

# Varjena konstrukcija

## Strojni elementi 1

Predloga za vaje

Pripravila: as. dr. Ivan Okorn  
as. dr. Domen Šeruga

Ljubljana, 2015

**Kazalo:**

<b>1. Obremenitev konstrukcije .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Oblikovanje konstrukcije .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 Določitev dimenzij profila .....</b>	<b>4</b>
<b>2.2 Določitev zvarov .....</b>	<b>4</b>
<b>3. Kontrola napetosti v zvarih .....</b>	<b>5</b>
<b>3.1 Imenske napetosti v kotnih zvarih.....</b>	<b>5</b>
<b>3.2 Kontrola zvarov na utrujanje .....</b>	<b>6</b>
3.2.1 Določitev razlik napetosti.....	6
3.2.2 Določitev trdnosti utrujanja.....	7
3.2.3 Kontrola utrujanja .....	8
<b>4. Literatura .....</b>	<b>13</b>

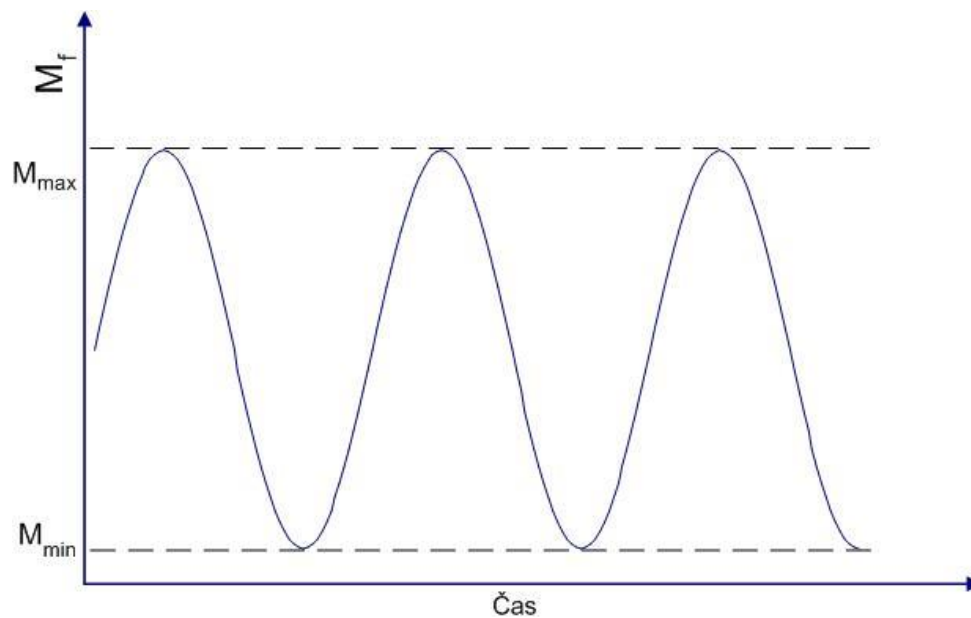
## 1. Obremenitev konstrukcije

Vaja obravnava dinamično obremenjeno varjeno konstrukcijo. Konstrukcijo predstavimo z linijskim nosilcem, ki je obremenjen s točkovnimi silami.

Na podlagi znanih velikosti in smeri zunanjih sil najprej določimo notranje sile in momente. Narišemo diagrame notranjih sil in momentov vzdolž nosilca.

Prečna sila, osna sila in upogibni moment se spreminjajo med minimalno in maksimalno vrednostjo. Določimo vrednosti v najbolj obremenjenem prerezu nosilca.

Pri konzoli določimo vrednosti v priključnem zvaru na mestu vpetja. Časovni potek upogibnega momenta v priključnem zvaru prikazuje slika 1.



Slika 1: Spreminjanje upogibnega momenta v priključnem zvaru

## 2. Oblikovanje konstrukcije

### 2.1 Določitev dimenzij profila

Dimenzije prečnega prereza nosilca preliminarno določimo s pomočjo trdnostnega in deformacijskega kriterija.

