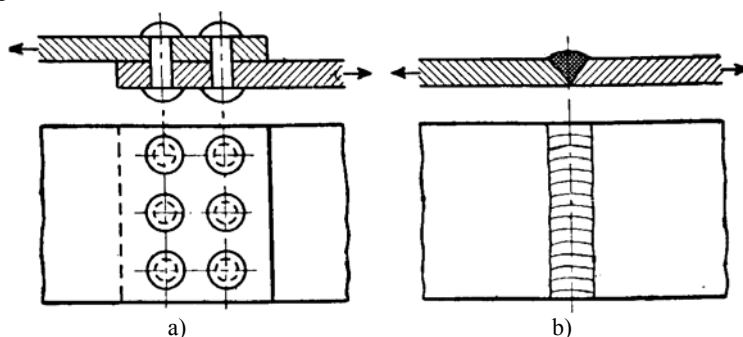


## 1. UVOD

**Zavarivanje** je proces izrade nerazdvojivog spoja uspostavljanjem međuatomskih veza između delova koji se zavaruju, pri kome se pojedinačno ili kombinovano koristi toplotna i mehanička energija, a po potrebi i dodatni materijal. Postupci zavarivanja, koji se najčešće koriste u praksi, zasnovani su na lokalnom zagrevanju materijala iznad temperature topljenja, kada zavareni spoj nastaje očvršćavanjem (elektrolučno), ili na lokalnom zagrevanju materijala do temperature topljenja, kada zavareni spoj nastaje uz dodatno delovanje pritiska (elektrotoporno). Zavarivanjem je moguće spajanje metala sa metalom, nemetala sa nemetalom i metala sa nemetalom, ali se u praktičnom smislu podrazumeva spajanje metala sa metalom.

Zavarivanje je jedan od najvažnijih tehnoloških procesa u savremenoj industriji, posebno u mašingradnji, građevinarstvu, brodogradnji i procesnoj industriji. Najčešća primena zavarivanja je za izradu nosećih metalnih konstrukcija spajanjem pojedinih delova – limova i profila, za izradu procesne opreme – posuda i cevovoda pod pritiskom, i za popravku polomljenih ili istrošenih metalnih delova. Izrada odgovornih konstrukcija složenijeg oblika je moguća i zakivanjem i livenjem, ali se primenom zavarivanja ostvaruju višestruke prednosti. Tako se, u odnosu na zakovane konstrukcije, zavarivanjem postiže ušteda u materijalu oko 20%, a u odnosu na odlivke 20–50%, pri čemu se skraćuje vreme izrade. Prednosti zavarenih spojeva nad zakovanim spojevima u nosećim konstrukcijama mogu da se objasne primerom na sl. 1.1. S obzirom na to da se kod zakovanog spoja sila koja deluje u jednom limu preko zakivaka prenosi na drugi lim, jasno je da je kod nosećih spojeva potreban veći broj odgovarajuće raspoređenih zakivaka, što komplikuje njihovu izradu. Osim toga, da bi se ostvarila kvalitetna zakovana veza potreban je relativno veliki preklop, što povećava masu konstrukcije. Zavareni spoj je stoga bolje tehničko rešenje, pod uslovom da je dobro izveden, što nije uvek jednostavno postići.



Slika 1.1. Primer a) zakovanog; b) zavarenog spoja

Teškoće koje se javljaju pri izradi zavarenih konstrukcija su prvenstveno posledica primene toplotne energije, odnosno termo-deformacionog ciklusa zavarenog spoja. Međutim, tehnologije spajanja materijala kod kojih se toplotna energija ne koristi ili se koristi u manjoj meri (zavarivanje pritiskom ili kombinacijom pritiska i toplote, lemljenje i lepljenje) ne daju spojeve dovoljne čvrstoće za primenu u odgovornim konstrukcijama, ili su suviše skupe, pa se koriste samo u specifičnim konstrukcijama. Stoga se za izradu odgovornih konstrukcija koristi zavarivanje topljenjem, pri čemu se posebno vodi računa o ponašanju materijala tokom termo-deformacionog ciklusa.

Istorijski posmatrano, neki postupci zavarivanja su stari koliko i otkriće metala, kao npr. kovačko zavarivanje gvožđa. Međutim, razvoj savremenih postupaka zavarivanja počinje krajem XIX veka, a njihova značajna primena sredinom XX veka.

