

## MAŠINSKO INŽENJERSTVO U PRAKSI – ZZK

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 (npr. elektrolučno zavarivanje), ili na lokalnom zagrevanju materijala do temperature topljenja, kada zavareni spoj nastaje uz dodatno delovanje pritiska (npr. elektrootporno zavarivanje). Zavarivanjem je moguće spajanje metala sa metalom, nemetala sa nemetalom i metala sa nemetalom, ali se u praktičnom smislu podrazumeva spajanje metala sa metalom.

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 Kjelberg 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 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.

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

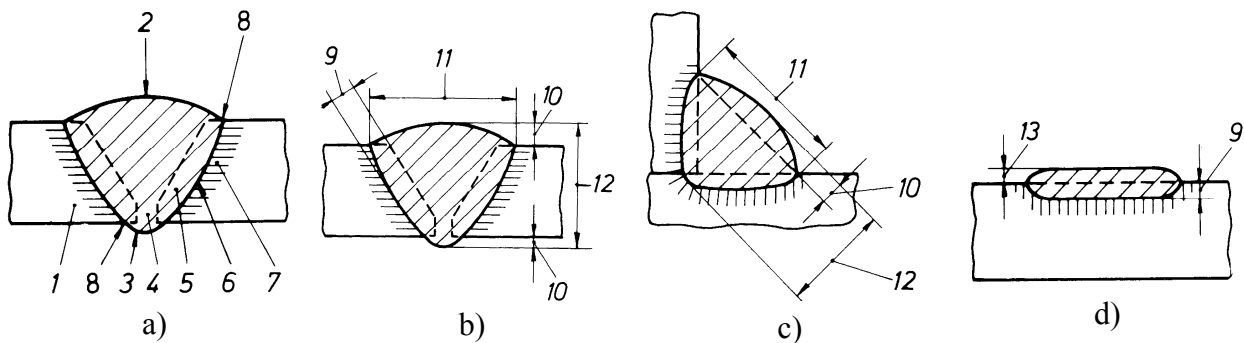
Gasno zavarivanje je poznato još od 1894. godine, a njegova šira primena počinje 1902. godine, kada je pronađen jeftin postupak dobijanja kiseonika iz vazduha, dok je acetilen dobijen još 1892. godine u Kanadi. Nešto kasnije, 1911. godine, u SAD je acetilenski plamen korišćen za rezanje čelika.

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, trenjem od 1956. godine, elektronskim snopom od 1957. godine, difuzno zavarivanje od 1959. godine, zavarivanje laserom i eksplozijom od 1960. godine.

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 uklanjanja dela materijala sa površine takođe spada u postupke srodne zavarivanju.

### 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. 1.1-1a, 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. 1.1-b, i ugaonog spoja, sl. 1.1-1c, kao i za navareni sloj, sl. 1.1-1d, kod koga je bitna i njegova debljina (13).

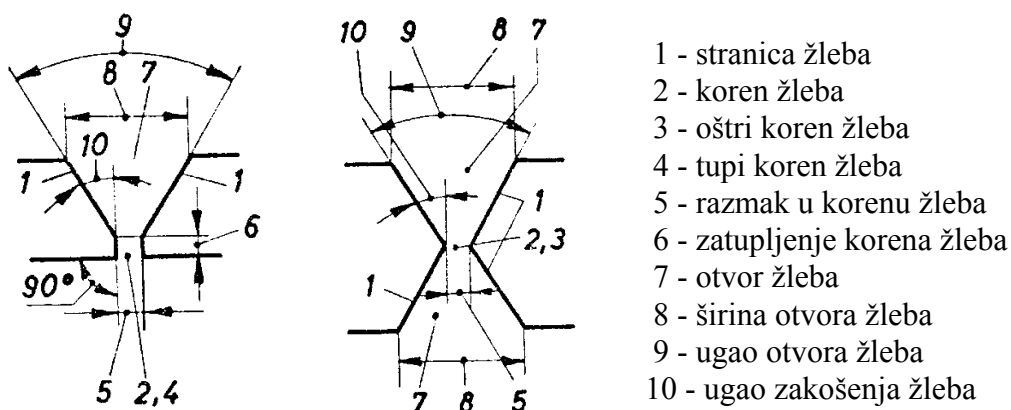


Slika 1.1-1. Osnovni elementi zavarenog spoja po JUS C.T3.001

Pre zavarivanja potrebno je pripremiti ivice osnovnog metala, čime se dobija **žleb** za zavarivanje, čiji su osnovni pojmovi definisani standardom JUS C.T3.001<sup>1</sup>, sl. 1.1-2. Oblik i dimenzije žleba su određeni standardom JUS C.T3.030, a najčešće korišćeni žlebovi i izgled odgovarajućeg šava su dati u tab. 1.1-1.

Pripremljeni žleb u procesu zavarivanja topljenjem može da se ispuni u jednom ili u više prolaza, ili u više slojeva, sl. 1.1-3, što prvenstveno zavisi od debljine osnovnog materijala. **Zavar** predstavlja deo metala šava, nastao u jednom prolazu ili sloju, sl. 1.1-3.

Prema obliku lica šava razlikuju se ravni, udubljeni i ispupčeni šavovi, sl. 1.1-4, a prema kontinuitetu šavovi se dele na neprekidne, sl. 1.1-5a i isprekidane, sl. 1.1-5b, koji mogu da budu simetrični, sl. 1.1-5c, ili nesimetrični, sl. 1.1-5d.

