost ojačanja veze za razliku od CHS;
- Nešto lošiji aerodinamički oblik u odnosu na CHS;

Opseg važenja za veze elementa od RHS

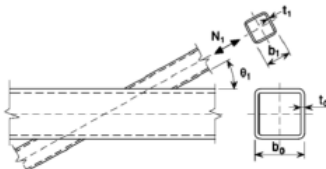
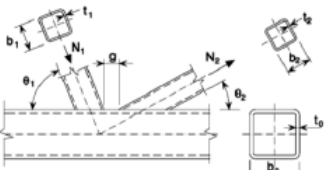
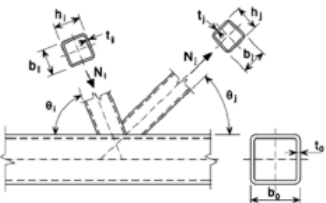
| Tip veze | Parametri veze ($i = 1$ ili 2 , $j =$ preklapljeni element ispune) | | | | |
|------------------------|---|---|---|---------------------------------|---|
| | b_i / b_0 ili d_i / b_0 | Pritisak b_i / t_i i Zatezanje h_i / t_i | h_0 / b_0 i h_i / b_i | b_0 / t_0 i h_0 / t_0 | Razmak ili preklap b_i / b_j |
| T, Y i X veze | $b_i / b_0 \geq 0,25$ | $\frac{b_i}{t_i} \leq 35$ i | | | - |
| K i N veze sa razmakom | $b_i / b_0 \geq 0,35$ i $\geq 0,1 + 0,01 b_0 / t_0$ | $\frac{h_i}{t_i} \leq 35$ i Klasa 2 | $\frac{b_i}{t_i} \leq 35$ i $\frac{h_i}{t_i} \leq 35$ | $\geq 0,5$ ali ≤ 2 | $\frac{g}{b_0} \geq 0,5(1 - \beta)$ ali $\leq 1,5(1 - \beta)^{1)}$ $g \geq t_1 + t_2$ |
| K i N veze sa preklpom | $b_i / b_0 \geq 0,25$ | Klasa 1 | | | $\lambda_{ov} \geq 25\%$ ali $\lambda_{ov} \leq 100\%^{2)}$ i $\frac{b_i}{b_j} \geq 0,75$ |

1) Ako je $\frac{g}{b_0} > 1,5(1 - \beta)$ i $g > t_1 + t_2$, vezu treba tretirati kao dve odvojene T i Y veze.