Prvi uspešni pokušaji elektrolučnog zavarivanja netopljivom grafitnom elektrodom su bili 1881. godine u Francuskoj (Demeriton – spajanje olovnih akumulatorskih ploča) i 1882. godine u Rusiji (Benardos – zavarivanje čelika strujom iz akumulatora). Primena Benardosovog postupka je ostala na nivou ograničene reparature i navarivanja zbog dva problema: prvi, zbog prisustva čestica ugljenika od delimično istopljene grafitne elektrode, usled čega se dobijao tvrd i krt spoj, i drugi, zbog apsorpcije gasova (prvenstveno kiseonika i azota iz vazduha), što je nepovoljno uticalo na kvalitet spoja.

Sledeći značajan korak napravio je ruski inženjer Slavjanov, koji je 1889. godine uspešno primenio topljivu elektrodu u električnom luku jednosmerne struje, dobijene posebnim generatorom. Time je otklonjen prvi od navedenih problema, što je omogućilo kvalitetnije spajanje dva metalna predmeta. Drugi problem je rešio švedski inženjer Kjellberg 1907. godine uvođenjem obložene elektrode, što je omogućilo da sredinom dvadesetih godina ručno elektrolučno zavarivanje postane osnovni postupak zavarivanja. S druge strane, u cilju zaštite od okolne atmosfere i postizanja stabilnijeg luka, tridesetih godina u SAD i SSSR su razvijeni postupci elektrolučnog zavarivanja topljivom elektrodom žicom pod praškom, čime je ujedno značajno povećana i proizvodnost. Postupci elektrolučnog zavarivanja u zaštiti inertnih gasova su 1941. godine (netopljiva volframova elektroda) i 1948. godine (topljiva elektrodna žica) uvedeni u SAD, dok je aktivni gas (ugljen-dioksid) prvi put primenjen 1953. godine u SSSR.

Sučeonu elektrootporno zavarivanje je prvi put primenio Tomson u SAD 1886. godine, dok je tačkasto zavarivanje osvojeno 1905. godine, a šavno 1922. godine.

Gasno zavarivanje je poznato još od 1894. godine, a njegova šira primena počinje 1902. godine, kada je pronađen jeftin postupak dobijanja kiseonika iz vazduha, dok je acetilen dobijen još 1892. godine u Kanadi. Nešto kasnije, 1911. godine, u SAD je acetilenski plamen korišćen za rezanje čelika.

Specijalni postupci zavarivanja su uvedeni u praksu uglavnom posle II Svetskog rata, u skladu sa tehnološkim razvojem i potrebama njihove primene. Tako se zavarivanje plazmom koristi od 1955. godine, zavarivanje trenjem od 1956. godine, zavarivanje elektronskim snopom od 1957. godine, difuzno zavarivanje od 1959. godine, zavarivanje laserom i zavarivanje eksplozijom od 1960. godine. Danas se smatra da je 98 postupaka zavarivanja osvojeno i primenjeno u praksi, uključujući lemljenje, prema klasifikaciji Američkog društva za zavarivanje (AWS – American Welding Society).

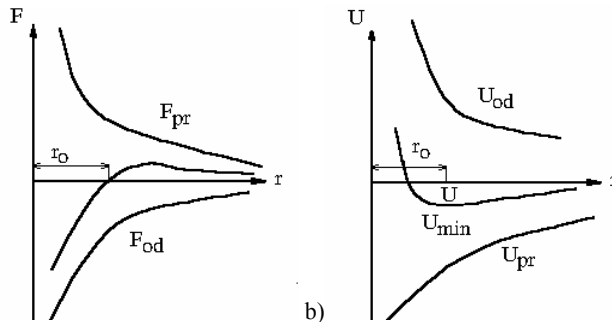
Osim konvencionalnih (elektrolučno, elektrootporno i gasno) i specijalnih postupaka zavarivanja, i već pomenutih postupaka srodnih zavarivanju (rezanje, lemljenje i lepljenje), treba pomenuti i navarivanje, kao proces identičan zavarivanju, koji se ne koristi za spajanje materijala, već za nanošenje površinskog sloja. Istu svrhu ima i metalizacija, s tim da je kod nje proces nanošenje površinskog sloja nešto drugačiji. Konačno, žlebljenje kao proces ukla-

njanja dela materijala sa površine, koji se često koristi pri izradi korenog zavara odgovornih spojeva, takođe spada u postupke srodne zavarivanju.

