

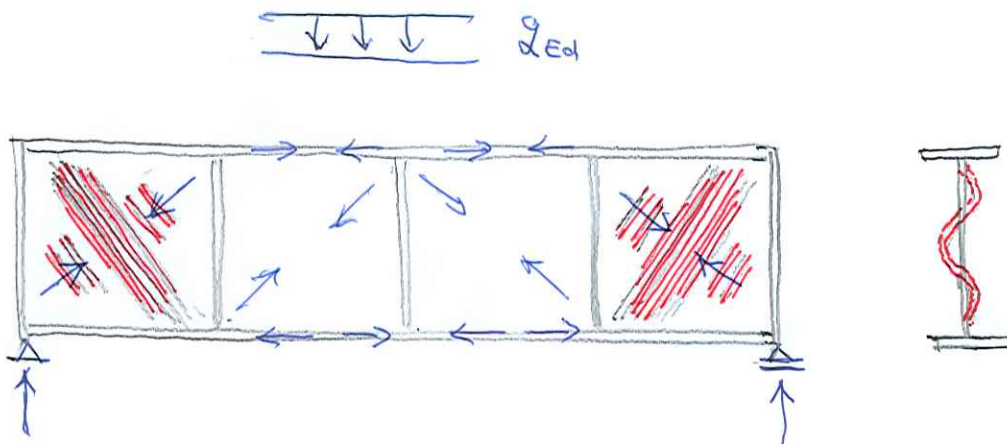
PROJEKTOVANJE PUNIH LIMENIH NOSAČA

- treći dio

IZBOČAVANJE USLJED SMICANJA

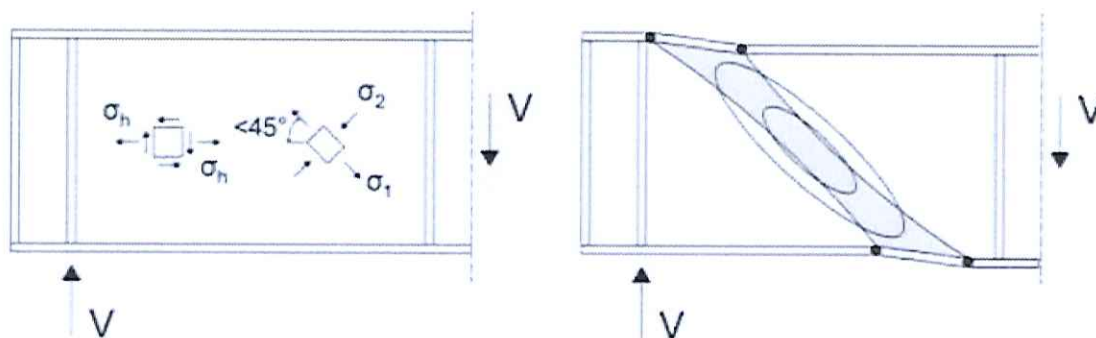
- Izbočavanje usljed smicanja je fenomen koji nastaje u poljima sa izraženo velikim smičućim naponima (u blizini oslonaca) i karakteriše ga pojava dijagonalnih talasastih izbočina, koje su posljedica dijagonalnih sila pritiska prilikom formiranja unutrašnje rešetke sistema, tj. kada reakciju u osloncu razložimo na sile pritiska i zatezanja u polju do oslonca, a što su u stvari glavni pravci normalnih napona (σ_1 - zatezanje i σ_2 - pritisak).

Nacrtati izbočenja na rebru i nožici neukrućenog nosača



- Nakon dostizanja kritičnog elastičnog napona izbočavanja, postoji dodatna rezerva u nosivosti koja se manifestuje u povećavanju napona zatezanja σ_1 . Ovaj napon zatezanja se uravnotežuje u uglovima i koliko će moći da se razvije zavisi najviše od krutosti nožica. Na kraju granična nosivost se dostiže kada se u nožicama pojave plastični zglobovi usljed znatnog savijanja od sila zatezanja izazvanih sa σ_1 .