Pri trdnostnem kriteriju uporabimo enačbo za izračun upogibnega momenta v najbolj obremenjeni točki nosilca.

$$\sigma_{f \max} = \frac{M_{f \max}}{W_z} \leq \sigma_{fdop} \quad (1)$$

$\sigma_{f \max}$  [MPa] maksimalna upogibna napetost  
 $M_{f \max}$  [MPa] maksimalni upogibni moment  
 $W_z$  [mm<sup>3</sup>] odpornostni moment prereza okoli z osi

Pri deformacijskem kriteriju uporabimo enačbo za največji poves nosilca. Pri konzoli nastopi največji poves na koncu konzole.

$$f_{\max} = \frac{F_{y \max} \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot I_z} \leq f_{dop} \quad (2)$$

$l$  [mm] dolžina konzole  
 $I_z$  [mm<sup>4</sup>] vztrajnostni moment prereza okoli z osi  
 $E$  [MPa] modul elastičnosti, za jeklo  $E = 2,1 \cdot 10^5$  [MPa]

Za preliminarno določitev prereza nosilca upoštevamo dopustni poves

$$f_{dop} = \frac{l}{750} \quad (3)$$

Iz enačb 1 in 2 določimo potrebni vztrajnostni in odpornostni moment. Dimenzije prečnega prereza varjenega nosilca določimo na podlagi dimenzij primerljivega standardnega profila.

### 2.2 Določitev zvarov

Pri popolni prevaritvi pločevin (V, X, K zvar) je debelina zvara enaka debelini pločevin  $t$ .

Pri vrednotenju kotnih zvarov je debelina zvara višina zvara  $a$ . Navzgor in navzdol je omejena v odvisnosti od debelin pločevin v zvarnem spoju:

$$2 \text{ mm} \leq a \leq 0.7 \cdot t_{\min}$$

oz.

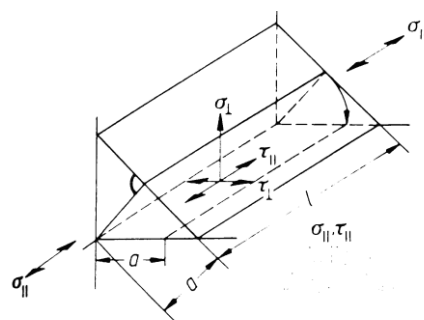
$$a > \sqrt{t_{\max}} \cdot 1 \text{ mm} - 0.5 \text{ mm}$$

če je minimalna debelina pločevine  $t_{\min}$  večja od 3 mm.

### 3. Kontrola napetosti v zvarih

#### 3.1 Imenske napetosti v kotnih zvarih

Splošno obremenitveno stanje v kotnem zvaru je prikazano na sliki 2. Za izračun napetosti v kotnem zvaru se srednjo ravnino zvara zvrne za kot  $45^\circ$  v eno izmed ravnin, ki ju določata položaja pločevin v spoju. Nato se izračuna posamezne napetosti v zvaru glede na obremenitve, ki se pojavijo v osnovnih pločevinah.



Slika 2: Napetostno stanje v kotnem zvaru

- $\sigma_{\parallel}$  normalne napetosti v smeri osi zvara
- $\sigma_{\perp}$  normalne napetosti v smeri pravokotno na os zvara
- $\tau_{\parallel}$  strižne napetosti v smeri osi zvara
- $\tau_{\perp}$  strižne napetosti v smeri pravokotno na os zvara

Normalna napetost v zvaru zaradi osne sile:

$$\sigma_{\perp n} = \frac{N}{A_{zv}} = \frac{N}{\sum(a \cdot l_{zv})} \quad (4)$$

$$l_{zv} = l - 2 \cdot a \quad (5)$$

$A_{zv}$  [mm<sup>2</sup>] nosilni prerez zvarov

Normalna napetost v zvaru zaradi upogibnega momenta:

$$\sigma_{\perp f} = \frac{M_f}{I_{zv}} \cdot y \quad (6)$$

$I_{zv}$  [mm<sup>4</sup>] vztrajnostni moment zvarov

$y$  [mm] razdalja kritične točke od težiščne osi z

Skupna normalna napetost v zvaru:

$$\sigma_{\perp} = \sigma_{\perp n} + \sigma_{\perp f} \quad (7)$$

Napetosti v zvaru zaradi prečne sile:

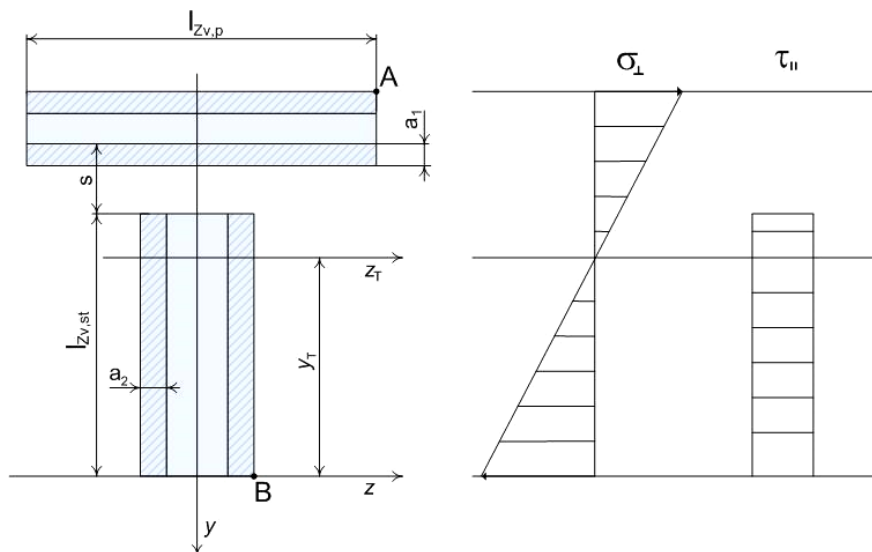
$$\tau_s = \frac{T_y \cdot S_z}{I_{zv} \cdot b} \quad (8)$$

$S_z$  [mm<sup>4</sup>]      statični moment zvarov

Strižne napetost so  $\tau_{\perp}$ , če so pravokotne na smer zvara in  $\tau_{\parallel}$ , če so v smeri zvara. Pri T profilu imamo tako  $\tau_{\perp}$  v zvarih ob pasnici,  $\tau_{\parallel}$  pa v zvarih ob stojini. Napetosti  $\tau_{\perp}$  so navadno zanemarljive in jih zato pri vrednotenju zvarov ne upoštevamo. Računamo napetosti  $\tau_{\parallel}$  v zvarih ob stojini. Uporabimo poenostavljeno enačbo za izračun povprečnih strižnih napetosti.

$$\tau_{\parallel} = \frac{T_y}{\sum (l_{zv, st} \cdot a)} \quad (9)$$

Na sliki 3 je prikazan priključni prerez kotnih zvarov s potekom napetosti. Prerez je obremenjen z upogibnim momentom in prečno silo.



Slika 3: Napetostno stanje v priključku T profila na temeljno ploščo

## 3.2 Kontrola zvarov na utrujanje

Kontrolo bomo izvedli po standardu EN 1993-1-9 [6]. V splošnem določimo ekvivalentni obremenitveni cikel na podlagi več ciklov z različnimi razlikami napetosti. V našem primeru bomo upoštevali le en deterministični cikel.

### 3.2.1 Določitev razlik napetosti

Za posamezne kritične točke zvarov določimo razlike napetosti. Največje in najmanjše napetosti določimo za primera največje in najmanjše zunanje obremenitve. Zanemarimo  $\tau_{\perp}$  in  $\sigma_{\parallel}$ .

$$\Delta\sigma_{E,2} = \sigma_{wf \max} - \sigma_{wf \min} = \sigma_{\perp \max} - \sigma_{\perp \min} \quad (10)$$

$$\Delta\tau_{E,2} = \tau_{wf \max} - \tau_{wf \min} = \tau_{\parallel \max} - \tau_{\parallel \min} \quad (11)$$