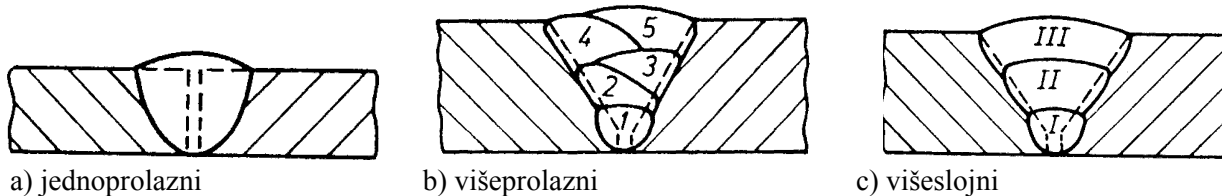


Slika 1.1-2. Osnovni elementi žleba

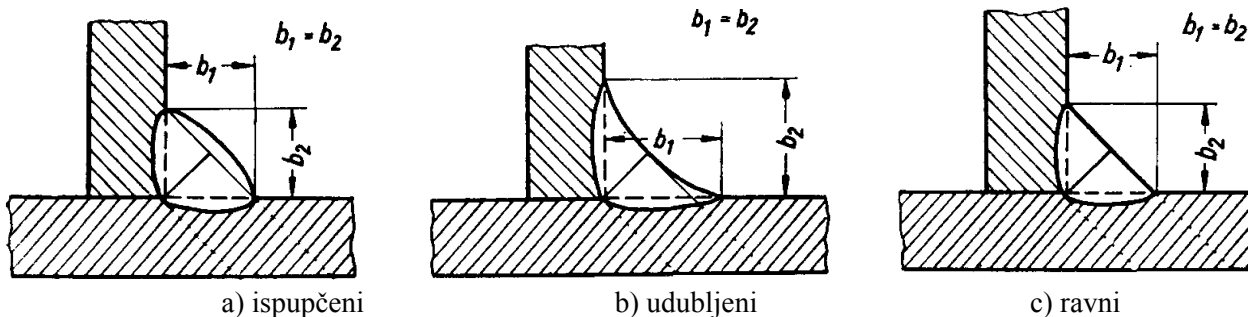
Tabela 1.1-1. Oblici najčešće korišćenih žlebova i odgovarajućih šavova

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

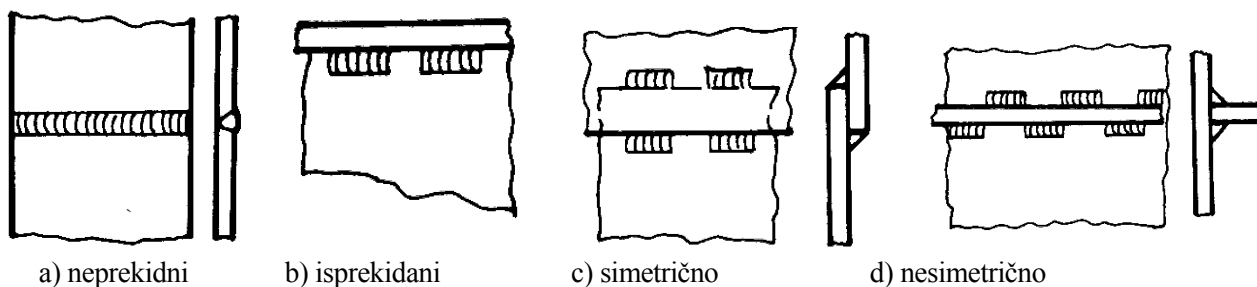
<sup>1</sup> U ovom poglavlju su korišćeni stari standardi, a za primenu novih treba pogledati u poglavlja 3 i 4



