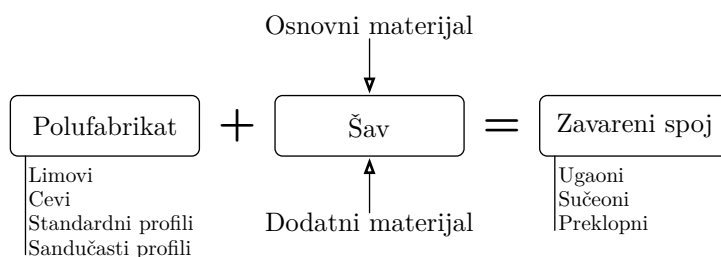


## KONSTRUISANJE MAŠINSKIH DELOVA SA ASPEKTA TEHNOLOGIČNOSTI OBLIKA

### Konstruisanje zavarenih spojeva

Zavarivanje je postupak spajanja dva ili više polufabrikata (limovi, standardni profili i delovi dobijeni livenjem ili kovanjem) u jednu celinu posredstvom šava (Slika 1). Prethodno pripremljeni krajevi polufabrikata se lokalno zagrevaju zajedno sa dodatnim materijalom do rastopljenog stanja.



Slika 1

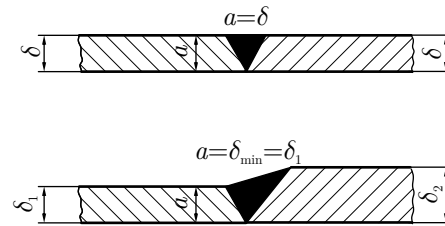
Zavarivanje omogućuje laku izradu mašinskih delova, elemenata i konstrukcija složenog oblika i različitih dimenzija (velikih i malih). U poređenju sa livenjem, kovanjem i obradom skidanja strugotine, zavarene konstrukcije imaju znatno manju masu i ekonomičniju proizvodnju. Zavarivanje se najviše koristi za male serije proizvoda. Potpunim ili delimičnim automatizovanjem procesa zavarivanja mogu se proizvoditi i velike serije proizvoda. Velika čvrstoća i krutost zavarenih konstrukcija ostvaruje se postavljanjem polufabrikata tamo gde će maksimalno biti iskorišćeni sa aspekta krutosti i/ili čvrstoće. Zbog ovih dobrih karakteristika zavarivanje ima veliki domen primene u različitim granama industrije: mostogradnja, brodogradnja, automobilska industrija, procesna industrija i opšte mašinske konstrukcije. Od zavarenih konstrukcija pored čvrstoće i krutosti se često zahteva i hermetičnost (brodogradnja i procesna industrija).

Zavarivanje je postalo jedno od najmasovnijih vidova spajanja, jer se tehnologijom zavarivanja mogu uspešno spojiti skoro svi metali i legure u mašinskoj industriji. Generalno, čelici sa manjim procentom ugljenika se lakše zavaruju. Zavareni spojevi imaju i nedostatke. Kvalitet spoja zvisi od izabranog dodatnog materijala i postupka zavarivanja kao i od sposobnosti i savesnosti zavarivača. Redovnom kontrolom zavarivača i zavarenih spojeva ovi nedostaci se mogu delimično ili u potpunosti eliminisati. U zavarenim spojevima se mogu pojaviti zaostali naponi, deformacije i naprsline, kao rezultat konstrukcionih i/ili tehnoloških propusta.

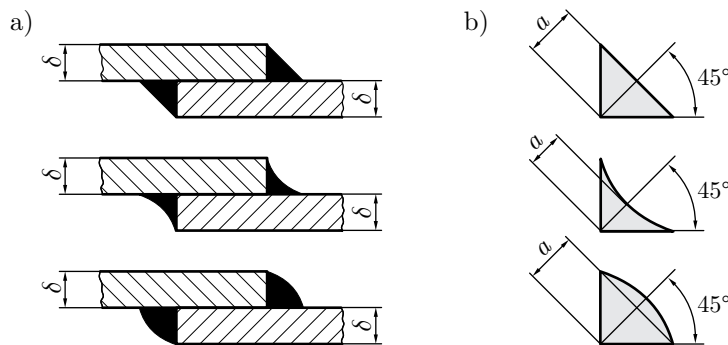
### Vrste zavarenih spojeva

Prema relativnom položaju delova koji se spajaju zavareni spojevi mogu biti: sučeoni, preklopni i ugaoni. Kod **sučeonih spojeva**, spajani delovi leže u istoj ravni. Oblici i dimenzije žlebova koji treba da se pripreme pre formiranja spoja propisani su standardom (tabela u nastavku). Debljina šava  $a$  merodavna za proveru nosivosti (čvrstoće) sučeono zavarenih spojeva odgovara debljini delova koji se spajaju ( $a = \delta_{\min}$ ).