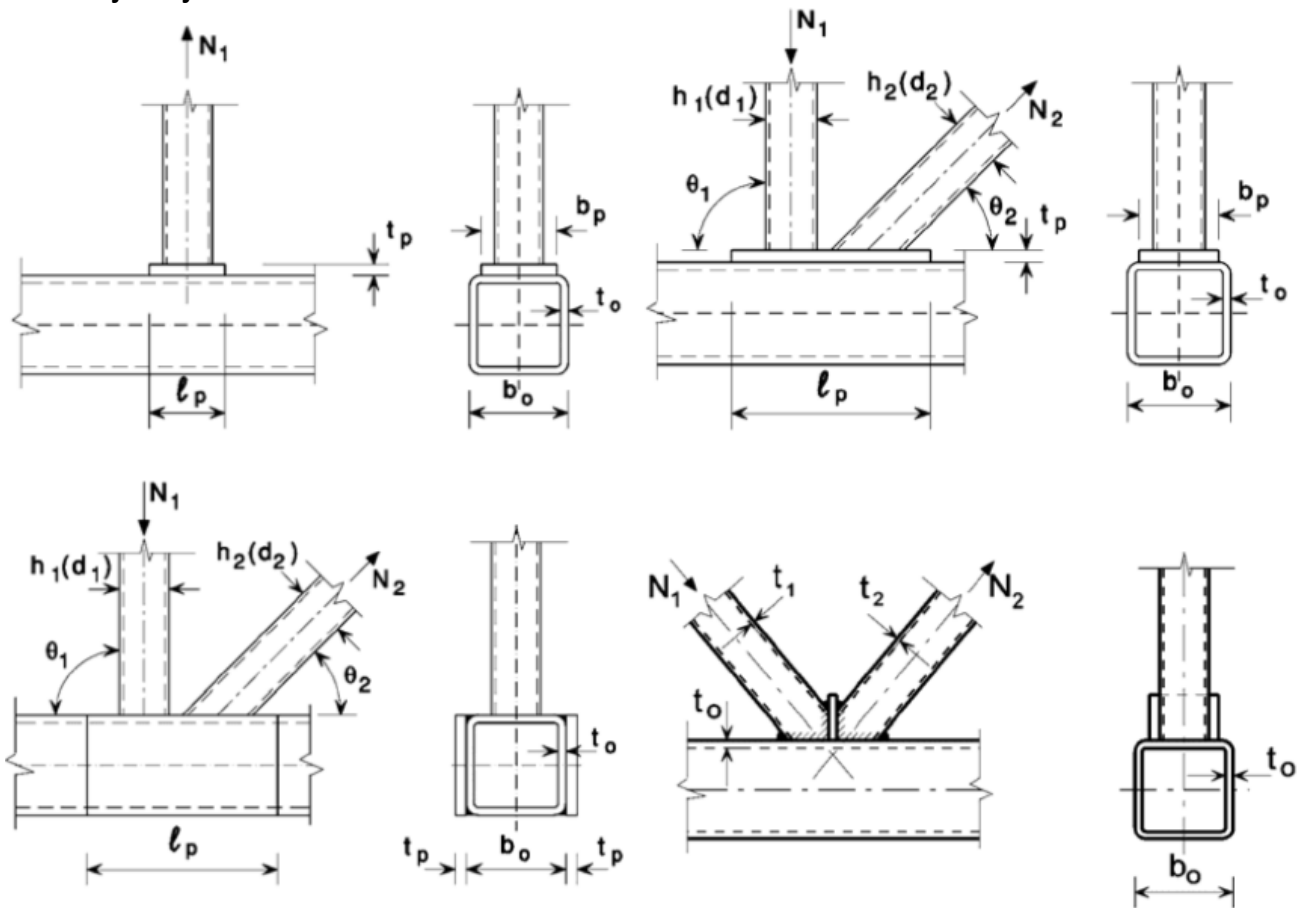
2) Preklap se može povećati da bi se omogućilo da nožica preklapljenog elementa ispune bude zavarena za pojas.

| Tip elementa ispune | Tip veze | Parametri veze | |
|---|---------------------|--|---------------------|
| Šuplji profili kvadratnog poprečnog preseka | T, Y ili X | $b_i / b_0 \leq 0,85$ | $b_0 / t_0 \geq 10$ |
| | K ili N sa razmakom | $0,6 \leq \frac{b_1 + b_2}{2b_1} \leq 1,3$ | $b_0 / t_0 \geq 15$ |

Proračunske nosivosti za različite tipove veza elementa od RHS

| Tip veze | Proračunska nosivost ($i = 1$ ili 2 , $j =$ preklapljeni štap) |
|--|--|
| T, Y i X veza | Lom plastifikacijom površine pojasa $\beta \leq 0,85$ |
|  | $N_{i,Rd} = \frac{k_n f_{y0} t_0^2}{(1 - \beta) \sin \theta_i} \left(\frac{2\beta}{\sin \theta_i} + 4(1 - \beta)^{0,5} \right) l \gamma_{MS}$ |
| K i N veze sa razmakom | Lom plastifikacijom površine pojasa $\beta \leq 1,0$ |
|  | $N_{i,Rd} = \frac{8,9 \gamma^{0,5} k_n f_{y0} t_0^2}{\sin \theta_i} \left(\frac{b_1 + b_2}{2b_0} \right) l \gamma_{MS}$ |
| K i N veze sa preklpom ¹⁾ | Lom elementa ispune $25\% \leq \lambda_{ov} < 50\%$ |
| Element i ili element j mogu biti zategnuti ili pritisnuti, ali jedan treba da bude zategnut a drugi pritisnut. | $N_{i,Rd} = f_{yi} t_i \left(b_{eff} + b_{e,ov} + \frac{\lambda_{ov}}{50} (2h_i - 4t_i) \right) l \gamma_{MS}$ |
|  | Lom elementa ispune $50\% \leq \lambda_{ov} < 80\%$ |
| | $N_{i,Rd} = f_{yi} t_i (b_{eff} + b_{e,ov} + 2h_i - 4t_i) l \gamma_{MS}$ |
| | Lom elementa ispune $\lambda_{ov} \geq 80\%$ |
| | $N_{i,Rd} = f_{yi} t_i (b_i + b_{e,ov} + 2h_i - 4t_i) l \gamma_{MS}$ |
| Parametri b_{eff} , $b_{e,ov}$ i k_n | |
| $b_{eff} = \frac{10}{b_0 / t_0} \frac{f_{y0} t_0}{f_{yi} t_i} b_i$ ali $b_{eff} \leq b_i$ | $k_n = 1,3 - \frac{0,4n}{\beta}$ ali $k_n \leq 1,0$ za $n > 0$ (pritisak) |
| $b_{e,ov} = \frac{10}{b_j / t_j} \frac{f_{yj} t_j}{f_{yi} t_i} b_i$ ali $b_{e,ov} \leq b_i$ | $k_n = 1$ za $n \leq 0$ (zatezanje) |
| ¹⁾ Potrebno je kontrolisati samo preklpni element ispune i . Treba uzeti da je efikasnost preklapljenog elementa ispune j (to jest proračunska nosivost veze podeljena sa proračunskom plastičnom nosivošću elementa ispune) jednaka efikasnosti preklpnog elementa ispune. | |