Slika 1.1-3. Vrste šavova

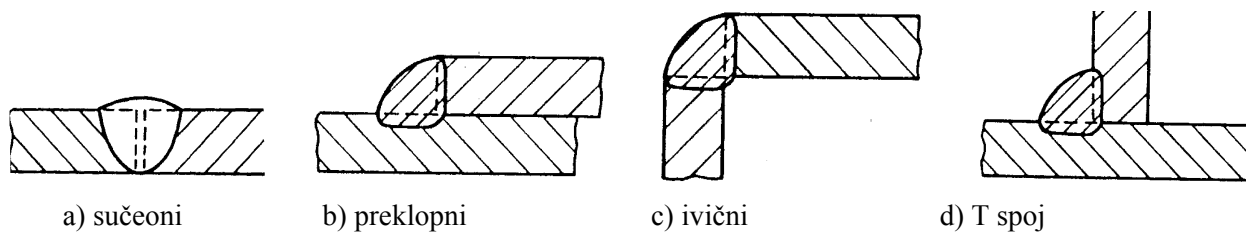


Slika 1.1-4. Oblici lica šava

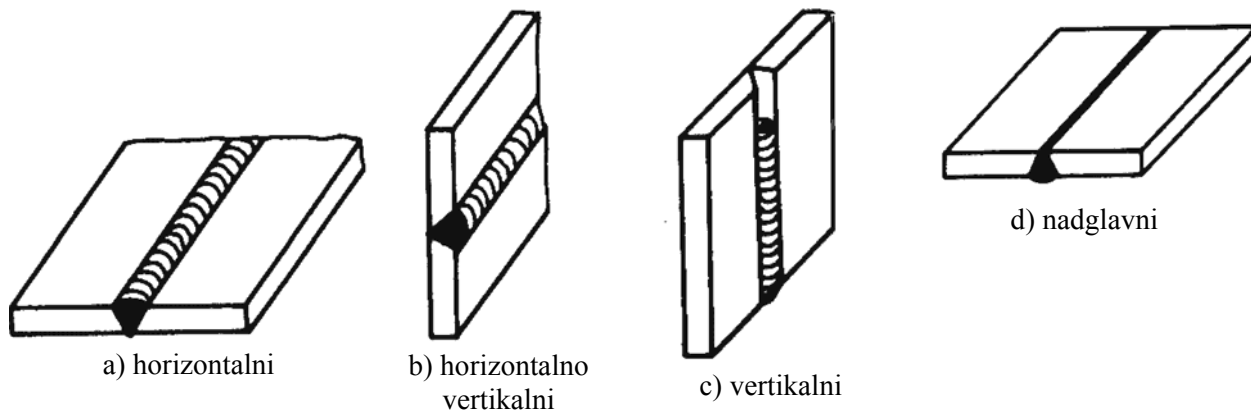


Slika 1.1-5. Podela šavova po kontinuitetu

Zavisno od međusobnog položaja delova koji se zavaruju, osnovne vrste zavarenih spojeva su sučeoni, preklopni, ivični, T spoj, sl. 1.1-6, a u zavisnosti od položaja, zavarivanje može da se bude u horizontalnom, horizontalno vertikalnom, vertikalnom i nadglavnom položaju, sl. 1.1-7. Položaji zavarivanja, koji nisu horizontalni, zovu se prinudni.



Slika 1.1-6. Osnovne vrste zavarenih spojeva



Slika 1.1-7. Položaji zavarivanja

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).

## 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. 1.1-2, oblik spoljne površine, tab. 1.1-3, vrste spojeva pri zavarivanju pritiskom, tab. 1.1-4, 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 1.1-2. Oznake 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 1.1-3. Oznake oblika spoljne površine šava

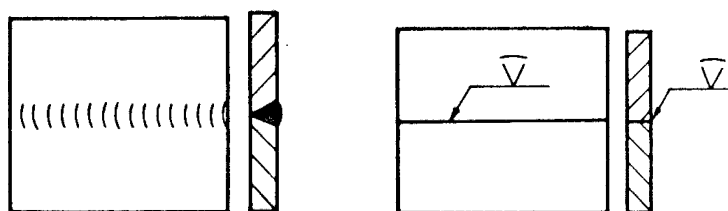
redni broj iz tab. 1.3	2	10	10
modifikovana oznaka			
objašnjenje	oznaka obrade lica šava, ako se obrada izvodi	ugaoni šav sa ispučenim licem	ugaoni šav sa udubljenim licem

Tabela 1.1-4. Oznake pri zavarivanju pritiskom

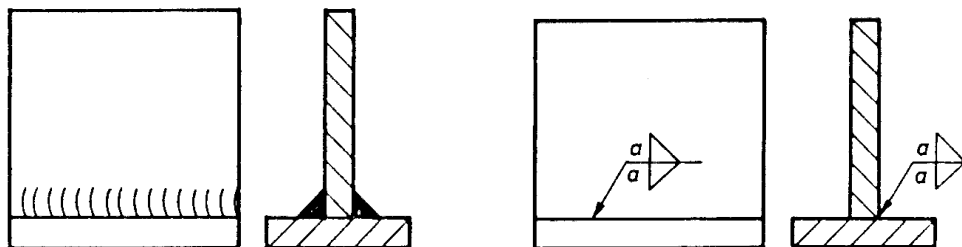
oznaka					
Naziv spoja	sučeoni zbijanjem	sučeoni varničenjem	tačkasti	bradavičasti	šavni

Grafička oznaka za uprošćeno prikazivanje zavarenih spojeva se ispisuje u blizini šava, na prelomljenoj pokaznoj liniji ili ispod nje, sl. 1.1-8. Tako npr. oznaka na sl. 1.11-8a definiše "V" šav bez obrade lica, oznaka na sl. 1.11-8b neprekidni dvostrani ugaoni šav sa ravnim temenom, gde je  $a$  debljina šava (sl. 1.1-4), a oznaka na sl. 1.1-8c isprekidani dvostrani nesimetrični ugaoni šav sa ravnim temenom, gde je  $l$  dužina pojedinih šavova,  $e$  razmak između dva šava,  $n$  broj šavova i  $a$  debljina šava.

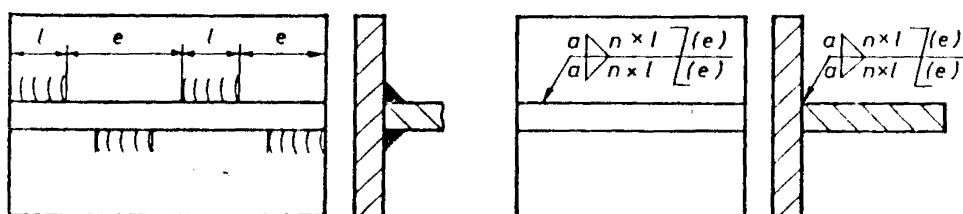
Brojčana oznaka sadrži najbitnije podatke u zavisnosti od vrste spoja, oblika i kontinualnosti šava, i po pravilu se sastoji od dva broja, odvojena crticom, prvi za kote preseka šava, a drugi za dužinu šava. Primeri označavanja neprekidnih spojeva su dati u tab. 1.1-5 (sučeoni), gde su prikazani jednostrani "I" spoj, dvostrani "X" spojevi (simetrični i nesimetrični), jednostrani udubljeni i dvostrani simetrični ravni spoj, a isprekidanih spojeva u tab. 1.1-6, 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. 1.1-1.