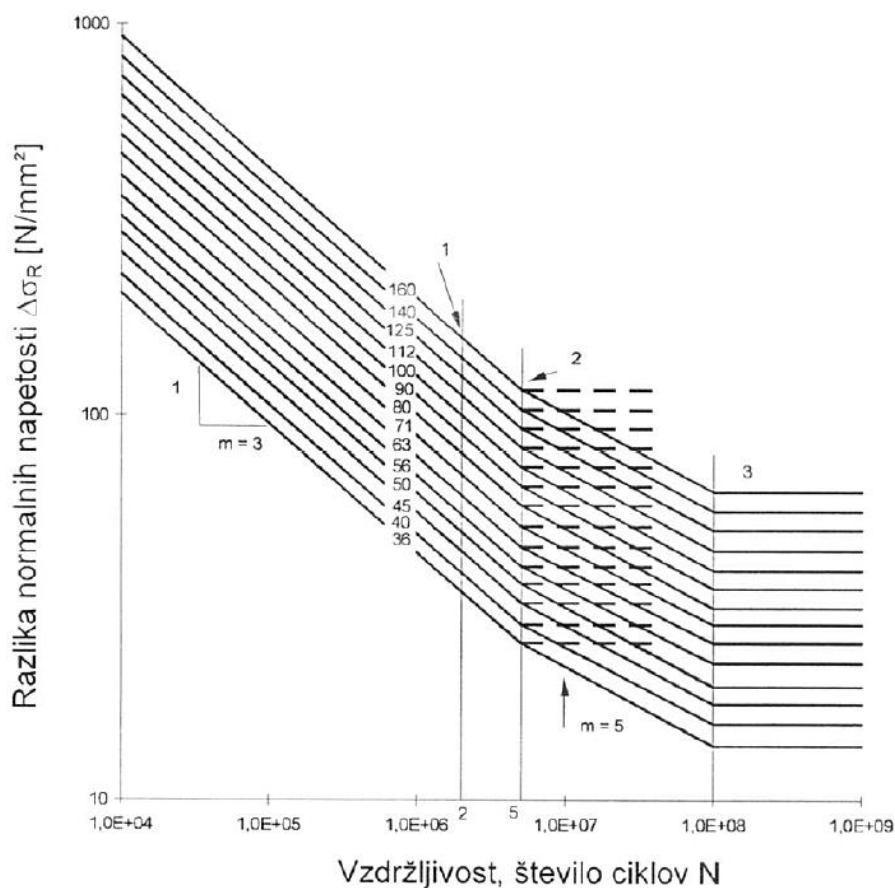
### 3.2.2 Določitev trdnosti utrujanja

Trdnost utrujanja  $\Delta\sigma_R$  je odvisna od konstrukcijskega detajla (oznake 36 do 160). Oznaka detajla hkrati pomeni razliko napetosti  $\Delta\sigma_C$  oz.  $\Delta\tau_C$ , ki jo spoj zdrži  $2 \cdot 10^6$  ciklov (oznaka 1). Krivulje trdnosti utrujanja so podane na slikah 4 in 5, konstrukcijski detajli z opisom in oznakami pa na slikah 6 do 11.

Enačba krivulje trdnosti utrujanja za normalne napetosti

$$\Delta\sigma_R^m \cdot N_R = \Delta\sigma_C^m \cdot 2 \cdot 10^6 \quad (12)$$

Za  $N \leq 5 \cdot 10^6$  je eksponent  $m = 3$ .