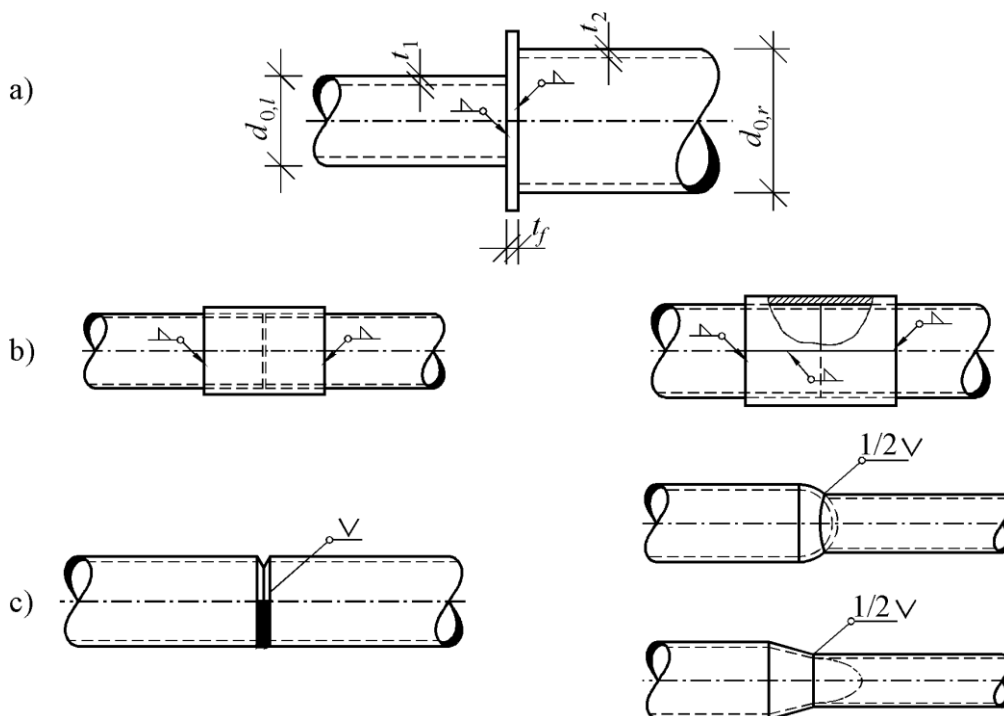
Načini ojačanja veza - RHS



77. Proračun i konstruisanje montažnih nastavaka rešetkastih nosača

Radionički nastavci se uglavnom ostvaruju zavarivanjem, a lociraju se izvan cvora na strani slabije napreznutog stapa. Postoje tri različite mogućnosti za ostvarivanje nastavaka u zavarenoj izradi:

- Pomocu umetnute ploce
- Pomocu "mufa"
- direktnim zavarivanjem suceonim savovima



Nastavci sa umetnutom plocom se primenjuju kada se nastavljaju supljii profili razlicitih dimenzija. Veza se ostvaruje obostranim ugaonim savovima po citavom obimu profila. Kod profila sa vecom debljinom zodova mogu da se primenei suceoni savovi za vezu profila sa umetnutom plocom.