a) sučeonni "V"



b) ugaoni ravni dvostrani



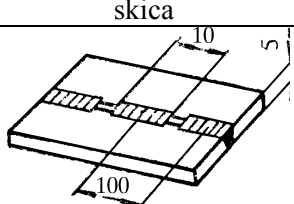
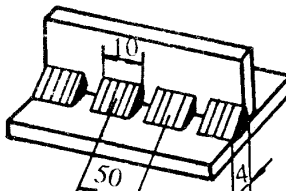
c) isprekidani nesimetrični ugaoni ravni

Slika 1.1-8. Primeri uprošćenog prikazivanja zavarenih spojeva:

Tabela 1.1-5. Primeri označavanja neprekidnih spojeva

skica	opis	oznaka
	jednostrani "I" spoj, debljine 3 mm, dužine šava 100 mm	$\hat{\parallel}$ 3-100
	simetrični "X" spoj, debljine 15 mm, dužine šava 100 mm	$\otimes$ 15-100
	nesimetrični "X" spoj, debljine 17 mm (jedan zavar 10 mm, drugi 7 mm), dužine šava 100 mm	$\otimes$ 10+7-100
	udubljeni spoj, preseka 4 mm, dužine šava 100 mm	$\nabla$ 4 - 100
	simetrični ravni "T" spoj, dužine krakova 6 mm, dužine šava 100 mm	$\triangle$ 6 x 6 - 100

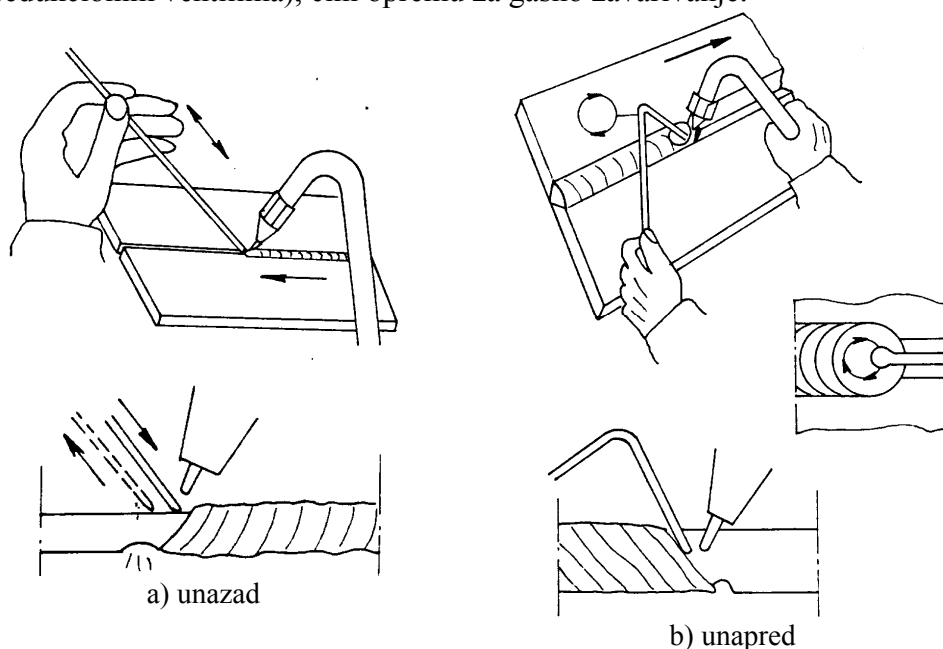
Tabela 1.1-6. Primeri označavanja isprekidanih spojeva

skica	opis	oznaka
	<p>sučeoni "I" 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>	$\nabla : 4 - 4 \times 10 / 50$

## SKICE I KRATAK OPIS POSTUPAKA ZAVARIVANJA

### Gasno zavarivanje

Gasno zavarivanje je postupak spajanja metala topljenjem i očvršćavanjem osnovnog i (po potrebi) dodatnog metala pomoću plamena dobijenog sagorevanjem gorivog gasa, sl. 1.1-9. Količina toplote oslobođena sagorevanjem, kao i najviša temperatura plamena zavise od vrste gorivog gasa. Podrazumeva se da gorivi gasovi sagorevaju u struji kiseonika, ako nije naglašeno drugačije (npr. sagorevanje u vazduhu). Da bi se ostvarilo sagorevanje u struji kiseonika, gorivi gas i kiseonik se iz specijalnih posuda pod pritiskom - boca (ili na drugi način) dovode u gorionik, odakle izlaze pomešani u odgovarajućoj srazmeri. Na taj način je omogućeno sagorevanje gorivog gasa na vrhu plamenika, koji zajedno sa gorionikom, bocama za skladištenje i crevima za dovod gasova, kao i pomoćnim i dodatnim uređajima (npr. redukcionim ventilima), čini opremu za gasno zavarivanje.