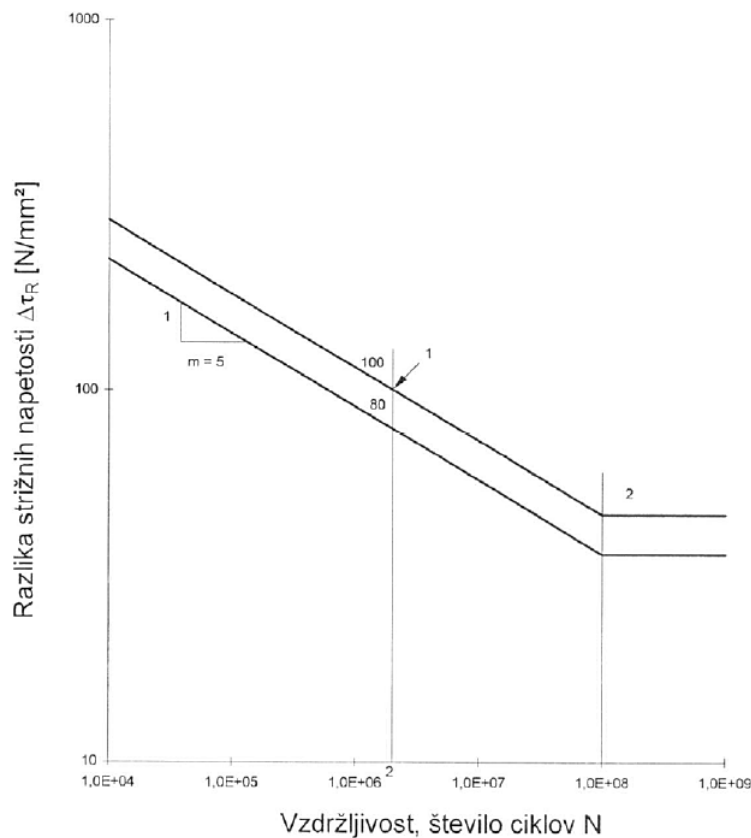


Slika 4: Krivulje trdnosti utrujanja za razlike normalnih napetosti

Enačba krivulje trdnosti utrujanja za strižne napetosti

$$\Delta\tau_R^m \cdot N_R = \Delta\tau_C^m \cdot 2 \cdot 10^6 \quad (13)$$

Za  $N \leq 10^8$  je eksponent  $m = 5$



Slika 5: Krivulje trdnosti utrujanja za razlike strižnih napetosti

### 3.2.3 Kontrola utrujanja

Kontrola za primer normalnih napetosti

$$\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\frac{\Delta\sigma_R}{\gamma_{Mf}}} \leq 1 \quad (14)$$

Kontrola za primer strižnih napetosti

$$\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\tau_E}{\frac{\Delta\tau_R}{\gamma_{Mf}}} \leq 1 \quad (15)$$

Kontrola za primer kombinacije napetosti

$$\left( \frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\frac{\Delta\sigma_R}{\gamma_{Mf}}} \right)^3 + \left( \frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\tau_{E,2}}{\frac{\Delta\tau_R}{\gamma_{Mf}}} \right)^5 \leq 1 \quad (16)$$

Upoštevamo parcialna koeficienta  $\gamma_{Mf} = 1,25$  in  $\gamma_{Ff} = 1$ . Podrobnosti so pojasnjene v standardu [6].

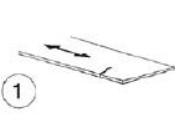

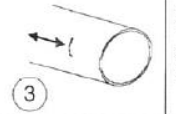


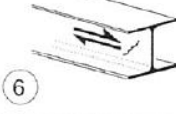



Izpolnjena morata biti tudi pogoja

$$\Delta\sigma_{E,2} \leq 1,5 \cdot f_y \quad (17)$$

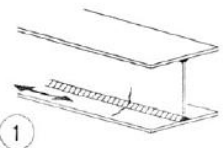
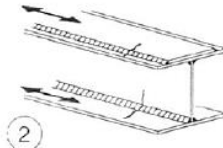
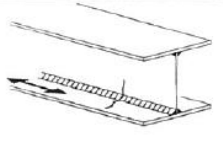
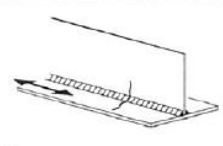
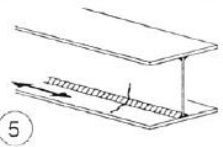
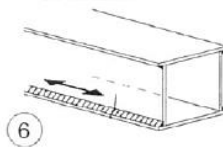
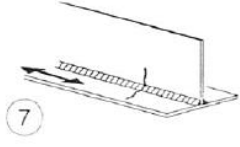
$$\Delta\tau_{E,2} \leq 1,5 \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}} \quad (18)$$

$f_y$  [MPa]      meja plastičnosti osnovnega materiala

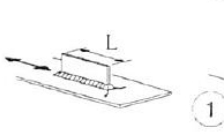
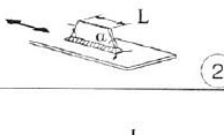

