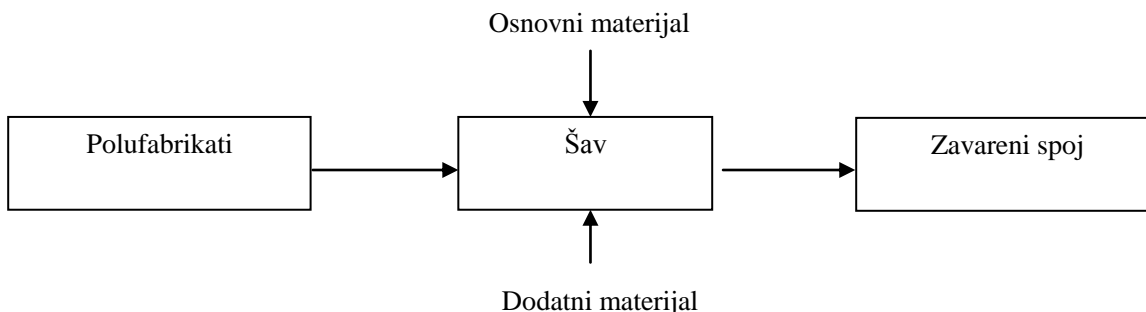


KONSTRUISANJE ZAVARENIH SPOJEVA

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 1.

Debljina šava „a“ merodavna za proveru nosivosti (čvrstoće) sučeono zavarenih spoja odgovara debljini delova koji se spajaju ($a = \delta_{\min}$).


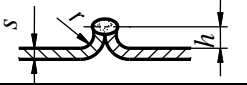

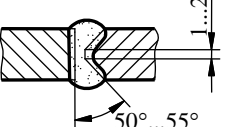



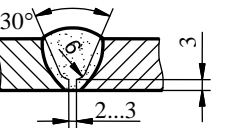

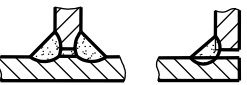

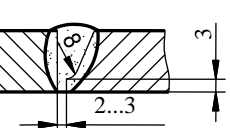

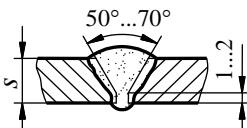

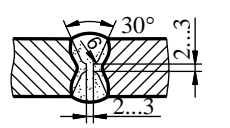

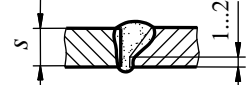

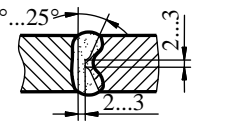

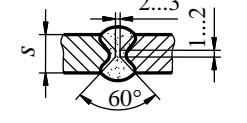
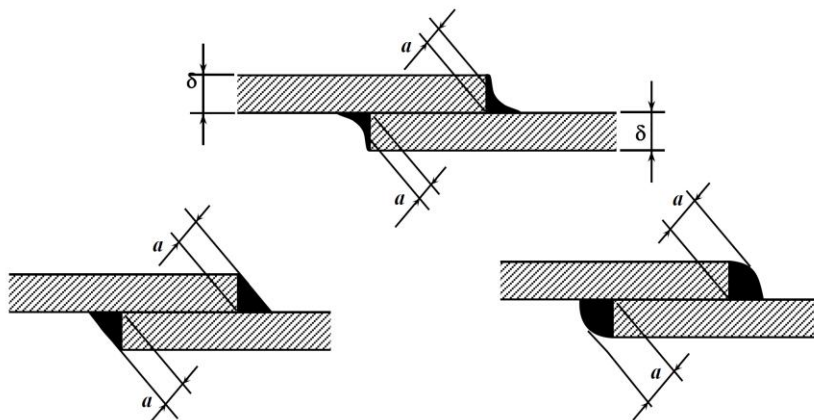
Naziv i oznaka šava	Oblik šava	Naziv i oznaka šava	Oblik šava
Rubni šav  $s < 2\text{mm}$		K-šav  $s = 5 \dots 45\text{mm}$	
I-šav  $s \leq 1 \dots 5\text{mm}$		U-šav  $s = 25 \dots 45\text{mm}$	
Ugaoni šav  $s \leq 15\text{mm}$		J-šav  $s \geq 25\text{mm}$	
V-šav  $s = 5 \dots 15\text{mm}$		Dvostruki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

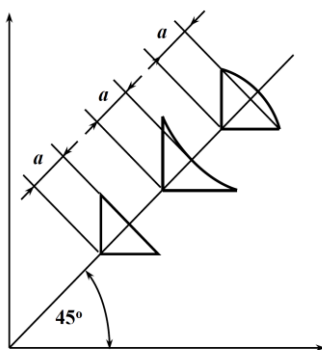
Tabela 1. Sučeoni spojevi

Kod preklopnih spojeva delovi koji se spajaju leže u paralelnim ravnima. Ovi spojevi se ostvaruju ugaonim šavovima, sl. 2.