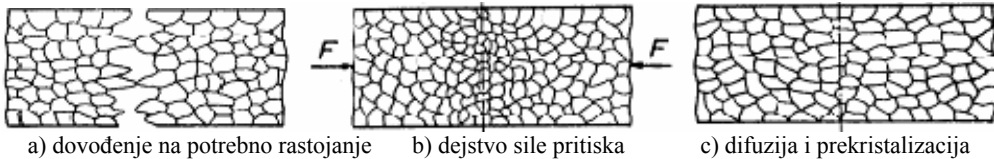
### 1.1. FIZIČKE OSNOVE ZAVARIVANjA

Idealnim telima, u smislu zavarivanja, smatraju se dva tela savršeno ravnih i čistih površina, istog ili sličnog tipa kristalne rešetke, iste ili približno iste vrednosti parametra rešetke. Uslov za nastanak atomskih veza, odnosno formiranje zavarenog spoja idealnih tela, je dovođenje površinskih atoma na rastojanje jednako parametru rešetke. U slučaju zavarivanja pritiskom (mehanička energija) tokom međusobnog približavanja dva tela nastaju elektrostatičke sile privlačenja i odbijanja usled dejstva jona i elektrona raspoređenih na graničnim površinama, i gravitaciona sila. Na nekom rastojanju  $r_0$  ukupne sile privlačenja i odbijanja,  $F_{pr}$  i  $F_{od}$ , su u ravnoteži, sl. 1.2a, pri čemu nastaje najveća razlika odgovarajućih potencijalnih energija,  $U_{pr}$  i  $U_{od}$ , sl. 1.2b, što se naziva **energetskom barijerom**. Ravnotežno međuatomsko rastojanje  $r_0$  približno odgovara parametru kristalne rešetke, a daljim približavanjem graničnih površina nastaje metalna veza. Da bi se uspostavila atomska veza atoma na graničnoj površi dva tela mora da se savlada energetska barijera, a za to je neophodna spoljna energija.

U realnim uslovima zavarivanja pritiskom potrebno je još savladati uticaj neravnina graničnih površina i površinskih nečistoća. Površinske neravnine realnih tela su znatno veće od parametra rešetke, pa se dovođenje na potrebno rastojanje u prvoj fazi ostvaruje samo u nekoliko graničnih kristala, sl. 1.3a. U drugoj fazi dovođenje atoma na rastojanje koje odgovara parametru rešetke ostvaruje se silom pritiska koja izaziva plastičnu deformaciju na mestu spoja, sl. 1.3b. Ako se pri tome primeni i određena količina toplote povećava se plastičnost i pospešuje proces difuzije, sl. 1.3c, pa površinski atomi mogu lakše da savladaju energetska barijeru.

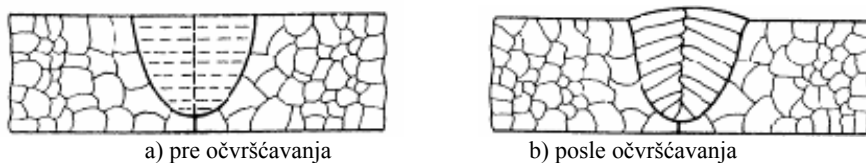


Slika 1.2. Zavisnost a) sila F; b) energija U od međuatomskog rastojanja r



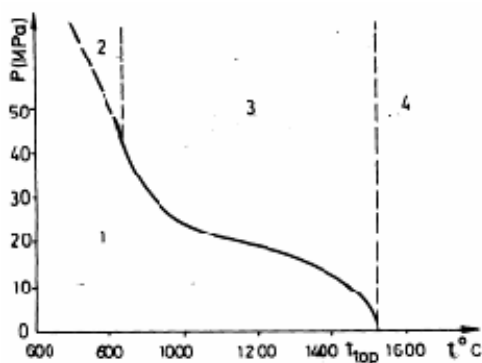
a) dovođenje na potrebno rastojanje    b) dejstvo sile pritiska    c) difuzija i preokristalizacija  
Slika 1.3. Faze spajanja pritiskom

Kada se koristi samo toplotna energija nastaje lokalno topljenje metala i obrazovanje zajedničke metalne kupke od rastopljenog osnovnog i dodatnog materijala (ako se koristi), sl. 1.4. U tom slučaju energetska barijera je savladana po prirodni stvari, jer se atomske veze uspostavljaju hlađenjem i očvršćavanjem metalne kupke.