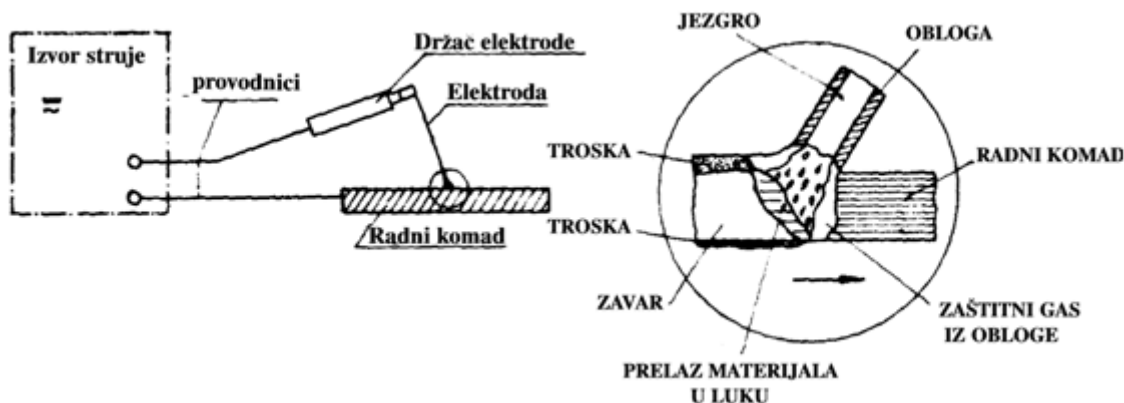
Slika 1.1-9. Gasno zavarivanje

Osnovna prednost gasnog zavarivanja je mogućnost kontrole koju zavarivač ima nad brzinom unošenja toplote, temperaturom u zoni zavarivanja i oksidacijom u atmosferi metala šava. Osim toga, oblik i veličina šava mogu bolje da se kontrolišu, jer se dodatni metal uvodi nezavisno od izvora toplote. U prednosti postupka se ubrajaju i niska cena opreme, njena pokretljivost i relativno jednostavno rukovanje. S druge strane, količina i koncentracija toplote je manja nego kod ostalih postupaka zavarivanja, pa je za gasno zavarivanje karakteristično duže vreme zagrevanja i hlađenja, usled čega su strukturne promene u ZUT izraženije i nepovoljnije. Shodno tome, ovaj postupak je pogodan jedino za zavarivanje tankih limova i cevi, posebno manjeg prečnika, kao i za njihovo reparaturno zavarivanje. Plamen gasa se

takođe koristi za rezanje, lemljenje, navarivanje, predgrevanje, termičku obradu i jednostavnije operacije oblikovanja, kao što su savijanje i ispravljanje.

### E postupak - ručno elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom

Ručno elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom (E) je postupak spajanja metala topljenjem obložene elektrode i dela osnovnog metala u električnom luku koji se uspostavlja i održava između radnog komada (osnovnog metala) i elektrode, sl. 1.1-10. Topljenjem jezgra elektrode obezbeđuje se dodatni materijal za popunu žleba, a topljenjem, sagorevanjem i isparavanjem obloge obezbeđuje se zaštita metalne kupke od okolnih gasova i vazduha. Istopljeni sastojci obloge se mešaju sa rastopljenim metalom, pre nego što isplivaju na površinu jer imaju manju gustinu od metalne kupke, i očvrstnu u obliku troske. Troska štiti metal šava od uticaja okoline i usporava njegovo hlađenje, a posle zavarivanja se uklanja čekićem.

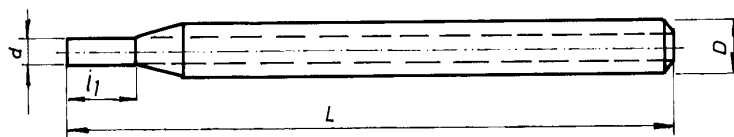


Slika 1.1-10. Šematski prikaz E postupka zavarivanja

S obzirom na jednostavno rukovanje i relativno nisku cenu uređaja i dodatnog materijala s jedne, a dobar kvalitet spoja s druge strane, ručno elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom je donedavno primenjivano više od svih ostalih postupaka zajedno. Njegovoj širokoj primeni doprinose još i činjenica da su ograničenja u vezi sa oblikom predmeta i vrstom materijala koji se zavaruje, kao i položajima zavarivanja, manja od svih ostalih postupaka zavarivanja. S druge strane, zbog nedostataka E postupka u novije vreme se umesto njega sve češće koriste ostali elektrolučni postupci. Osnovni nedostaci E postupka su mala produktivnost usled česte zamene elektroda i uklanjanja troske (brzina topljenja dodatnog metala je 1-2 kg/h), komplikovana i dugotrajna obuka zavarivača, uticaj zavarivača na kvalitet šava, blještava svetlost i štetni gasovi nastali sagorevanjem troske.

Elektroda za E postupak zavarivanja ima metalno jezgro, koje je obloženo sem na slobodnom kraju, sl. 1.1-11. Jezgro obložene elektrode kao deo strujnog kola prenosi struju (slobodni kraj je povezan držačem elektrode za izvor struje), a istovremeno služi kao dodatni materijal. Osnovne uloge obloge elektrode su:

- zaštita zone zavarivanja od okolnog kiseonika, azota i vodonika;
- stabilizacija i jonizacija električnog luka;
- usporavanje hlađenja metala šava;
- prečišćavanje i legiranje metala šava;
- omogućavanje zavarivanja u prinudnim položajima.

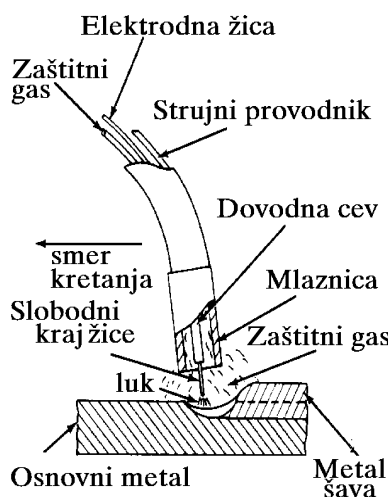


$d$  - prečnik,  $l_1$  - slobodni kraj,  $L$  - dužina,  $D$  - prečnik obloge

Slika 1.1-11. Obložena elektroda

## MAG/MIG postupak - elektrolučno zavarivanje topljivom elektrodnom žicom u zaštiti gasa

Elektrolučno zavarivanje topljivom elektrodnom žicom u zaštiti gasa je postupak spajanja metala topljenjem i očvršćavanjem dela osnovnog metala i dodatnog metala (elektrodna žica) pri čemu se za zaštitu rastopljenog metala koriste inertni i aktivni gasovi, ili njihove mešavine. Elektrolučno zavarivanje topljivom elektrodnom žicom u zaštiti gasa je šematski prikazano na sl. 1.1-12. U zavisnosti od vrste zaštitnog gasa elektrolučno zavarivanje topljivom elektrodom se skraćeno obeležava kao MAG (metal active gas) ili MIG (metal inert gas), pri čemu se kod MAG postupka kao zaštita koristi  $\text{CO}_2$  ili mešavina gasova koja se ponaša kao aktivni gas, a kod MIG postupka Ar, He ili mešavina gasova koja se ponaša kao inertni gas.