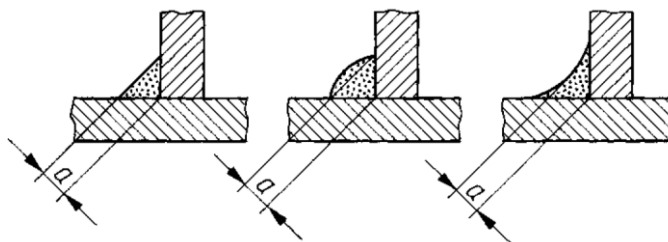
Slika 2. Preklopni spojevi

Debljina šava merodavna za proveru nosivosti (čvrstoće) preklopnih spojeva prikazana je na slici 3.



Slika 3. Merodavna debljina ugaonih šavova

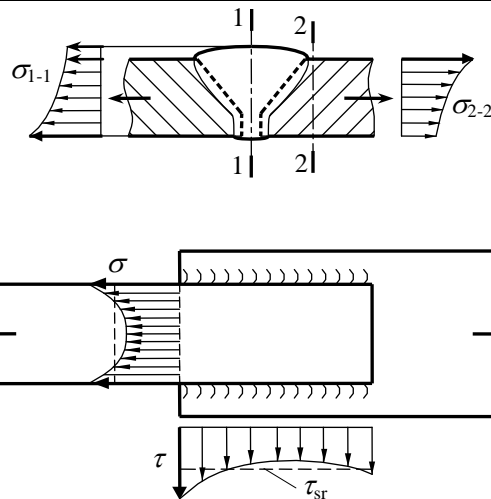
Kod ugaonih spojeva delovi koji se spajaju leže u ravnima koje se seku, slika 4.



Slika 4. Ugaoni spojevi

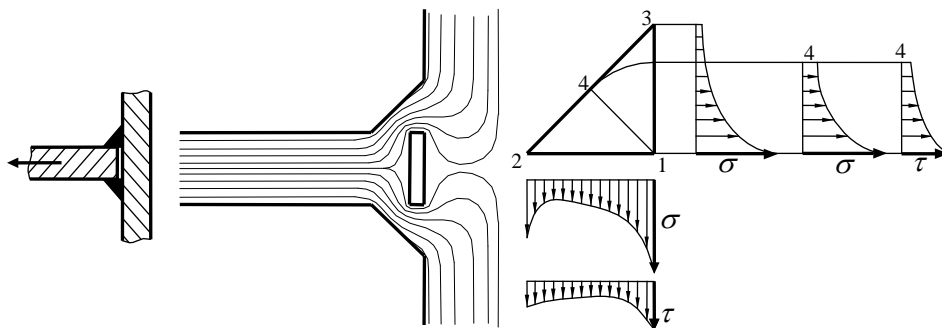
Deformacije, zaostali naponi i koncentracija napona

U zavarenim spojevima koncentracija napona je veoma izražena zbog složenog oblika šava koji uslovljava naglo skretanje naponskih linija. Ona je najviše izražena u korenu šava, slika 5.



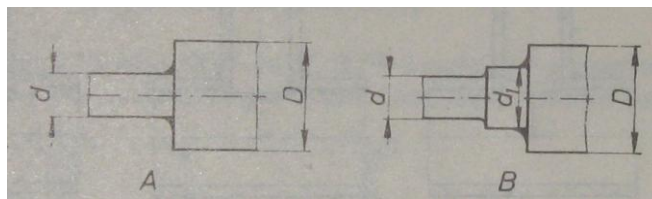
Slika 5. Koncentracija napona kod zavarenih spojeva

Na čvrstoću (nosivost) zavarenih spojeva veliki uticaj ima tok naponskih linija. Naglo skretanje naponskih sila znatno smanjuje čvrstoću šava. Ovaj problem je najviše izražen kod ugaonih i preklopnih spojeva, slika 6.