Slika 1.4. Zavareni spoj dobijen topljenjem

Imajući u vidu mehaničku i toplotnu energiju potrebnu za zavarivanje, na dijagramu pritisak–temperatura mogu da se izdvoje četiri različite oblasti, uključujući i oblast nedovoljne energije, sl. 1.5. Oblast 1 označava oblast nedovoljnog pritiska i temperature, u kojoj je zavarivanje nemoguće, oblast 2 označava zavarivanje velikim pritiskom, oblast 3 označava zavarivanje kombinovanim delovanjem pritiska i temperature, a oblast 4 označava zavarivanje topljenjem ( $T > T_{top}$ ). Najčešće korišćeni postupci zavarivanja spadaju u oblast 4 (elektro-lučno, gasno), a u oblasti 3 je elektrootporno zavarivanje.



Slika 1.5. Oblasti zavarivanja u zavisnosti od pritiska i temperature

## 1.2. KLASIFIKACIJA POSTUPAKA ZAVARIVANjA

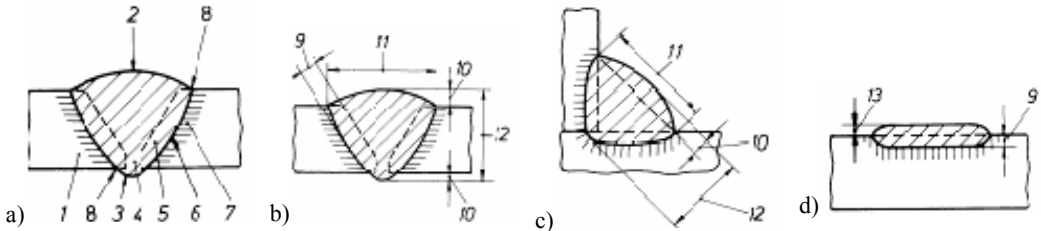
Postupci zavarivanja mogu da se podele na postupke topljenjem i postupke pritiskom, pri čemu u prvu grupu spadaju oni postupci kod kojih se proces spajanja odvija topljenjem i očvršćavanjem na mestu spoja, sl. 1.4 i sl. 1.5 (oblast 4), a u drugu grupu oni postupci kod kojih se proces spajanja odvija bez topljenja, sl. 1.3 i sl. 1.5 (oblasti 2 i 3). Osim toga, postupci zavarivanja se često dele prema izvoru energije: električna (luk, otpor, snop), hemijska (plamen, eksploziv, termiti), mehanička (pritisk, trenje, ultrazvuk) i ostale (npr. svetlost). U svakom slučaju postupci zavarivanja i spajanja su definisani u standardu JUS C.T3.001, a njihova podela na 6 grupa (elektro-lučno, elektrootporno, gasno, zavarivanje u čvrstom stanju, drugi postupci zavarivanja, lemljenje) i način označavanja su definisani u standardu JUS C.T3.012, tab. 1.1. Svi postupci zavarivanja, navedeni u tab. 1.1, su opisani u odgovarajućim poglavljima ove knjige, a osnovne prednosti, mane i primena najvažnijih postupaka zavarivanja su date u tab. 11.4 i 11.5.

Tabela 1.1. Klasifikacija postupaka zavarivanja

1	Elektrolučno zavarivanje	4	Zavarivanje u čvrstom stanju
111	obloženom elektrodom – E	41	ultrazvukom
114	punjenom žicom	42	trenjem
12	pod praškom – EPP	43	kovačko
13	topljivom elektrodom žicom u zaštiti gasa	44	eksplozijom
131	zaštita u inertnom gasu – MIG	45	difuzijom
135	zaštita u aktivnom gasu – MAG	48	na hladno
14	netopljivom elektrodom u zaštiti gasa	7	Drugi postupci zavarivanja
141	inertni gas – TIG	71	aluminotermitsko
15	plazmom	72	električno pod troskom – EPT
185	magnetno elektrolučno rotirajućim lukom	74	indukciono
2	Elektrotoporno zavarivanje	751	laserom
21	tačkasto	76	elektronskim snopom
22	šavno	91	Tvrdo lemljenje
23	bradavičasto	913	u peći
24	sučeono varničanjem	914	uronjavanjem u soli
25	sučeono zbijanjem	916	indukciono
3	Gasno zavarivanje	94	Meko lemljenje
311	oksi-acetilenskim plamenom	97	Zavarivačko lemljenje

