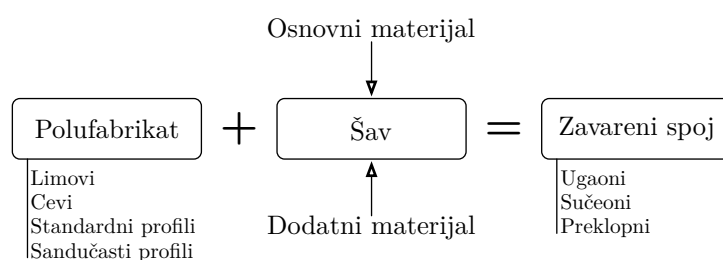


KONSTRUISANJE MAŠINSKIH DELOVA SA ASPEKTA TEHNOLOGIČNOSTI OBLIKA

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

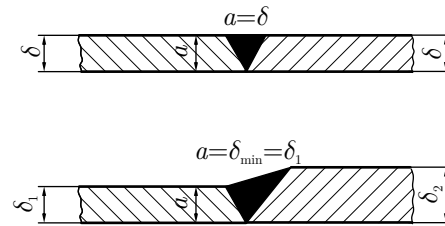
Zavarivanje omogućuje laku izradu mašinskih delova, elemenata i konstrukcija složenog oblika i različitih dimenzija (velikih i malih). U poređenju sa livenjem, kovanjem i obradom skidanja strugotine, zavarene konstrukcije imaju znatno manju masu i ekonomičniju proizvodnju. Zavarivanje se najviše koristi 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.

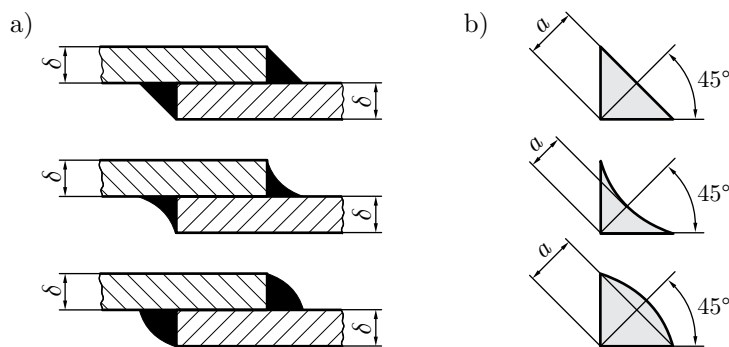
Vrste zavarenih spojeva

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 $s < 2\text{mm}$		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 $s = 5 \dots 45\text{mm}$			

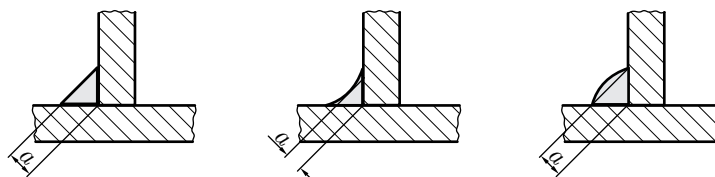


Kod **preklopnih spojeva** delovi koji se spajaju leže u paralelnim ravnima. Ovi spojevi se ostvaruju ugaonim šavovima, Slika 2a. Debljina ugaonog šava merodavna za proveru nosivosti (čvrstoće) preklopnih spojeva prikazana je na Slici 2b.



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.