Osnovni nedostaci ovog resenja su indirektno prenosenje sile i zatezanje upravno na pravac sava. Osim toga treba obratiti paznju na dvoplatnost materijala od kojeg se izradjuje umetnuta ploca, koja moze da dovede do prevremenog loma, posebno kod dinamički opterećenih konstrukcija.

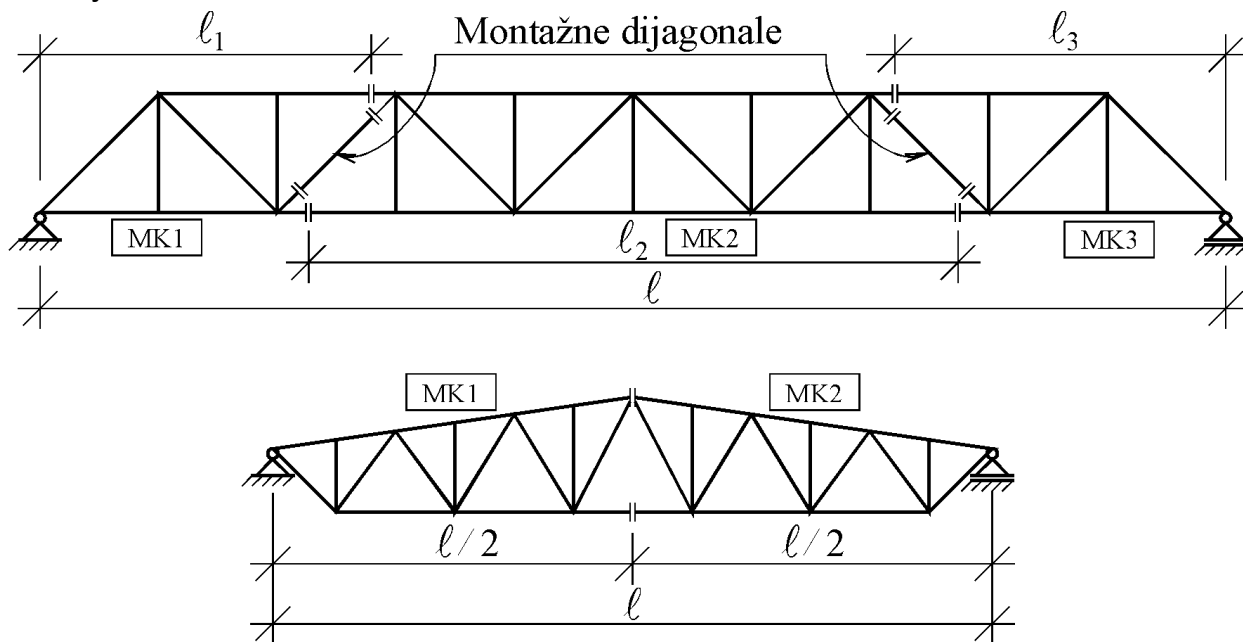
Primena mufa je moguća samo kod profila sa istim spoljnjim dimenzijama. Prenosenje sile se i u ovom slicaju vrsi indirektno, preko mufa, a veza se ostvaruje ugaonim savovima. Posto muf, na izvesan nacin, predstavlja podvezicu, njegova površina treba da bude veca ili jednaka od minimalne površine stapova koji se vezuju. Kod pritisnutih stapova koji su izloženi dejstvu lokalnog savijanja, dužina mufa treba da bude:

$$l \geq 3.5d$$

Kod pravougaonih profila umesto precnika d treba uzeti visinu profila h .

Suceonim savovima moze da se ostvari veza stapova istih ili priblizno istih dimenzija poprecnog preseka. Ako se dimenzije stapova znacajno razlikuju, primenjuju se konusni umetci, ali se vrsi redukcija kraja sireg profila.