Slika 6. Koncentracija napona kod zavarenih spojeva

Na slikama 5 i 6 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 7.



Slika 7. 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.

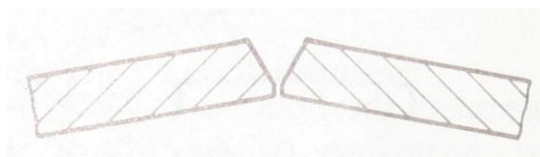
Generalno, zaostali naponi i trajne deformacije nastaju usled neravnomernog hlađenja istopljene mase šava. U tom cilju pri konstruisanju zavarenih spojeva treba se pridržavati sledećih preporuka:

- 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 8.



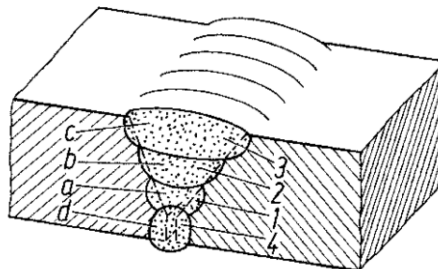
Slika 8. Deformacije zavarenog spoja

Deformacije prikazane na slici 8 mogu se potpuno ili delimično sprečiti postavljanjem spojenih delova u položaj koji je suprotan očekivanoj deformaciji, slika 9.



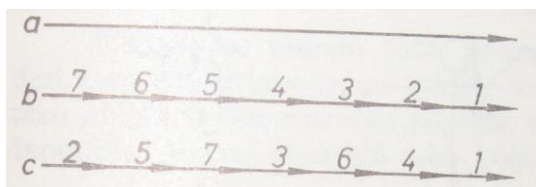
Slika 9. Položaj delova pre zavarivanja u cilju sprečavanja deformacija

Kod šavova velike debljine treba propisati zavarivanje u više tankih slojeva, slika 10.



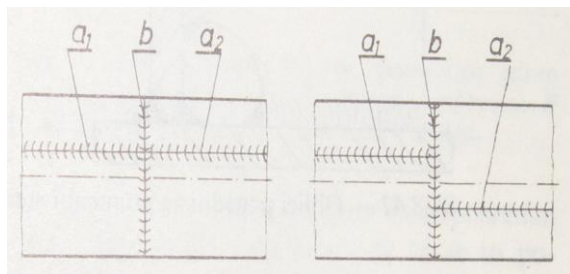
Slika 10.

Šavove velike dužine treba spojiti prema tačno utvđenom redosledu, a ne u jednom prolazu, slika 11.

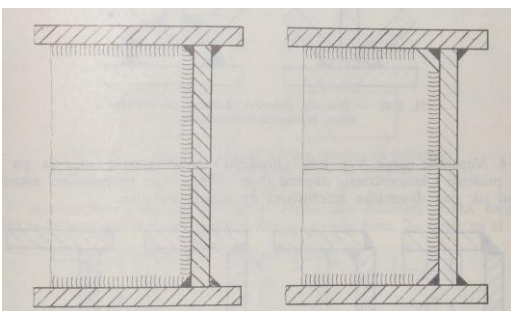


Slika 11. Spajanje šavova velike dužine

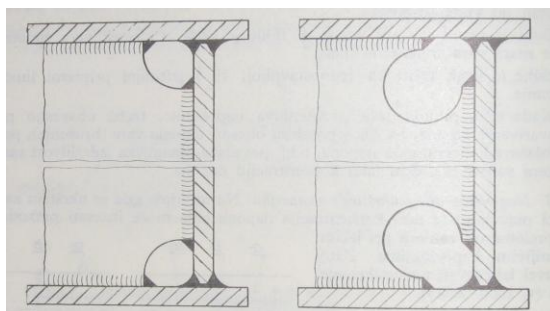
U cilju smanjenja nagomilavanja mase šava treba izbegavati ukrštanje zavarenih spojeva, slika 12.i slika 13.