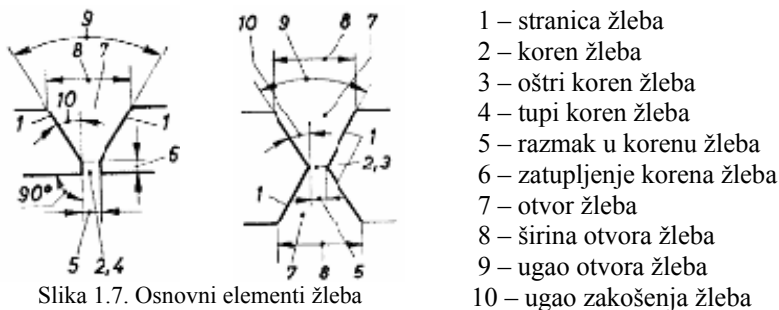
### 1.3. OSNOVNI POJMOVI U ZAVARIVANJU

Pod **zavarenim spojem** se podrazumeva konstruktivna celina, sl. 1.6, koju čine **osnovni metal** (1) i **metal šava**, ili skraćeno šav, kod koga se razlikuju lice šava (2), naličje šava (3), koren šava (4) i ivica šava (8), sl. 1.6a. Kod postupaka zavarivanja topljenjem šav nastaje očvršćavanjem istopljenog osnovnog i **dodatnog metala**, ili samo osnovnog metala. Deo osnovnog metala, koji se topi u procesu zavarivanja i ulazi u sastav metala šava, zove se uvar (5), čija je granica obeležena sa (6), sl. 1.6a, a dubina sa (9), sl. 1.6b. **Zona uticaja toplote** (ZUT), označena sa (7) na sl. 1.6a, je onaj deo osnovnog metala, koji je pod uticajem zagrevanja i hlađenja pretrpeo izvesne strukturne promene, ali ispod solidus linije. Na sl. 1.6 prikazane su i osnovne dimenzije šava: širina (11), debljina (12) i nadvišenje (10), i to za slučaj sučeonog, sl. 1.6b, i ugaonog spoja, sl. 1.6c, kao i za navareni sloj, sl. 1.6d, kod koga je bitna i njegova debljina (13).



Slika 1.6. Osnovni elementi zavarenog spoja po JUS C.T3.001

Pre zavarivanja potrebno je pripremiti ivice osnovnog metala, čime se dobija **žleb** za zavarivanje, čiji su osnovni pojmovi definisani standardom JUS C.T3.001, sl. 1.7. Oblik i dimenzije žleba su određeni standardom JUS C.T3.030, a najčešće korišćeni žlebovi i izgled odgovarajućeg šava su dati u tab. 1.2.



Slika 1.7. Osnovni elementi žleba

Tabela 1.2. Oblici najčešće korišćenih žlebova i odgovarajućih šavova

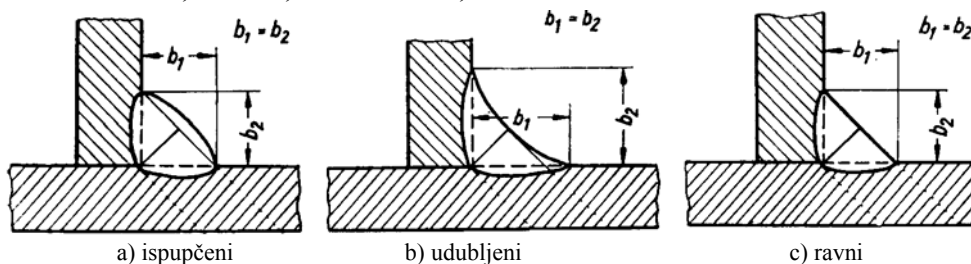
naziv	izgled žleba	izgled šava	naziv	izgled žleba	izgled šava
rubni			U		
I			J		
V			X		
HV			K		
Y			duplo U		

Pripremljeni žleb u procesu zavarivanja topljenjem može da se ispuni u jednom ili u više prolaza, ili u više slojeva, sl. 1.8, što prvenstveno zavisi od debljine osnovnog materijala. **Zavar** predstavlja deo metala šava, nastao u jednom prolazu ili sloju, sl. 1.8.