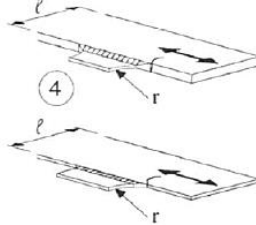
Kategor. detajla	Konstruksijski detajl	Opis	Zahteve
160	  	<p><u>Valjani in ekstrudirani izdelki:</u></p> <p>1) pločevine in trakovi                  2) vročevaljani profili                  3) brezšivni votli profili, pravokotni ali okrogli</p>	<p>Detajli 1) do 3):</p> <p>Ostri robovi in površinske napake, popravljene z brušenjem, dokler niso odpravljene ali je dosežen gladek prehod.</p>
140		<p><u>Mehansko ali plamensko rezane pločevine:</u></p> <p>4) material, rezan avtomatsko plamensko ali mehansko, z naknadno obdelavo</p>	<p>4) Vse vidne robne nepravilnosti odstranjene. Območja rezanja pobrušena ali zunanja plast materiala odstranjena in vsi ostružki odstranjeni.</p> <p>Zareze strojev, npr. od brušenja, so dovoljene le v smeri, vzporedni s smerjo napetosti.</p>
125		<p>5) material, razrezan avtomatsko plamensko z gladko in pravilno površino rezanja ali ročno plamensko z naknadno obdelavo, s katero se odstranijo robne nepravilnosti</p> <p>Avtomatsko plamensko rezanje s kakovostjo reza je v skladu z EN 1090.</p>	<p>Detajla 4) in 5):</p> <p>- Navznoter obrnjeni vogali izboljšani z brušenjem (naklon <math>\leq 74^\circ</math>) ali analizirani z ustreznimi faktorji koncentracije napetosti.</p> <p>- Brez popravil s povarjenjem.</p>
100 m = 5	 	<p>6) in 7)</p> <p>Valjani in ekstrudirani proizvodi kot pri detajlih 1), 2), 3)</p>	<p>Detajla 6) in 7):</p> <p><math>\Delta\tau</math> izračunan s: <math>\tau = \frac{V S(t)}{I t}</math></p>

Za detajle 1–5, izdelane iz vremensko odpornega jekla, se uporabi naslednja nižja kategorija.


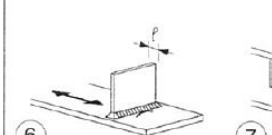
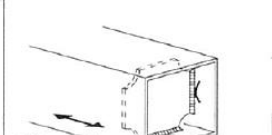
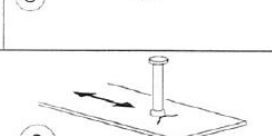
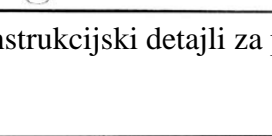
Slika 6: Konstruksijski detajli za osnovni material (Izveleček iz SIST EN 1993)

125			<p><u>Neprekinjen vzdolžni zvar:</u></p> <p>1) dvostranski avtomatski čelni zvar</p> <p>2) avtomatski kotni zvar</p> <p>Konci dodatnih lamel preverjeni glede na detajl 6) ali 7) v preglednici 8.5.</p>	<p><u>Detajla 1) in 2):</u></p> <p>V zvaru niso dovoljene prekinitve varjenja, razen kadar gre za popravilo zvara, ki ga opravi strokovnjak in se z ustreznim preverjanjem zagotovi nadzor popravila.</p>
112			<p>3) dvostranski avtomatski kotni ali čelni zvari, ki vsebujejo prekinitve varjenja</p> <p>4) enostranski avtomatski čelni zvar, narejen s pomočjo neprekinjenega podkorenskega traku, ki ne vsebuje prekinitve varjenja</p>	<p>4) Kadar ta detajl vsebuje prekinitve varjenja, se upošteva kategorija detajla 100.</p>
100			<p>5) ročni kotni ali čelni zvar</p> <p>6) enostranski ročni ali avtomatski čelni zvar, predvsem pri škatlastih nosilcih</p>	<p>5), 6) Pomembno je dobro naleganje med pasnico in stojino. Rob stojine mora biti pripravljen tako, da se lahko doseže polna penetracija zvara brez nevarnosti preboja.</p>
100			<p>7) popravljen avtomatski ali ročni kotni ali čelni zvar kategorij 1) do 6)</p>	<p>7) Izboljšanje z brušenjem, ki ga opravi strokovnjak, da se odstranijo vsi vidni znaki popravila, in ustrezen nadzor lahko povrneta začetno kategorijo.</p>

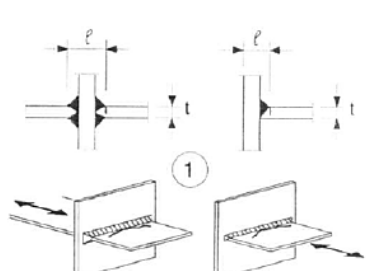
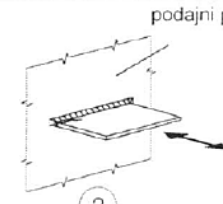
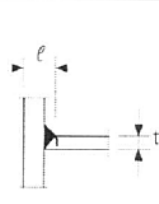
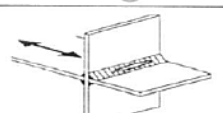
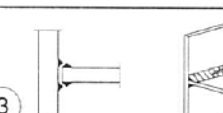
Slika 7: Konstruktivni detajli za vzdolžne zware (Izvelek iz SIST EN 1993)