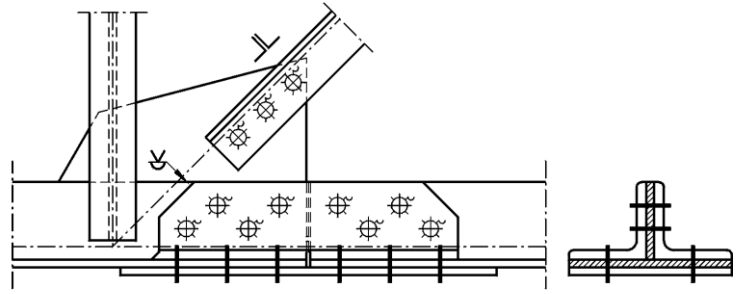
Položaj montažnih nastavaka



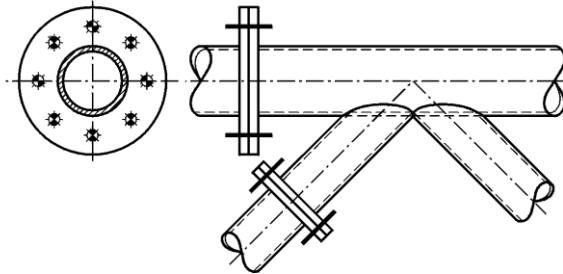
Kako su rasponi resetkastih nosaca uglavnom veci od dozvoljene duzine transportnog gabarita, treba predvideti montazne nastavke. Oni se lociraju tako da dele resetkasti nosac na dve ili vise celina, koje se mogu samostalno transportovati. Za razliku od stapova ispune cija veza na montazi u nekim slucajevima moze da se izbegne povoljnim izborom preseka, pojasni stapovi obavezno moraju da se prekinu i to, po pravilu, u istom polju resetkastog nosaca. Stapovi ispune se u uslucaju kada je rastavljanje resetkastog nosaca nemoguće bez njihovog prekidanja, prikljuuju za cvorove nosaca u vidu montaznog stapa(najcesce dijagonale).