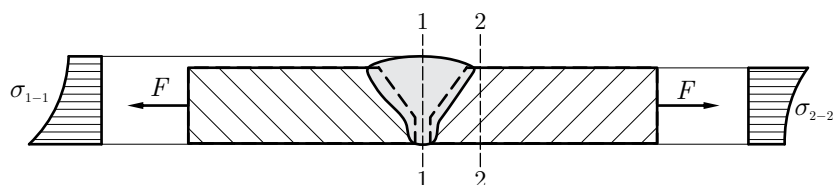


Slika 3 Ugaoni spojevi

Deformacije, zaostali naponi i koncentracija napona

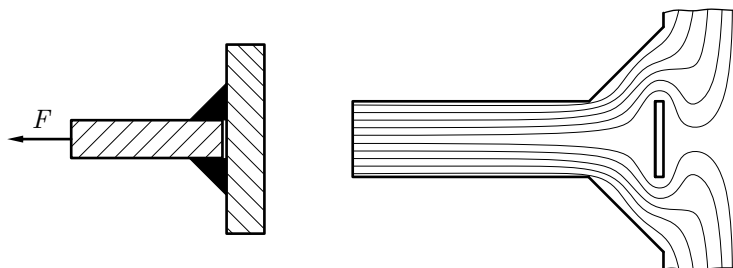
Opterećenje se sa jednog spojenog dela na drugi prenosi preko šava. šav je *prepreka*, odnosno veza preko koje naponske linije prelaze sa jednog spojenog dela na drugi. Ove linije se u šavu zgušnjavaju i menjaju pravac što u osnovi dovodi do uvećanja napona u jednom delu preseka šava na račun smanjivanja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



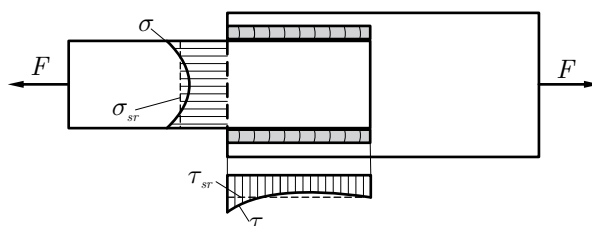
Slika 4a Koncentracija napona kod sučeonih zavarenih spojeva

Ugaoni zavareni spojevi mogu biti veoma jaki izvori koncentracije napona. Intenzitet koncentracije napona zavisi od položaja šava, od vrste naprezanja, 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.



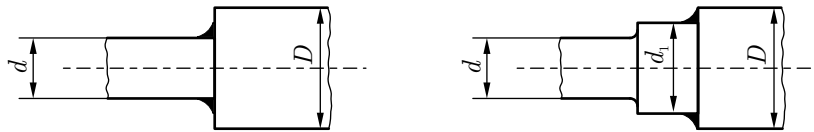
Slika 4b Koncentracija napona u ugaonom zavarenom spoju

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.

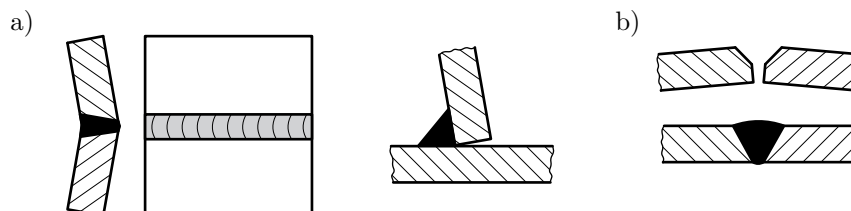


Slika 6 Uticaj geometrijske koncentracije napona na čvrstoću zavarenog spoja

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:

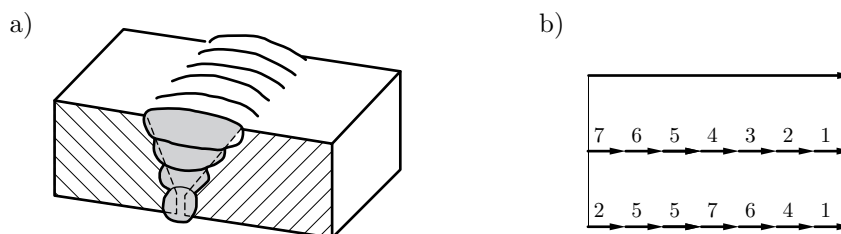
- izbegavati naglo skretanje naponskih linija sila u šavu zavarenog spoja,
- izbegavati postavljanje šava u zonu geometrijske koncentracije napona,
- kod promenljivih radnih napona i velikih statičkih napona obavezno je zavarivanje korena šava,
- izbegavati nagomilavanje mase šava. Većoj masi šava odgovaraju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