Naziv i oznaka šava	Oblik šava	Naziv i oznaka šava	Oblik šava
Rubni šav $s \leq 2\text{mm}$		K-šav $s = 5 \dots 45\text{mm}$	
I-šav $s \leq 1 \dots 5\text{mm}$		U-šav $s = 25 \dots 45\text{mm}$	
Ugaoni šav $s \leq 15\text{mm}$		J-šav $s \geq 25\text{mm}$	
V-šav $s = 5 \dots 15\text{mm}$		Dvostruki U-šav $s \geq 25\text{mm}$	
1/2 V-šava $s = 5 \dots 15\text{mm}$		Dvostruki J-šav $s \geq 25\text{mm}$	
X-šav $s = 5 \dots 45\text{mm}$			

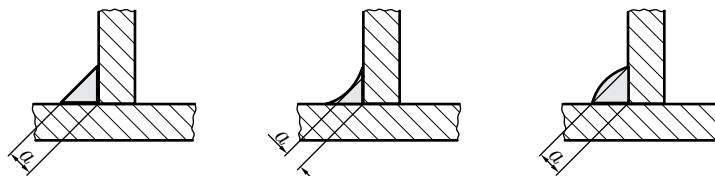


Kod **preklopnih spojeva** delovi koji se spajaju leže u paralelnim ravnima. Ovi spojevi se ostvaruju ugaonim šavovima, Slika 2a. Debljina ugaonog šava merodavna za proveru nosivosti (čvrstoće) preklopnih spojeva prikazana je na Slici 2b.



Slika 2 a) Preklopni spojevi, b) merodavna debljina šava

Kod **ugaonih spojeva** delovi koji se spajaju leže u ravnima koje se seku, Slika 3. Kao i kod preklopnih spojeva, debljina šava merodavna za proračun čvrstoće meri se na simetrali pravog ugla.



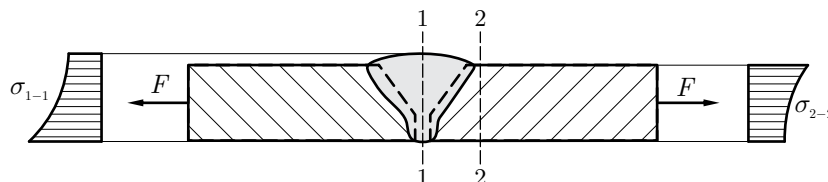
Slika 3 Ugaoni spojevi

### Deformacije, zaostali naponi i koncentracija napona

Opterećenje se sa jednog spojenog dela na drugi prenosi preko šava. šav je *prepreka*, odnosno veza preko koje naponske linije prelaze sa jednog spojenog dela na drugi. Ove linije se u šavu zgušnjavaju i menjaju pravac što u osnovi dovodi do uvećanja napona u jednom delu preseka šava na račun smanjivanja u drugom. Ovo stanje je kod zavarenih spojeva izraženije u poređenju sa složenim oblicima

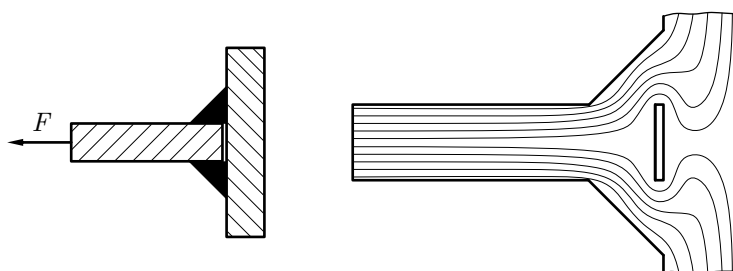
drugih mašinskih delova.

**Sučeonni zavareni spoj** ostvaren V šavom i izložen zatezanju je bez naročitih diskontinuiteta, ali je ipak koncentracija napona prisutna u značajnoj meri. U preseku 1-1 napon je povećan u korenu šava a smanjen u zoni temena šava. U preseku 2-2 napon je povećan na prelazu ispupčenja u ravnu površinu.