Vrste montažnih nastavaka

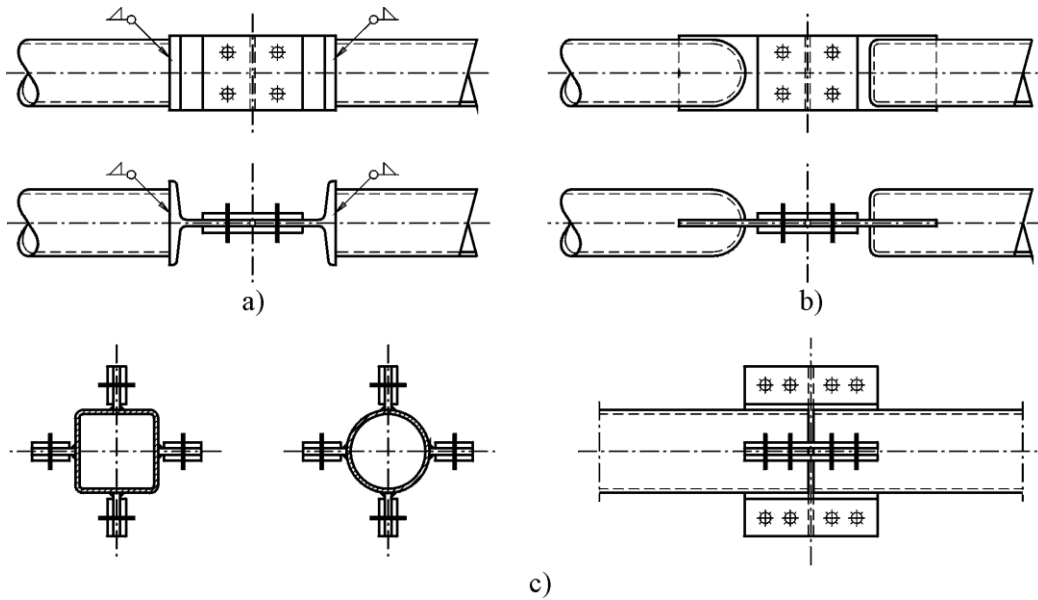
Sa podvezicama



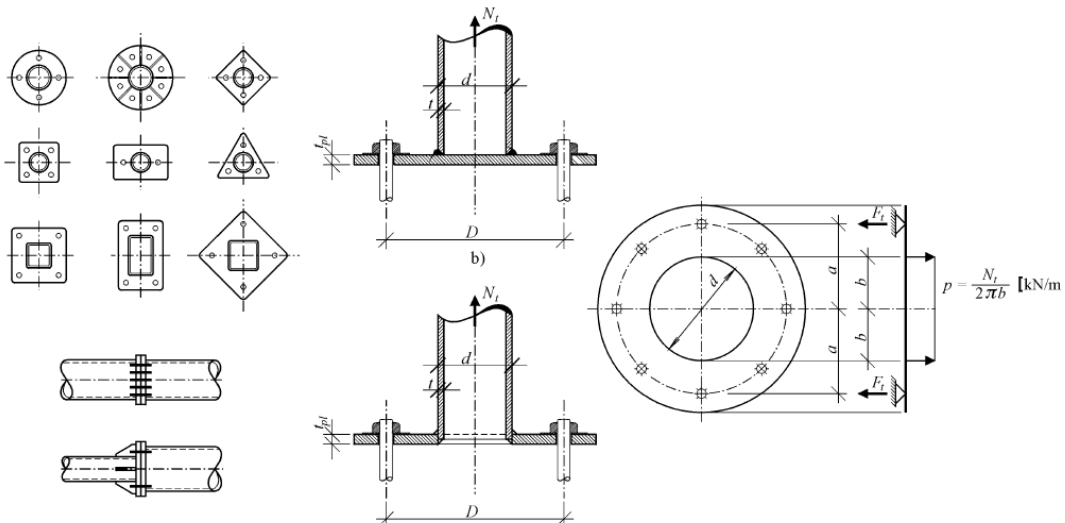
Sa ceonom plocom



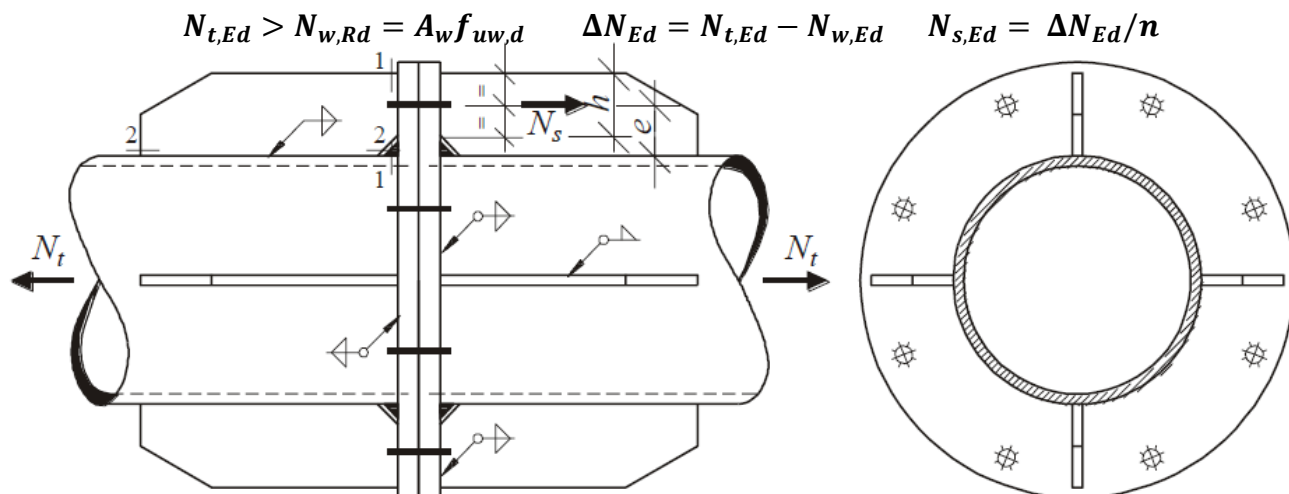
Montažni nastavci pomoću podvezica



Oblikovanje i modeliranje montažnih nastavak sa čeonom pločom



Montžni nastavci pomoću čeone ploče sa ukrúćenjima



Presek 1-1:

$$\sigma_w = \frac{N_{s,Ed}}{A_{w,1}} \leq f_{uw,d}$$

$$f_{uw,d} = \frac{f_u / \sqrt{2}}{\beta_w \gamma_{m2}}$$

Presek 2-2:

$$\tau_{\parallel} = N_{s,Ed} / A_{w,2}$$

$$\sigma_w = \frac{N_{s,Ed} e}{W_{w,2}}$$

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \sigma_2 / \sqrt{2}$$

$$\sigma_u = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\parallel}^2 + \tau_{\perp}^2)} \leq f_{vw,d}$$