Slika 1.1-12. Elektrolučno zavarivanje topljivom elektrodom u zaštiti gasa

Korišćenjem različitih zaštitnih gasova i njihovih mešavina omogućena je raznovrsna primena MAG/MIG postupaka, posebno kada je u pitanju zavarivanje legiranih čelika, obojenih metala i legura. Mogućnost delimične ili potpune automatizacije, uz relativno mala dodatna ulaganja u opremu, čine MAG/MIG postupak posebno privlačnim u slučajevima kada EPP ne može da zameni E postupak, ili kada to nije ekonomski opravdano. U odnosu na E postupak osnovne prednosti su ušteda u vremenu zbog kontinualnog dovođenja žice i nepostojanje troske (ne gubi se vreme na zamenu elektrode i uklanjanje troske kod višeprolaznog zavarivanja), kao i mogućnost korišćenja žica manjeg prečnika, odnosno većih gustina struje i bržeg topljenja dodatnog metala. Nedostaci u odnosu na E postupak su veća cena uređaja i održavanja, smanjena stabilnost luka, veće rasprskavanje dodatnog metala i osetljivost zaštitnog gasa na strujanje vazduha (na otvorenom prostoru ili pri promaji). S obzirom na sve veće mogućnosti, koje poslednjih godina dolaze do izražaja, uvođenjem novih načina prenosa dodatnog metala i novih izvora struje na osnovu invertorskih ispravljača, ovaj postupak sve više zamenjuje E i EPP postupke.

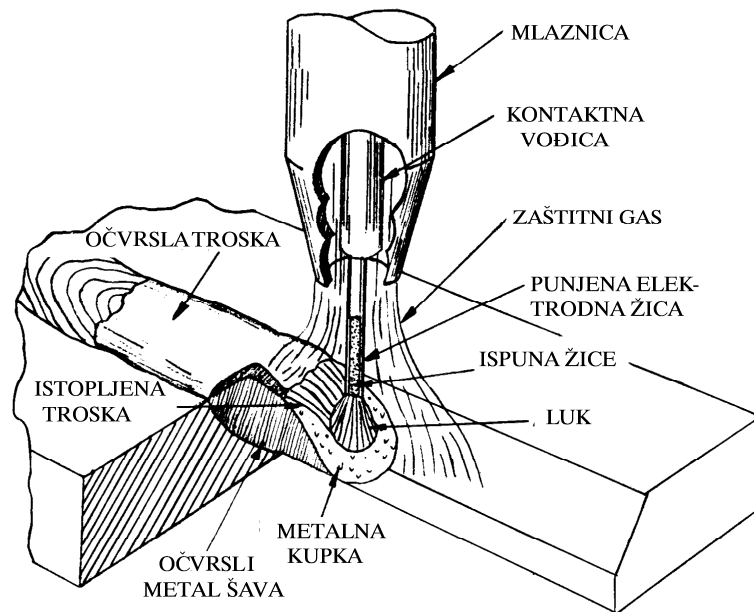
Imajući u vidu način prenosa dodatnog metala i odgovarajući oblik električnog luka, elektrolučno zavarivanje topljivom elektrodnom žicom u zaštiti gasa se deli kao što je prikazano u tab. 1.1-7.

Tabela 1.1-7. Vrste električnog luka pri zavarivanju u zaštiti gasa

prenos dodatnog metala	oblik električnog luka	simbol	napomena
u mlazu	normalni	s	bez kratkog spoja
krupnim kapima	dugi	l	uz pojavu kratkog spoja
kratkospojeni	kratki	k	u kratkom spoju
impulsni	impulsni	p	bez kratkog spoja

## Elektrolučno zavarivanje punjenom žicom

Elektrolučno zavarivanje punjenom elektrodnom žicom je postupak spajanja metala topljenjem i očvršćavanjem dela osnovnog metala i dodatnog metala, sa zaštitom od gasa koji nastaje sagorevanjem i razlaganjem praška (punjenja) koji se nalazi unutar žice, i eventualnom dopunskom zaštitom pomoćnim gasom, po pravilu  $\text{CO}_2$ , sl. 1.1-13. U slučaju kada se ne koristi dopunska zaštita pomoćnim gasom, punjenje žice između ostalog sadrži materije koje stvaraju zaštitni gas i povećanu količinu dezoksikatora, a žica se naziva samozaštitnom. U sastav praška u svakom slučaju ulaze komponente od kojih nastaje troska koja štiti šav od okoline i usporava njegovo hlađenje, i materije za prečišćavanje metala šava i za stabilizaciju luka.