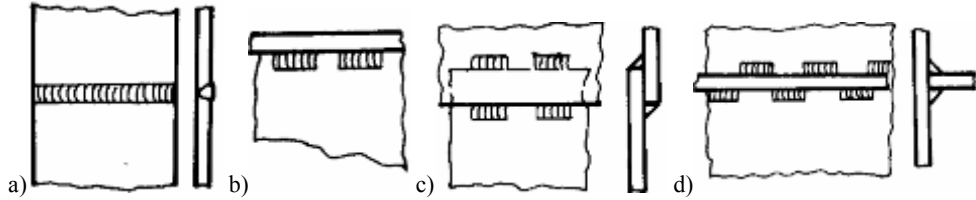


Slika 1.8. Vrste šavova

Prema obliku lica šava razlikuju se ravni, udubljeni i ispučeni šavovi, sl. 1.9, a prema kontinuitetu šavovi se dele na neprekidne, sl. 1.10a i isprekidane, sl. 1.10b, koji mogu da budu simetrični, sl. 1.10c, ili nesimetrični, sl. 1.10d.

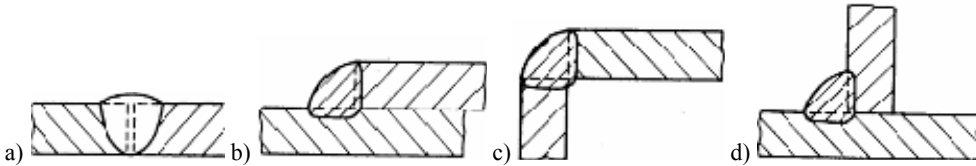


Slika 1.9. Oblici lica šava

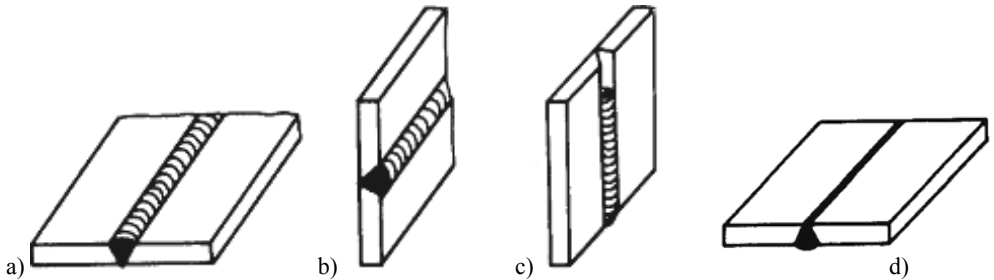


Slika 1.10. Podela šavova po kontinuitetu: a) neprekidni, b) isprekidani, c) simetrično, d) nesimetrično

Zavisno od međusobnog položaja delova koji se zavaruju, osnovne vrste zavarenih spojeva su sućeoni, preklopni, ivični, T spoj, sl. 1.11, a u zavisnosti od položaja, zavarivanje može da se bude u horizontalnom, horizontalno vertikalnom, vertikalnom i nadglavnom položaju, sl. 1.12. Položaji zavarivanja, koji nisu horizontalni, zovu se prinudni.



Slika 1.11. Osnovne vrste zavarenih spojeva: a) sućeoni, b) preklopni, c) ivični, d) T spoj



Slika 1.12. Položaji zavarivanja: a) horizontalni, b) horizontalno vertikalni, c) vertikalni, d) nadglavni

Pod **tehnologijom zavarivanja** podrazumeva se skup operacija koje je potrebno izvesti da bi se napravio zavareni spoj (izbor osnovnog i dodatnog materijala, priprema osnovnog materijala, izbor postupka i parametara zavarivanja). Pod **tehnikom zavarivanja** podrazumevaju se načini izvođenja pojedinih operacija (npr. tehnika zavarivanja unapred ili unazad).