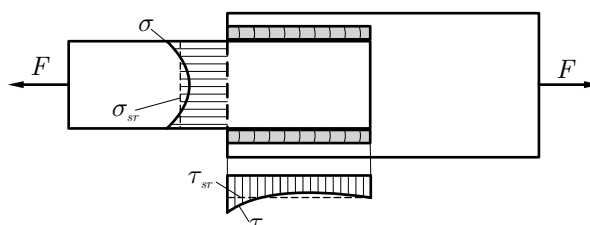
Slika 4a Koncentracija napona kod sučeonih zavarenih spojeva

**Ugaoni zavareni spojevi** mogu biti veoma jaki izvori koncentracije napona. Intenzitet koncentracije napona zavisi od položaja šava, od vrste napreznja, od oblika spoja i td. Na Slici 4b prikazana je raspodela napona kod ugaonog zavarenog spoja koji je ostvaren pomoću dva simetrična ugaona šava izloženih zatezanju. Prostor između šavova nije zavaren i on deluje kao prslina u kontinualnoj materijalnoj sredini. Naponske linije je zaobilaze, zgušnjavaju se i na tom mestu stvaraju uslove za početak prsline.



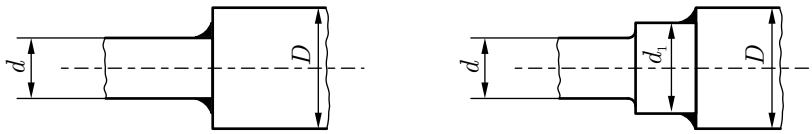
Slika 4b Koncentracija napona u ugaonom zavarenom spoju

**Preklopni zavareni spojevi** se ostvaruju preklapanjem limova i spajanjem pomoću ugaonih šavova. Osim koncentracije napona koji su posledica uticaja ugaonog šava ovde postoji i neravnomernost raspodele napona po dužini šava (Slika 5). Usled toga su preklopni zavareni spojevi sa najjačom koncentracijom napona tj. sa najmanjom jediničnom nosivošću. Ipak ovi zavareni spojevi su široko zastupljeni u primeni jer se najlakše realizuju i relativno lako se nadoknadi izgubljena jedinična nosivost povećavanjem dužine šava i dodavanjem rebara i drugih ojačanja.



Slika 5 Raspodela napona duž preklopnog zavarenog spoja

Na Slikama 4 i 5 pokazano je da zavareni spojevi imaju sopstvenu koncentraciju napona, pa kada joj se doda i koncentracija napona usled promene oblika mašinskog dela (klasična koncentracija napona), može doći do naglog pada čvrstoće zavarenog spoja, Slika 6.

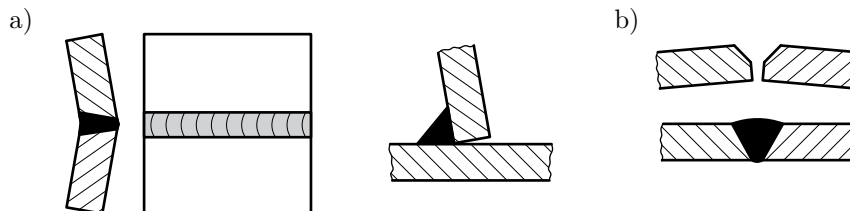


Slika 6 Uticaj geometrijske koncentracije napona na čvrstoću zavarenog spoja

Zbog lokalnog zagrevanja i naknadnog hlađenja u zavarenim spojevima generišu se zaostali naponi i trajne deformacije. Ove pojave se reflektuju u promenama mera i oblika zavarenog spoja, a zaostali naponi u eksploatacionim uslovima sabiraju se sa radnim naponima. Zbog toga je neophodno primeniti odgovarajuće mere za ublažavanje deformacija i zaostalih napona. Ove mere mogu biti konstrukcione i tehnološke prirode. Prve mere propisuje konstruktor, a druge tehnolog. Generalno, zaostali naponi i trajne deformacije nastaju usled neravnomernog hlađenja istopljene mase šava. U tom cilju pri konstruisanju zavarenih spojeva treba se pridržavati sledećih preporuka:

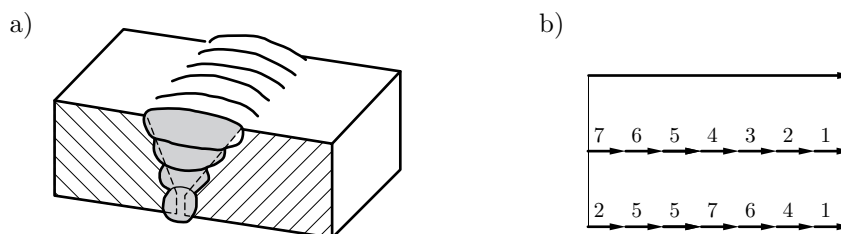
- izbegavati naglo skretanje naponskih linija sila u šavu zavarenog spoja,
- izbegavati postavljanje šava u zonu geometrijske koncentracije napona,
- kod promenljivih radnih napona i velikih statičkih napona obavezno je zavarivanje korena šava,
- izbegavati nagomilavanje mase šava. Većoj masi šava odgovaraju veće deformacije i zaostali naponi, Slika 7a.