Slika 1.1-13. [ema elektrolučnog zavarivanja punjenom elektrodnom žicom

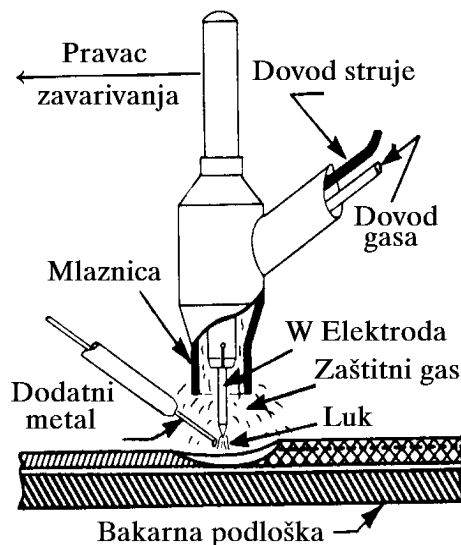
Obe vrste elektrolučnog zavarivanja punjenim žicama su slične drugim elektrolučnim postupcima. Postupak sa pomoćnim zaštitnim gasom je sličan MAG/MIG postupku zavarivanja, dok je samozaštitni postupak sličan elektrolučnom zavarivanju obloženom elektrodom. Kod obloženih elektroda prašak se nalazi na spoljnoj strani elektrode, što ograničava njen oblik na šipkasti, dok je kod punjenih žica prašak unutar žice, koja može da se namota na kalem, pa je u takvom obliku pogodna za (polu)automatsko zavarivanje. Ipak treba imati u vidu da je dotur punjene žice komplikovaniji od dotura pune žice i da često predstavlja ozbiljan problem u primeni ovog postupka.

U odnosu na E postupak najvažnije prednosti zavarivanja punjenim žicama su značajno povećanje produktivnosti i velika otpornost na apsorpciju vlage. U odnosu na MAG/MIG postupak, zavarivanje punjenim žicama je po pravilu jeftinije, a kvalitet bolji jer je kod ovog postupka manje rasprskavanje dodatnog metala i smanjena je osetljivost na poroznost. Zahvaljujući navedenim prednostima, izraženim posebno kod samozaštitne žice, primena elektrolučnog zavarivanja punjenim žicama je sve veća.

Mane elektrolučnog zavarivanja punjenim žicama u odnosu na E postupak su skuplja oprema, komplikovaniji rad i ograničena manipulacija zbog problema sa doturom žice jer kotur žice treba da bude što bliže mestu zavarivanja. U odnosu na MAG/ MIG postupak, osim problema sa doturom žice, mane su velika količina gasova (u slučaju primene samozaštitne žice) i potreba za čišćenjem troske posle svakog prolaza.

## TIG - elektrolučno zavarivanje netopljivom elektrodom u zaštiti gasa

Elektrolučno zavarivanje netopljivom elektrodom u zaštiti gasa je postupak spajanja metala topljenjem i očvršćavanjem dela osnovnog metala i dodatnog metala (žica za zavarivanje - ako se koristi), pri čemu se kao zaštita koristi inertan gas (aktivni gasovi ne dolaze u obzir jer bi izazvali oksidaciju vrha elektrode), sl. 1.1-14.



Slika 1.1-14. [ematski prikaz elektrolučnog zavarivanja netopljivom elektrodom

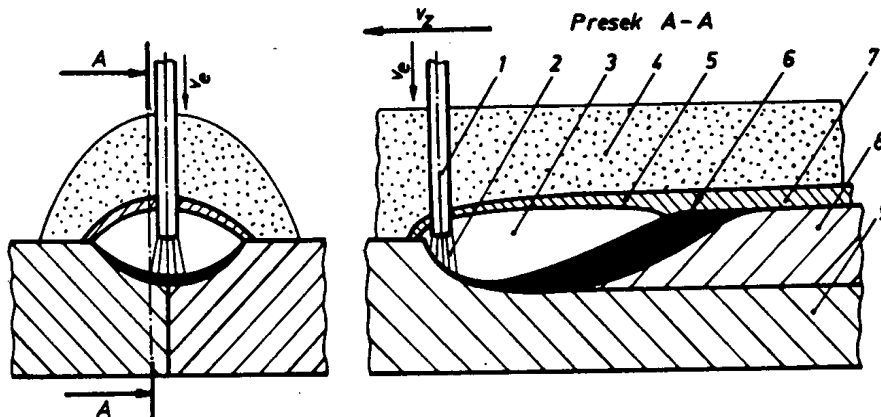
Ovaj postupak se skraćeno obeležava TIG ili WIG (T od tungsten - engleska reč za volfram (W) - materijal elektrode, IG-inert gas - engleski termin za inertni gas) i prvobitno je uveden kao postupak zavarivanja Al i njegovih legura zahvaljujući efektu katodnog čišćenja. Ovaj efekt se sastoji u razbijanju i uklanjanju skrame teškotopljivog oksida  $Al_2O_3$  iz metalne kupke ili sa njene površine dejstvom elektrona koji se kreću od osnovnog metala prema elektrodi, čime se sprečava njegovo taloženje u dnu metala šava i omogućava zavarivanje Al.

U današnje vreme primena TIG postupka je znatno veća, najviše zbog vrhunskog kvaliteta spoja, koji se između ostalog postiže boljom kontrolom unete toplote i dodatnog metala zahvaljujući razdvajanju uloga dodatnog metala i elektrode. Zavarivanje TIG postupkom je moguće i bez dodatnog metala, što je posebno važno kod tankih limova. Iako je u osnovi ručni postupak, TIG može da se automatizuje, kako u smislu dovođenja žice, tako i u smislu vođenja elektrode. U odnosu na E postupak osnovne prednosti TIG postupka su bolja zaštita metalne kupke, nepostojanje troske (ne gubi se vreme na zamenu elektrode i skidanje troske kod višeprolaznog zavarivanja), mogućnost korišćenja žica manjeg prečnika, odnosno većih gustina struje. Prednosti TIG postupka posebno dolaze do izražaja kod tankih limova, materijala kao što su obojeni metali i nerđajući čelici, kao i korenih prolaza odgovornih spojeva. S druge strane, TIG postupak nije konkuretna ostalim elektrolučnim postupcima kada je u pitanju ekonomičnost zavarivanja debelih i/ili dugačkih limova od običnih konstrukcionih čelika. Proizvodnost TIG postupka može da se poveća primenom varijante sa zagrejanom žicom.