#### 1.4. OZNAČAVANJE I PREDSTAVLJANJE ZAVARENIH SPOJEVA NA CRTEŽU

Crtež zavarene konstrukcije mora da sadrži podatke potrebne za njenu izradu, kao što je način pripreme žleba, geometrijske mere šava i tehnika zavarivanja. Da bi se ovi podaci prikazali što jednostavnije u JUS C.T3.001 i C.T3.011 su definisani način predstavljanja i oznake zavarenih spojeva, koje se sastoje od grafičke i brojne oznake. Grafička oznaka definiše pripremu žleba i oblika šava, tab. 1.3, oblik spoljne površine, tab. 1.4, vrste spojeva pri zavarivanju pritiskom, tab. 1.5, dopunske radove na korenom zavaru (žlebljenje se označava udvojenim simbolom oblika spoljne površine kod asimetričnih žlebova ili sa dve vertikalne crtice u sredini simetričnih žlebova) i kontinualnost šava pri zavarivanju topljenjem (neprekidni šavovi se označavaju horizontalnom crticom preko osnovnog simbola).

Tabela 1.3. Oznake najčešće korišćenih žlebova i nazivi odgovarajućih šavova

redni broj	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
oznaka												
naziv šava	rubni	I	V	HV	Y	U	J	X	K	duplo U	ugaoni	navar

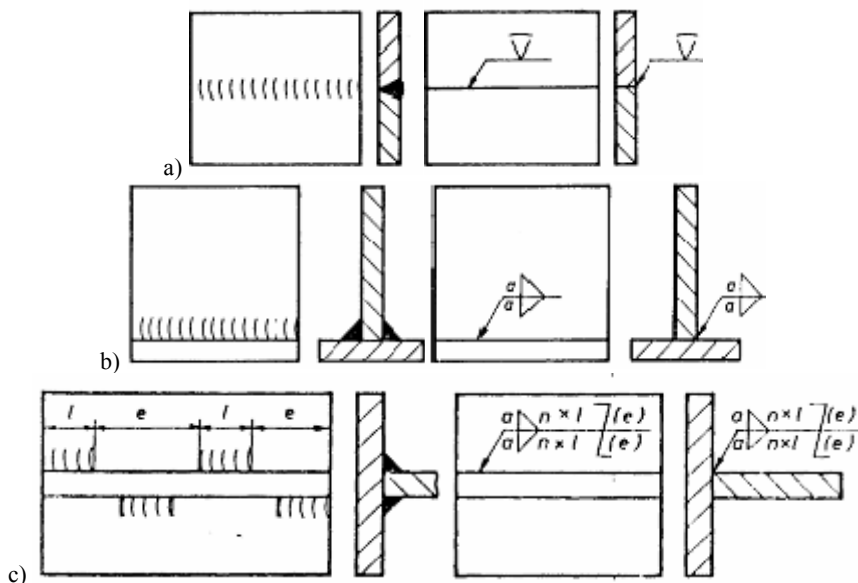
Tabela 1.4. Oznake oblika spoljne površine šava

redni broj iz tab. 1.3	2	10	10
modifikovana oznaka			
objašnjenje	oznaka obrade lica šava, ako se obrada izvodi	ugaoni šav sa ispučenim licem	ugaoni šav sa udubljenim licem

Tabela 1.5. Oznake pri zavarivanju pritiskom

oznaka					
naziv spoja	sučeonu zbijanjem	sučeonu varničenjem	tačkasti	bradavičasti	šavni

Grafička oznaka za uprošćeno prikazivanje zavarenih spojeva se ispisuje u blizini šava, na prelomljenoj pokaznoj liniji ili ispod nje, sl. 1.13. Tako npr. oznaka na sl. 1.13a definiše "V" šav bez obrade lica, oznaka na sl. 1.13b neprekidni dvostrani ugaoni šav sa ravnim temenom, gde je  $a$  debljina šava (sl. 1.9), a oznaka na sl. 1.13c isprekidani nesimetrični ugaoni šav sa ravnim temenom, gde je  $l$  dužina pojedinih šavova,  $e$  razmak između dva šava,  $n$  broj šavova i  $a$  debljina šava.