ČELIČNE KONSTRUKCIJE II
 PREDAVANJE 05



- Limovi kod kojih sljedeći uslov nije ispunjen treba da se provjere na izbočavanje usljed smicanja. Prvi od ova dva uslova smo koristili kada smo obrađivali nosivost na smicanje u prošlom semestru. Na osloncima se podrazumijevaju poprečna ukrućenja.

$$h_w/t \leq \frac{72}{\eta} \varepsilon \quad \text{rebra bez unutrašnjih poprečnih ukrućenja}$$

$$h_w/t \leq \frac{31}{\eta} \varepsilon \sqrt{k_\tau} \quad \text{rebra sa unutrašnjim poprečnim ukrućenjima}$$

gdje je:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y [N/mm^2]}}$$

h_w visina rebra;

t debljina rebra;

$\eta = 1,20$ za čelike klasa do S460,

MEST EN 1993-1-5 NA;

$\eta = 1,00$ za čelike viših klasa čvrstoće,

MEST EN 1993-1-5 NA;

k_τ koeficijent izbočavanja smicanjem.

- Koeficijent izbočavanja smicanjem k_τ se može dobiti na sljedeći način:

$$k_\tau = 5,34 + 4,00 (h_w / a)^2 + k_{\tau sl} \quad \text{kada je } a / h_w \geq 1$$

$$k_\tau = 4,00 + 5,34 (h_w / a)^2 + k_{\tau sl} \quad \text{kada je } a / h_w < 1$$

gdje je:

$$k_{rs\ell} = 9 \left(\frac{h_w}{a} \right)^2 \sqrt[4]{\left(\frac{I_{s\ell}}{t^3 h_w} \right)^3} \quad \text{ali ne manje od} \quad \frac{2,1}{t} \sqrt[3]{\frac{I_{s\ell}}{h_w}}$$

a rastojanje između poprečnih ukrućenja;
 $I_{s\ell}$ moment inercije podužnog ukrućenja, sa pripadajućim dijelom rebra, oko z-z ose. Za rebra sa podužnim ukrućenjima, koja ne moraju da budu na jednakom rastojanju, $I_{s\ell}$ je zbir momenata inercije pojedinačnih ukrućenja.

- Pošto se utvrdi da li treba rebro da se provjeri na izbočavanje usljed smicanja, prelazi se na provjeru, ukoliko je to potrebno.

Provjera nosivosti

- Provjera elementa na smičuće izbočavanje treba da se sprovode kako slijedi:

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} \leq 1,0$$

gdje je:

V_{Ed} proračunska smičuća sila, uključujući i smicanje od torzije;
 $V_{b,Rd}$ proračunska nosivost na smičuće izbočavanje.

Proračunska nosivost na smičuće izbočavanje

- Za neukrućena ili ukrućena rebra proračunska nosivost na smicanje treba da se uzme kao:

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}$$

ČELIČNE KONSTRUKCIJE II PREDAVANJE 05

gdje je:

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}$$

doprinos rebra;

$$V_{bf,Rd} = \frac{b_f t_f^2 f_{yf}}{c \gamma_{M1}} \left(1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right)$$

doprinos nožica.

Doprinos rebra

- Za rebra sa poprečnim ukrućenjima samo nad osloncima, kao i za rebra sa poprečnim međuukrućenjima ili podužnim ukrućenjima, ili sa jednim i drugim ukrućenjima, faktor χ_w koji obuhvata doprinos rebra na nosivost na izbočavanje usljed smicanja treba uzeti iz sljedeće tabele:

	Kruto oslonačko ukrućenje	Meko oslonačko ukrućenje
$\bar{\lambda}_w < 0,83/\eta$	η	η
$0,83/\eta \leq \bar{\lambda}_w < 1,08$	$0,83/\bar{\lambda}_w$	$0,83/\bar{\lambda}_w$
$\bar{\lambda}_w \geq 1,08$	$1,37/(0,7 + \bar{\lambda}_w)$	$0,83/\bar{\lambda}_w$

gdje je:

$\bar{\lambda}_w$ modifikovana vitkost,

za poprečna ukrućenja samo nad osloncima:

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{86,4 t \varepsilon}$$

za poprečna ukrućenja nad osloncima i poprečna međuukrućenja ili podužna ukrućenja, ili oboje:

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{37,4 t \varepsilon \sqrt{k_t}}$$

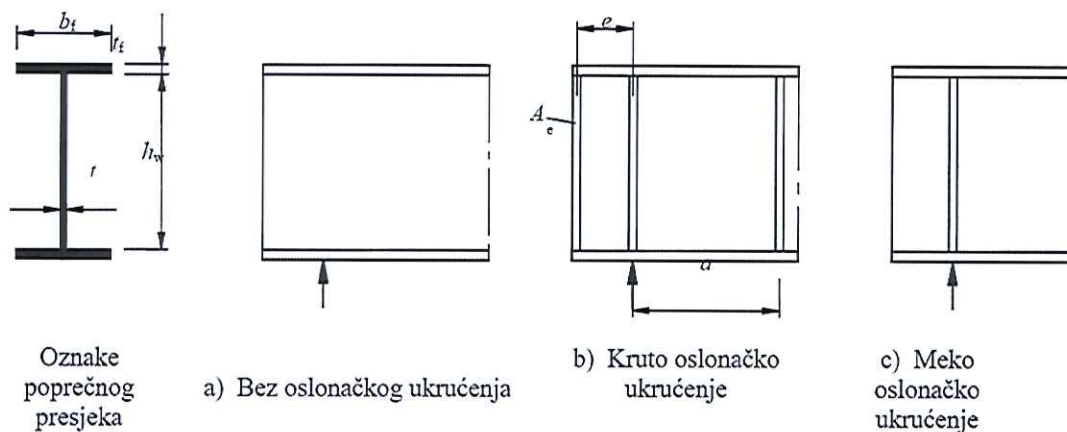
ČELIČNE KONSTRUKCIJE II PREDAVANJE 05

k_τ je minimalni koeficijent izbočavanja usljed smicanja za polje rebra;

$$\tau_{\alpha} = k_{\tau} \sigma_E$$

k_τ, σ_E koeficijent izbočavanja smicanjem i Ojlerov kritični napon elastičnog izbočavanja - definisani ranije.

- Kada se proračunava k_τ moment inercije podužnog ukrućenja treba da se redukuje na 1/3 njegove stvarne vrijednosti.
- Na sljedećoj slici su prikazani različiti krajnji oslonci za nosače.



Doprinos nožica

- Kada nosivost nožica nije u potpunosti iskorišćena za prihvatanje momenta savijanja ($M_{Ed} < M_{f,Rd}$), doprinos nožica treba da se odredi prema izrazu koji je dat prethodno (*Proračunska nosivost na smičuće izbočavanje*).
- b_f i t_f se uzimaju za nožicu koja ima manju aksijalnu nosivost.
- b_f se ne uzima veće od $15\epsilon t_f$ sa obje strane rebra.

ČELIČNE KONSTRUKCIJE II PREDAVANJE 05

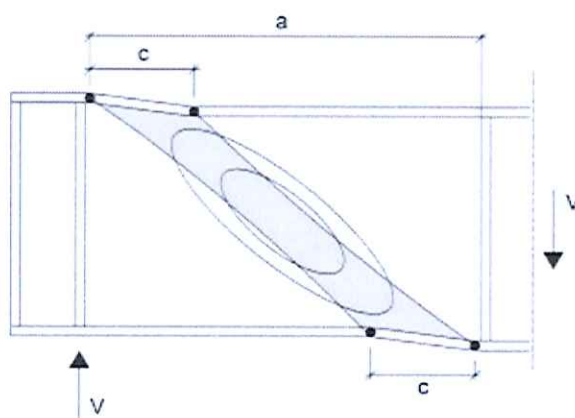
- $M_{f,Rd}$ je moment nosivosti poprečnog presjeka koga čine samo efektivne površine nožica:

$$M_{f,Rd} = \frac{M_{fk}}{\gamma_{M0}}$$

Plastični moment nosivosti $M_{f,Rd}$ može da se usvoji kao proizvod $A_f f_y / \gamma_{M0}$ - napona na granici razvlačenja kroz faktor sigurnosti, efektivne površine nožice (manja efektivna površina nožice, ako nožice nisu istog presjeka) i rastojanja između težišta nožica.

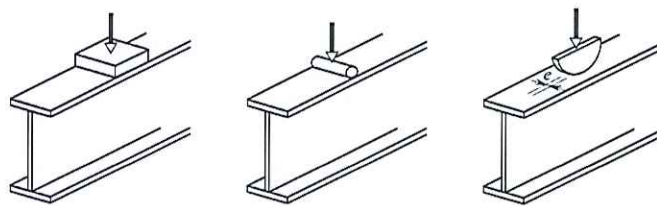
- Razmak između plastičnih zglobova na nožicama c , prikazuje se na sljedećoj slici i daje se kao:

$$c = a \left(0,25 + \frac{1,6 b_f t_f^2 f_{yf}}{t h_w^2 f_{yw}} \right)$$

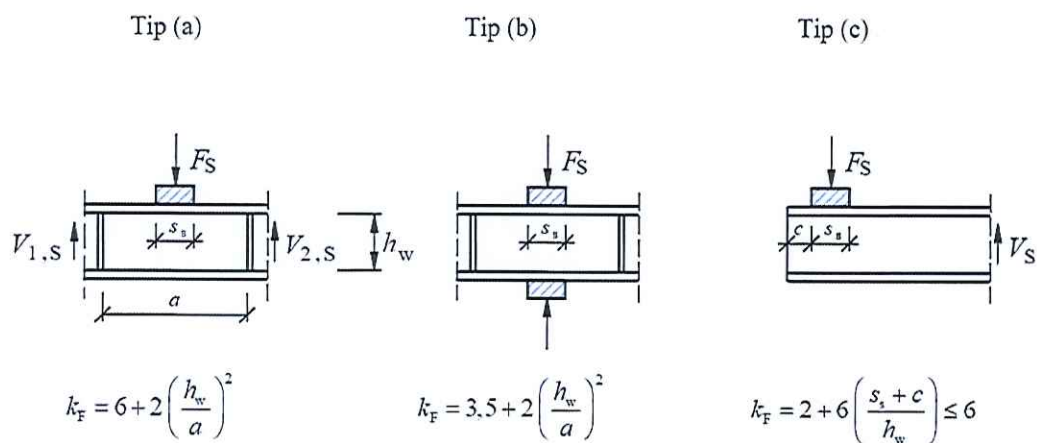


NOSIVOST NA DEJSTVO POPREČNIH SILA

- Gubitak nosivosti, usljed izbočavanja, u slučaju dejstva poprečnih sila, dešava se zbog prisustva σ_z napona pritiska koji lokalno djeluju u blizini dejstva poprečne sile.



- Karakteristični slučajevi dejstva poprečne sile su:
 - a) preko nožice i prihvata se silama smicanja u rebru, vidjeti sljedeću sliku;
 - b) preko jedne nožice i prenosi se kroz rebro direktno do druge nožice;
 - c) preko jedne nožice u blizini neukrućenog kraja.
- Na sljedećoj slici daju se karakteristični slučajevi dejstva poprečne sile sa koeficijentima izbočavanja k_F , koji se koriste dalje u proračunu nosivosti.



Provjera nosivosti

- Provjera treba da se sprovode kako slijedi:

$$\eta_2 = \frac{F_{Ed}}{\frac{f_{yw} L_{eff} t_w}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0$$

gdje je:

F_{Ed} proračunska poprečna sila;
 L_{eff} efektivna dužina za nosivost na poprečne sile;
 t_w debljina lima.