Slika 12. Nepotrebno nagomilavanje sastavaka na jednom mestu (leva skica) može se izbeći (desna skica); sa a su obeleženi uzdužni sastavci, sa b poprečni



Odsecanjem krajeva limova izbegnuto je uticanje sastavaka u uglovima (desno);
Rešenje je pogodno za statičko naprezanje



Oblici pogodni za promenljiva naprezanja
(desno)-bolje i skuplje

Slika 13.

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 naprezanja, slika 14.

	SKICA	Nominalni napon
SUČEONI		Istezanje silom F : $\sigma_z = F / (a \cdot l_z)$ $l_z = l - 2a$ Savijanje: $\sigma_x = \frac{6M_x}{l_z a^2}$; $\sigma_y = \frac{6M_y}{a l_z^2}$
UGAONI		Istezanje: $\sigma_z = \frac{F}{A} = \frac{4F}{\pi d_s^2 (1 - \psi^2)}$ Savijanje: $\sigma_s = \frac{M}{W} = \frac{32M}{\pi d_s^3 (1 - \psi^4)}$ Uvijanje: $\tau = \frac{T_t}{W_p} = \frac{16T_t}{\pi d_s^3 (1 - \psi^4)}$
		Istezanje: $\sigma_z = \frac{F}{A} = \frac{F}{\sum a_i l_{zi}}$ 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		Smicanje: $\tau = \frac{F}{(2l + h) \cdot a}$ Uvijanje: $\tau = \frac{M}{a [l_z (h + a) + h^2 / 6]}$ $l_z = l - a$

Slika 14.

Kritični naponi su mehaničke karakteristike (statičke ili dinamičke) materijala šava korigovane odgovarajućim uticajnim faktorima. Za materijal šava usvaja se materijal delova spoja koji ima manje mehaničke karakteristike.

Kritični naponi statički opterećenih zavarenih spojeva:

$$\begin{aligned} [\sigma]_z &= [\sigma] \cdot \zeta_z \\ [\tau]_z &= [\tau] \cdot \zeta_z \end{aligned}$$



gde su:

$[\sigma]$ i $[\tau]$ – kritični naponi dobijeni ispitivanjem standardne epruvete,
 $\zeta_z < 1$ – faktor korekcije statičke čvrstoće zavarenog spoja.

Kritični naponi dinamički opterećenih zavarenih spojeva:

$$\begin{aligned} [\sigma]_z &= \sigma_{SR} + \frac{\sigma_A}{K_{Dz}}, \\ [\tau]_z &= \tau_{SR} + \frac{\tau_A}{K_{Dz}} \end{aligned}$$

gde su:

σ_A i τ_A – amplituda dinamičke čvrstoće dobijena ispitivanjem standardne epruvete,
 σ_{SR} i τ_{SR} – srednji napon dinamičke čvrstoće dobijen ispitivanjem standardne epruvete,

K_{Dz} – faktor dinamičke čvrstoće zavarenog spoja:

$$K_{Dz} = \frac{\beta_{kz}}{\xi_1 \cdot \xi_2 \cdot \xi_3},$$

β_{kz} – efektivni faktor koncentracije napona zavarenog spoja,

ξ_1 – faktor oblika zavarenog spoja,

ξ_2 – faktor kvaliteta zavarivanja,

ξ_3 – faktor veličine (debljine) šava.

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

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

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



Faktor smanjenja statičke čvrstoće zavarenog spoja (ζ_z):

$\zeta_z = 0,65 - 0,85$ za sučeone spojeve

$\zeta_z = 0,55 - 0,70$ za ugaone spojeve

Faktor oblika i tipa zavarenog spoja (ζ_1)

Naprezanje Oblik sastavka	Zatezanje – Pritisak	Savijanje	Smicanje Uvijanje
Sučeoni	0,6....0,8	0,7....0,9	0,6....0,7
Ugaoni	0,7....0,8	0,9	0,7....0,8
Preklopni obostrani	0,6	0,8	0,6
Preklopni jednostrani	0,4	0,2	0,2
Ugaoni kružni			0,5

Faktor kvaliteta zavarivanja (ζ_2)

Visoki B $\zeta_2 = 0,85 - 0,95$

Srednji C $\zeta_2 = 0,65 - 0,75$

Niski D $\zeta_2 = 0,50 - 0,60$

Faktor apsolutne veličine mašinskog dela (ζ_3)

$\zeta_3 = 0,75 - 1,0$