Deformacije prikazane na Slici 7a mogu se potpuno ili delimično sprečiti ako se pre zavarivanja spajani delovi postave u položaj koji je suprotan očekivanoj deformaciji, Slika 7b.



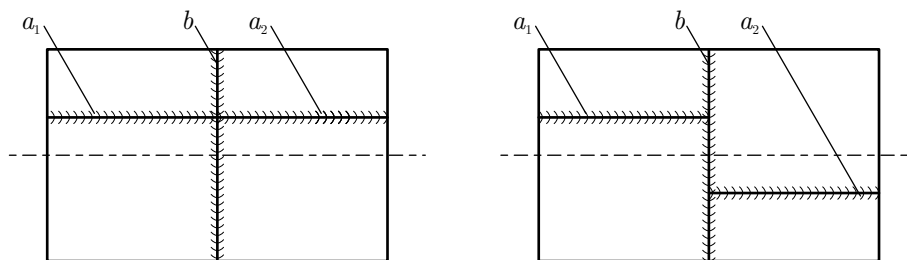
Slika 7 a) Deformacije zavarenog spoja, b) položaj delova pre zavarivanja u cilju sprečavanja deformacija

Kod šavova velike debljine treba propisati zavarivanje u više tankih slojeva, Slika 8a. Šavove velike dužine treba spojiti prema tačno utvrdjenom redosledu, a ne u jednom prolazu, Slika 8b.

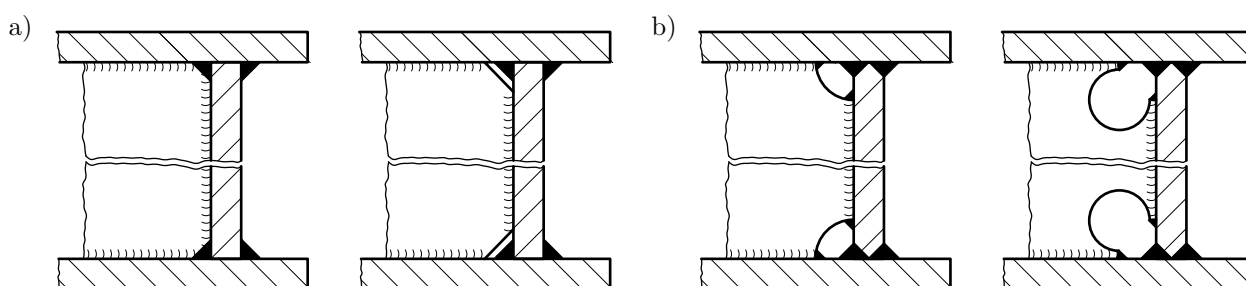


Slika 8 a) Višeprolazno zavarivanje, b) spajanje šavova velike dužine

U cilju smanjenja nagomilavanja mase šava treba izbegavati ukrštanje zavarenih spojeva, Slika 9 i Slika 10. Odsecanjem krajeva limova izbegnuto je uticanje sastavaka u uglovima (Slika 10a desno).



**Slika 9** Nepotrebno nagomilavanje sastavaka na jednom mestu (leva skica) može se izbeći (desna skica); sa  $a$  su obeleženi uzdužni sastavci, sa  $b$  poprečni



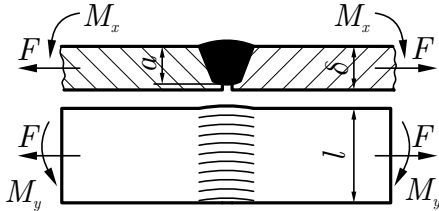
**Slika 10**

Ovo rešenje je pogodno za statičko naprezanje. Na Slici 10b prikazani su oblici zavarenih spojeva pogodni za promjenjiva naprezanja (desno – bolje i skuplje).

### Radni i kritični naponi zavarenog spoja

Za proveru nosivosti zavarenog spoja sa aspekta zapreminske čvrstoće merodavne su nominalne vrednosti napona u šavu zavarenog spoja. Ovi naponi određuju se na osnovu izraza iz Otpornosti materijala saglasno odgovarajućoj vrsti zavarenog spoja i vrsti naprezanja.