Slika 1.13. Primeri uprošćenog prikazivanja zavarenih spojeva:

a) sučeonu "V"; b) ugaoni ravni dvostrani; c) isprekidani nesimetrični ugaoni ravni

Brojčana oznaka sadrži najbitnije podatke u zavisnosti od vrste spoja, oblika i kontinualnosti šava, i po pravilu se sastoji od dva broja, odvojena crticom, prvi za kote preseka



šava, a drugi za dužinu šava. Primeri označavanja neprekidnih spojeva su dati u tab. 1.6 (sučeoni), gde su prikazani jednostrani "I" spoj i dvostrani "X" spojevi (simetrični i nesimetrični), i u tab. 1.7 (ugaoni), gde su prikazani jednostrani udubljeni i dvostrani simetrični ravni spoj, a isprekidanih spojeva u tab. 1.8, gde su prikazani sučeoni "I" i ugaoni "T" spoj. Kompletna oznaka zavarenog spoja još sadrži i brojčanu oznaku postupka zavarivanja, u skladu sa podacima iz tab. 1.1.

Tabela 1.6. Primeri označavanja neprekidnih sučeonih spojeva

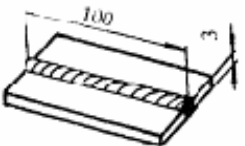

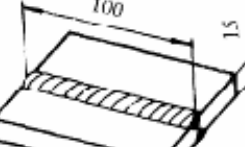

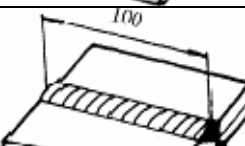

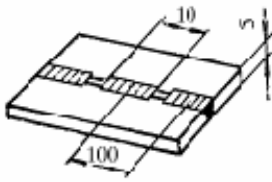
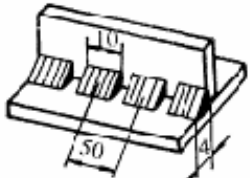
skica	opis	oznaka
	jednostrani "I" spoj, debljine 3 mm, dužine šava 100 mm	 3-100
	simetrični "X" spoj, debljine 15 mm, dužine šava 100 mm	 15-100
	nesimetrični "X" spoj, debljine 17 mm (jedan zavar 10 mm, drugi 7 mm), dužine šava 100 mm	 10+7-100

Tabela 1.7. Primeri označavanja neprekidnih ugaonih spojeva

skica	opis	oznaka
	udubljeni spoj, preseka 4 mm, dužine šava 100 mm	 4 - 100
	simetrični ravni "T" spoj, dužine krakova 6 mm, dužine šava 100 mm	 6 x 6 - 100

Tabela 1.8. Primeri označavanja isprekidanih spojeva

skica	opis	oznaka
	<p>sučeon "T" spoj, debljine 5 mm, 3 zavara dužine 10 mm, korak 100 mm</p>	$\Pi : 5 - 3 \times 10 / 100$
	<p>ugaoni ravni "T" spoj, preseka 4 mm, 4 zavara dužine 10 mm, korak 50 mm</p>	$\Delta : 4 - 4 \times 10 / 50$

Definicije:

**Zavarivanje** – proces izrade nerazdvojivog spoja uspostavljanjem međuatomskih veza između delova koji se zavaruju, pri čemu se pojedinačno ili kombinovano koristi toplotna ili mehanička energija, i po potrebi dodatni materijal.

**Zavareni spoj** – konstruktivna celina koju čine osnovni metal i metal šava

**Osnovni materijal** – materijal koji se zavaruje

**Dodatni materijal (metal)** – materijal koji se dodaje u procesu zavarivanja

**Zona uticaja toplote** – deo osnovnog metala, koji je pod uticajem zagrevanja i hlađenja pretrpeo strukturne promene

**Metalna kupka** – rastopljeni dodatni i osnovni materijal

**Šav (metal šava)** – očvrsla metalna kupka

**Zavar** – deo šava nastao u jednom prolazu ili sloju

**Žleb** – pripremljeni prostor za obrazovanje šava

**Tehnologija zavarivanja** – skup operacija potrebnih da bi se napravio zavareni spoj

**Tehnika zavarivanja** – načini izvođenja pojedinih operacija tokom zavarivanja