Proračunska nosivost

- Za neukrućena ili ukrućena rebra nosivost na lokalno izbočavanje usljed dejstva poprečnih sila treba da se odredi kao:

$$F_{Rd} = \frac{f_{yw} L_{eff} t_w}{\gamma_{M1}}$$

gdje je:

t_w debljina rebra;
 f_{yw} napon na granici razvlačenja rebra;
 L_{eff} efektivna dužina za nosivost na poprečne sile, koja treba da se odredi iz:

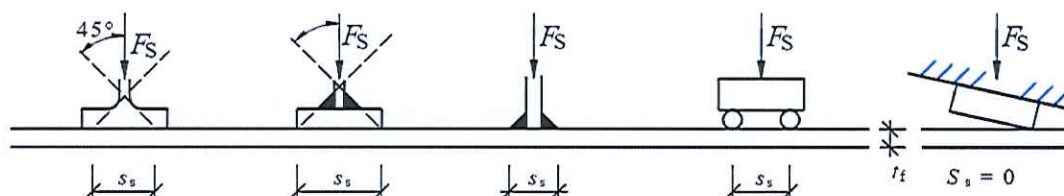
$$L_{eff} = \chi_F \ell_y$$

gdje je:

ℓ_y efektivna opterećena dužina, koja odgovara dužini nanošenja opterećenja (*stiff bearing*) s_s ;
 χ_F faktor redukcije usljed lokalnog izbočavanja.

Dužina nanošenja opterećenja (*stiff bearing*)

- Dužina nanošenja opterećenja (*stiff bearing*) s_s na nožici treba da se usvoji kao rastojanje na kojem se nanešeno opterećenje efektivno rasprostire pod nagibom 1:1. Dužina s_s treba da bude manja ili jednaka visini rebra h_w .
- Ukoliko nekoliko koncentrisanih sila djeluje na bliskom rastojanju, nosivost treba da se provjeri za svaku silu pojedinačno, kao i za ukupnu silu sa dužinom nanošenja opterećenja s_s koja je jednaka osovinskom rastojanju između krajnjih sila.
- Ako je kontaktna površina nanijetog opterećenja pod uglom u odnosu na površinu nožice, treba uzeti da je s_s jednako nuli



Faktor redukcije χ_F efektivne dužine za nosivost

- Faktor redukcije χ_F treba da se odredi kao:

$$\chi_F = \frac{0,5}{\lambda_F} \leq 1,0$$

gdje je:

$$\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{\ell_y t_w f_{yw}}{F_{cr}}}$$
$$F_{cr} = 0,9 k_F E \frac{t_w^3}{h_w}$$

- Za rebra bez podužnih ukrućenja k_F je dato na slici iz uvoda ovoga poglavlja.
- Za rebra sa podužnim ukrućenjima daju se sljedeća pravila u Nacionalom aneksu MEST EN 1993-1-5 NA:

$$k_F = 6 + 2 \left[\frac{h_w}{a} \right]^2 + \left[5,44 \frac{b_1}{a} - 0,21 \right] \sqrt{\gamma_s}$$

gdje je:

$$\gamma_s = 10,9 \frac{I_{s\ell,1}}{h_w t_w^3} \leq 13 \left[\frac{a}{h_w} \right]^3 + 210 \left[0,3 - \frac{b_1}{a} \right]$$

b_1 visina opterećenog pojedinačnog polja uzeta kao čisto rastojanje između opterećene nožice i ukrućenja;
 $I_{s\ell,1}$ moment inercije ukrućenja koje je najbliže opterećenoj nožici, uključujući sadejstvujuće djelove rebra.