80	$L \leq 50 \text{ mm}$		<u>Vzdolžni priključki:</u>	<p>Debelina priključka mora biti manjša od njegove višine. V nasprotnem primeru glej preglednico 8.5, detajl 5 ali 6.</p>
71	$50 < L \leq 80 \text{ mm}$			
63	$80 < L \leq 100 \text{ mm}$			
56	$L > 100 \text{ mm}$			
71	$L > 100 \text{ mm}$ $\alpha < 45^\circ$		<p>2) vzdolžni priključek na pločevino ali cev</p>	
80	$r > 150 \text{ mm}$		<p>3) z vzdolžnimi kotnimi zvari privarjena priključna pločevina s polmerom prehoda na osnovno pločevino ali cev, zadnji del kotnega zvara je ojačen (polna penetracija), dolžina ojačitve zvara <math>&gt; r</math></p> <p>ojačena dolžina</p>	<p><u>Detajla 3) in 4):</u></p> <p>Gladek prehod s polmerom <math>r</math>, narejenim z mehansko obdelavo ali s plamenskim rezanjem pred varjenjem, zatem brušenje zvara, vzporedno s smerjo puščice, da se prečni zvar na robu povsem odstrani.</p>
90	$\frac{r}{L} \geq \frac{1}{3}$ ali $r > 150 \text{ mm}$		<p>4) priključna pločevina, privarjena na rob pločevine ali pasnice nosilca</p>	
71	$\frac{1}{6} < \frac{r}{L} < \frac{1}{3}$			
50	$\frac{r}{L} < \frac{1}{6}$			
		L: dolžina priključka kot v detajlih 1, 2 ali 3		

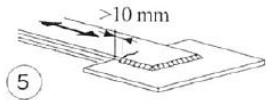
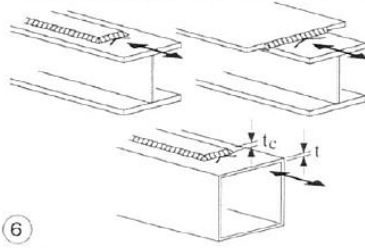

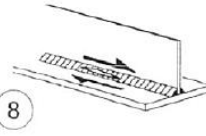
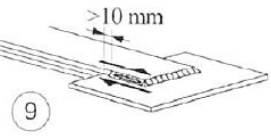
Slika 8: Konstruktivni detajli za vzdolžne priključke (Izvelek iz SIST EN 1993)

40			5) varjeno, brez obdelave, brez polmera prehoda	
80	$l \leq 50 \text{ mm}$		6) varjeni na pločevino	Detalja 6) in 7): Konci zvara morajo biti pazljivo obrušeni, da se odstranijo vse zajede, ki bi lahko bile prisotne.  7) $\Delta\sigma$ se izračuna z uporabo glavnih napetosti, če ojačitev ne sega do pasnice, glej levo ojačitev.
71	$50 < l \leq 80 \text{ mm}$		7) navpične ojačitve, privarjene na valjani ali varjeni nosilec	
71	$50 < l \leq 80 \text{ mm}$		8) diafragma škatlastega nosilca, privarjena na pasnico ali stojino Ni mogoče izvesti pri manjših votlih profilih.	
80			9) vpliv varjenih strižnih čepov na osnovni material	

Slika 9: Konstruktivni detajli za prečne priključke (Izvlček iz SIST EN 1993)