#### Sučeonni spoj



Nominalni naponi:

– Zatezanje

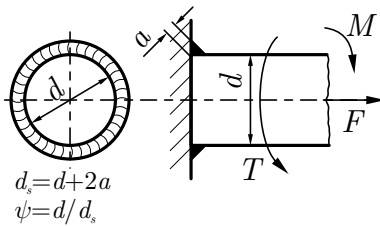
$$\sigma_z = \frac{F}{a \cdot l_z}; \quad l_z = l - 2a$$

– Savijanje

$$\sigma_x = \frac{M_x}{W_x}; \quad \sigma_y = \frac{M_y}{W_y}$$

$$W_x = \frac{l_z \cdot a^2}{6}; \quad W_y = \frac{a \cdot l_z^2}{6}$$

#### Ugaoni spojevi



Nominalni naponi:

– Zatezanje

$$\sigma_z = \frac{F}{A}; \quad A = \frac{d_s^2 \pi}{4} (1 - \psi^2)$$

– Savijanje

$$\sigma_s = \frac{M}{W}; \quad W = \frac{d_s^3 \pi}{32} (1 - \psi^4)$$

– Uvijanje

$$\tau = \frac{T}{W_p}; \quad W_p = \frac{d_s^3 \pi}{16} (1 - \psi^4)$$

Nominalni naponi:

– Zatezanje

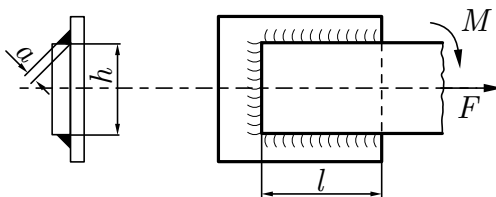
$$\sigma_z = \frac{F}{A}; \quad A = \sum a_i \cdot l_i$$

– Savijanje

$$\sigma_s = \frac{M}{W} = \frac{M}{I_x} \cdot y_{\max}$$

$$I_x = \sum (I_{si} + A_i \cdot y_i^2)$$

#### Preklopni spoj



Nominalni naponi:

– Smicanje

$$\sigma_z = \frac{F}{A}; \quad A = (2l + h) a$$

– Uvijanje

$$\tau = \frac{M}{a [l_z (h + a) + h^2/6]};$$

$$l_z = l - a$$

Kritični naponi su mehaničke karakteristike (statičke ili dinamičke) materijala šava korigovane odgovarajućim uticajnim faktorima. U poređenju sa opštim korekcionim faktorima za određivanje izdržljivosti i čvrstoće mašinskog dela, ovi korekcionni faktori su drugačijeg značenja. Na izdržljivost zavarenog spoja nije od značaja uticaj hrapavosti površine i površinskog ojačanja. Naročito je veliki uticaj koncentracije napona i prisustvo grešaka u šavu. Ako se zavaruju dva različita materijala, merodavni su kritični naponi dobijeni ispitivanjem standardne epruvete od slabijeg materijala.

Kritični naponi statički opterećenih zavarenih spojeva:

$$\sigma_{Tz} = \sigma_T \cdot \xi_{T1} \cdot \xi_{T2} \qquad \tau_{Tz} = \tau_T \cdot \xi_{T1} \cdot \xi_{T2}$$

gde su:

$\sigma_T$  i  $\tau_T$  – kritični naponi (napon tečenja) dobijeni ispitivanjem standardne epruvete,

$\xi_{T1}$  – faktor oblika zavarenog spoja za proveru statičke čvrstoće ,

$\xi_{T2}$  – faktor kvaliteta zavarenog spoja za proveru statičke čvrstoće.

Korekcija kritičnih napona dinamički opterećenih zavarenih spojeva se ostvaruje po istom principu kao i pri određivanju kritičnih napona za mašinski deo. Faktor dinamičke čvrstoće zavarenog spoja:

$$K_{Dz} = \frac{1}{\xi_1 \cdot \xi_2},$$

gde su:

$\xi_1$  – faktor oblika zavarenog spoja za proveru dinamičke čvrstoće ,

$\xi_2$  – faktor kvaliteta zavarenog spoja za proveru dinamičke čvrstoće.

Da bi zavareni spoj imao potrebnu nosivost sa aspekta zapreminskog razaranja zavarenog spoja potrebno je ispuniti sledeći uslov:

$$S = \frac{[\sigma]_z}{\sigma} \geq S_{\min} (2 \dots 3) \qquad S = \frac{[\tau]_z}{\tau} \geq S_{\min} (2 \dots 3).$$