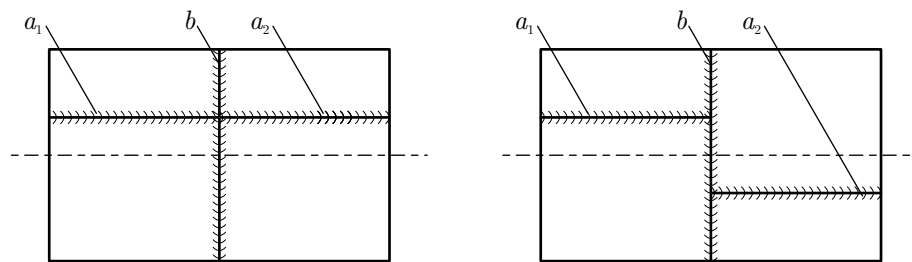
Slika 7 a) Deformacije zavarenog spoja, b) položaj delova pre zavarivanja u cilju sprečavanja deformacija

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

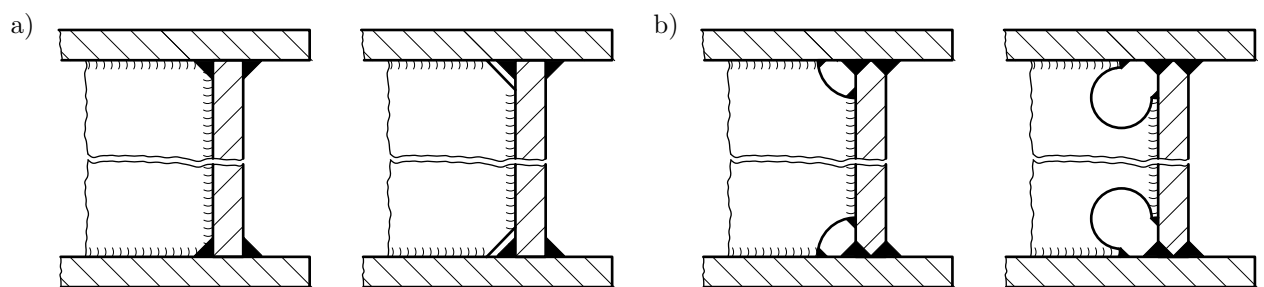


Slika 8 a) Višeprolazno zavarivanje, b) spajanje šavova velike dužine

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



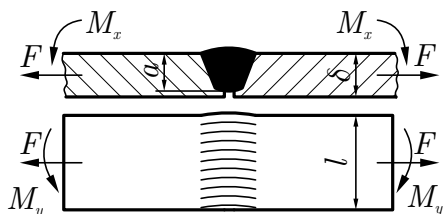
Slika 10

Ovo rešenje je pogodno za statičko naprezanje. Na Slici 10b prikazani su oblici zavarenih spojeva pogodni za promenljiva 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

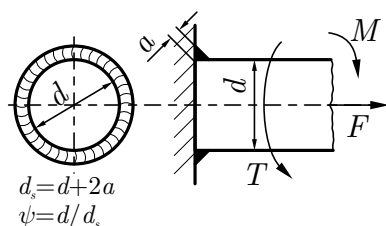
$$\sigma_z = \frac{F}{a \cdot l_z}; l_z = l - 2a$$

– Savijanje

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

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

Ugaoni spojevi



Nominalni naponi:

– Zatezanje

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

– Savijanje

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

– Uvijanje

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

Nominalni naponi:

– Zatezanje

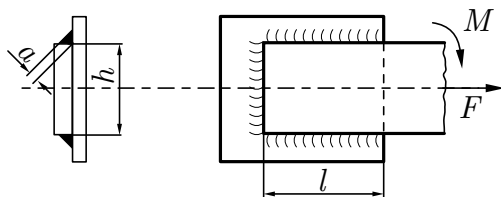
$$\sigma_z = \frac{F}{A}; A = \sum a_i \cdot l_i$$

– 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

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

– 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 korekциони 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, mero-davni 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:

σ_T i τ_T – kritični naponi (napon tečenja) dobijeni ispitivanjem standardne epruvete,

ξ_{T1} – faktor oblika zavarenog spoja za proveru statičke čvrstoće ,

ξ_{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 (karakteristični slučajevi Smitovog dijagrama). Faktor dinamičke čvrstoće zavarenog spoja:

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

gde su:

ξ_1 – faktor oblika zavarenog spoja za proveru dinamičke čvrstoće ,

ξ_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:

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