- Prethodni postupak, za tip dejstva opterećenja a), važi u slučaju:

$$0,05 \leq \frac{b_1}{a} \leq 0,3 \text{ i } \frac{b_1}{h_w} \leq 0,3$$

Efektivna opterećena dužina

- Efektivna opterećena dužina l_y treba da se proračuna kako slijedi:

Za tipove dejstva opterećenja a) i b):

$$l_y = s_s + 2 t_f \left(1 + \sqrt{m_1 + m_2} \right)$$

Dužina l_y treba da je manja od rastojanja između susjednih poprečnih ukrućenja.

Za tip dejstva opterećenja c), l_y treba da se usvoji kao manja od vrijednosti dobijenih iz jednačina:

$$l_y = l_e + t_f \sqrt{\frac{m_1}{2} + \left(\frac{l_e}{t_f} \right)^2 + m_2}$$

$$l_y = l_e + t_f \sqrt{m_1 + m_2}$$

gdje je:

$$l_e = \frac{k_F E t_w^2}{2 f_{yw} h_w} \leq s_s + c$$

- Parametri m_1 i m_2 , iz prethodnih izraza, treba da se dobiju na sljedeći način:

$$m_1 = \frac{f_{yt} b_f}{f_{yw} t_w}$$

$$m_2 = 0,02 \left(\frac{h_w}{t_f} \right)^2 \quad \text{ako je } \bar{\lambda}_F > 0,5$$

$$m_2 = 0 \quad \text{ako je } \bar{\lambda}_F \leq 0,5$$

- Za sandučaste nosače b_f u prethodnom izrazu treba da se ograniči na $15 \epsilon t_f$ sa svake strane rebra.

INTERAKCIJA

Interakcija između sile smicanja, momenta savijanja i aksijalne sile

- Kada je obezbijeđeno da $\bar{\eta}_3$ (vidjeti ispod) nije veće od 0.5, proračunska nosivost na moment savijanja i aksijalnu silu ne mora da se redukuje da bi se uzeli u obzir uticaji smičuće sile.
- Ako je $\bar{\eta}_3$ veće od 0.5, kombinovani uticaji savijanja i smicanja u rebro I nosača ili sandučastog nosača treba da zadovolje:

$$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) (2\bar{\eta}_3 - 1)^2 \leq 1,0 \quad \text{za} \quad \bar{\eta}_1 \geq \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}$$

gdje je:

$$\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}}$$

$$\bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}}$$

$M_{f,Rd}$ proračunski plastični moment nosivosti presjeka koji čine samo efektivne površine nožica;

$M_{pl,Rd}$ proračunski plastični moment nosivosti poprečnog presjeka koji čine efektivne površine nožica i u potpunosti efektivno rebro bez obzira na klasu njegovog presjeka;

- Prethodni postupak treba da se provjeri za sve presjeke izuzev za one koji se nalaze na rastojanju manjem od $h_w/2$ od oslonca sa vertikalnim ukrućenjima.

ČELIČNE KONSTRUKCIJE II

PREDAVANJE 05

- Ako djeluje i aksijalna sila N_{Ed} , momenti nosivosti $M_{pl,Rd}$ i $M_{f,Rd}$ treba da se redukuju u skladu sa MEST EN 1993-1-1 i MEST EN 1993-1-5 (Ovdje zbog obimnosti nije prikazano).

Interakcija između poprečne sile, momenta savijanja i aksijalne sile

- Ako je nosač izložen dejstvu koncentrisane poprečne sile koja djeluje na pritisutoj nožici zajedno sa momentom savijanja i aksijalnom silom, nosivost treba da se provjeri korišćenjem sljedećeg interakcionog izraza:

$$\eta_2 + 0,8 \eta_1 \leq 1,4$$

- Ako koncentrisano opterećenje djeluje na zategnutoj nožici, nosivost treba da se provjeri prema prethodnom poglavlju (NOSIVOST NA DEJSTVO POPREČNIH SILA). Pored toga, treba da se zadovolje zahtjevi iz MEST EN 1993-1-1.

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}} \right) \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}} \right) + 3 \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y/\gamma_{M0}} \right)^2 \leq 1$$