80	$l < 50 \text{ mm}$	vsi $t$ [mm]		Spoji X in T:  1) porušitev ob robu čelnega zvara s polno penetracijo in vseh zvarov z delno penetracijo	1) Preveriti, da je obseg diskontinuitet in geometrijskih nepravilnost v skladu s tolerancami iz EN1090.  2) Pri izračunu $\Delta\sigma$ se uporabi modificirana nazivna napetost.  3) Pri delno penetriranih zvarih sta potrebni dve ločeni oceni. Nevarnost nastanka razpoke v korenu zvara se preveri z napetostmi, opredeljenimi v poglavju 5. Za $\Delta\sigma_w$ se uporabi kategorija 36*, za $\Delta\sigma_w$ pa kategorija 80. Nevarnost nastanka razpoke ob robu zvara se preveri s pomočjo razlike napetosti $\Delta\sigma$ v priključeni (obremenjeni) pločevini.
71	$50 < l \leq 80$	vsi $t$			
63	$80 < l \leq 100$	vsi $t$			
56	$100 < l \leq 120$	vsi $t$			
56	$l > 120$	$t \leq 20$			
50	$120 < l \leq 200$ $l > 200$	$t > 20$ $20 < t \leq 30$			
45	$200 < l \leq 300$ $l > 300$	$t > 30$ $30 < t \leq 50$			
40	$l > 300$	$t > 50$			
Kot detajl 1 v pregl. 8.5				2) porušitev ob robu zvara s koncentracijami napetosti ob robovih priključene pločevine zaradi podajnosti panela	Detalji 1) do 3): Zamik priključenih pločevin ne sme presegati 15 % debeline vmesne pločevine.
36*				3) porušitev v korenu delno penetriranih ali kotnih zvarov T-spojev in polno penetriranih čelnih zvarov T-spojev	

Slika 10: Konstruktivni detajli za T spoje (Izvlček iz SIST EN 1993)

45*	 <p>5</p>		Preklopni varjeni spoji:	Detajla 4) in 5):	
	$t_c < t$	$t_c \geq t$	 <p>6</p>	5) preklopni spoji s kotnimi zvari	- Zvar se konča več kot 10 mm od roba pločevine. - Nevarnost nastanka razpok v strigu se preveri z uporabo detajla 8).
56*	$t \leq 20$	-		Dodatne lamele pri valjanih in varjenih nosilcih:	6) Če je dodatna lamela širša od pasnice, je potreben prečni čelni zvar. Ta zvar je treba pazljivo pobrusiti, da se odstranijo morebitne zajede.
50	$20 < t \leq 30$	$t \leq 20$		6) konci enojnih ali večkratnih lamel s čelnimi zvari ali brez njih	Najmanjša dolžina lamel je 300 mm. Pri krajših priključkih glej detajl 1).
45	$30 < t \leq 50$	$20 < t \leq 30$			
40	$t > 50$	$30 < t \leq 50$			
36	-	$t > 50$			
56	 <p>7</p>		7) dodatne lamele pri valjanih in varjenih nosilcih, 5) $t_c$ je najmanjša dolžina ojačitve zvara.	7) Prečni čelni zvar mora biti pobrušen, da se ustvari gladek prehod v pločevino. Če je $t_c > 20$ mm, mora biti čelni rob pločevine pobrušen v naklonu $\leq 1/4$ .	
80 m=5	 <p>8</p>  <p>9</p>		8) neprekinjeni kotni zvari za prenos strižnega toka, npr. iz stojine v pasnico varjenega polnostenskega nosilca 9) kotni zvari v preklopnih spojih	8) $\Delta t$ se določi na podlagi debeline (korenske mere) zvara. 9) $\Delta t$ se določi na podlagi debeline (korenske mere) zvara ob upoštevanju celotne dolžine zvara. Zvar se konča več kot 10 mm od roba pločevine, glej tudi 4) in 5).	

Slika 11: Preklopni spoji, strižno obremenjeni spoji (Izvlček iz SIST EN 1993)

#### 4. Literatura

- [1] Matek, W., Muhs, D., Wittel, H., Becker, M., Voßiek, J.: Rollof/Matek: Maschinenelemente, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2013.
- [2] Decker: Maschinenelemente - Funktion, Gestaltung und Berechnung, Carl Hanser Verlag, München, 2011
- [3] Niemman, G., Winter, H. Hohn, B.-R: Maschinenelemente, Band 1, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2005.
- [4] Haberhauer, H., Bodenstern, F.: Maschinenelemente-Gestaltung, Berechnung, Anwendung, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2001.
- [5] Steinhilper, W., Sauer, B.: Konstruktionselemente des Maschinenbaus 1, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2012
- [6] EN 1993-1-9: 2005 Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-9: Fatigue, CEN, Brussels, 2005
- [7] SIST EN 1993-1-9: 2005 Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 1-9-del: Utrujanje