## EPP postupak - elektrolučno zavarivanje pod praškom

Elektrolučno zavarivanje pod praškom (EPP) je postupak spajanja topljenjem i očvršćavanjem osnovnog (9) i dodatnog metala (1) pomoću električnog luka (2) koji se pod slojem praška (4) stvara i održava između osnovnog materijala i elektrodne žice, sl. 1.1-15. Metalna kupka (6) je potpuno zaštićena od okoline slojem praška, koji se delimično topi i očvršćava kao troska (7), a delimično ostaje u nepromenjenom stanju, sl. 1.1-15. Uloga praška kod EPP postupka je analogna ulozi obloge kod elektrode pri ručnom elektrolučnom zavarivanju. Usled niske toplotne provodljivosti praška toplotni gubici su manji, a topljenje metala efikasnije.

Za razliku od E postupka, gde jačina struje, napon električnog luka i brzina zavarivanja mogu da se menjaju u relativno uskim granicama, kod EPP postupka raspon promena je znatno veći, što omogućava efikasniju primenu ovog postupka, naročito ako je neophodna velika produktivnost, kao kod debljih limova i dužih šavova.



Slika 1.1-15. [ema EPP postupka (varijanta sa jednom elektrodnom žicom)]

Osim veće brzine zavarivanja, mogućnosti topljenja veće količine dodatnog i osnovnog metala, veće dubine uvarivanja, manje potrošnje dodatnog materijala (nije potrebna priprema ivica žleba za debljine ispod 15 mm) i malog rasprskavanja materijala, poboljšanje kvaliteta i ekonomičnosti EPP postupka se postiže i:

- sigurnom zaštitom zone topljenja od dejstva spoljnih faktora;
- smanjenjem opasnosti od neprovarenog korena;
- smanjenjem nivoa uzdužnih, poprečnih i ugaonih deformacija;
- većim koeficijentom iskorišćenja toplote.

Nedostaci ovog postupka su:

- relativno velike investicije u zavarivačke automate;
- zavarivanje se izvodi samo u horizontalnom položaju, izuzev u posebnim slučajevima kada se koriste dodatni uređaji (pozicioneri);
- za zavarivanje tanjih limova potreban je bakarni podmetač.

Elektrolučno zavarivanje pod praškom se prvenstveno koristi za zavarivanje niskougleničnih i niskolegiranih čelika, kao i srednje i visokolegiranih čelika. Takođe, EPP postupak se često koristi i za navarivanje, posebno velikih radnih površina (točkovi vagona, osovine, valjci u železarama).

### Elektrotoporno tačkasto zavarivanje

Elektrotoporno tačkasto zavarivanje je postupak spajanja metala kombinovanim dejstvom toplote, dobijene električnim otporom u zatvorenom strujnom kolu između dva lima (3) pritisnuta elektrodama oblika šipke (2), i sile pritiska  $F$ , sl. 1.1-16a. Pri tome nastaje spoj (zavarena tačka) kao na sl. 1.1-16b, gde je  $s$  debljina lima,  $d_s$  prečnik zavarene tačke (sočiva),  $H$  visina tačke,  $d_e$  prečnik elektrode,  $h$  ulegnuće.

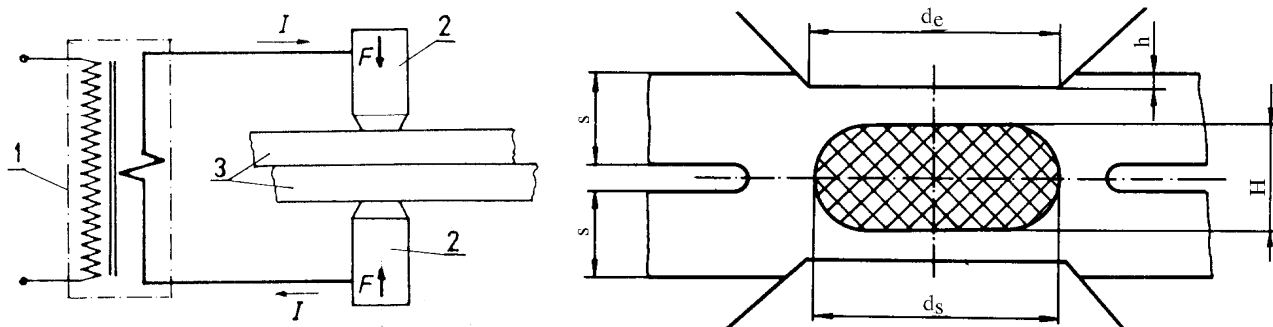
Količina toplote koja nastaje pri zavarivanju električnim otporom određuje se prema Džul-Lencovom zakonu:

$$Q = \int_0^t R(t) \cdot I_z^2(t) \cdot dt$$

pri čemu je  $I_z$  struja zavarivanja (A),  $t$  vreme zavarivanja (s),  $R_u$  **ukupni omski otpor** između elektroda ( $\Omega$ ), koji može da se definiše kao zbir pojedinih otpora:

$$R_u = R_{1-E} + R_1 + R_{k12} + R_2 + R_{2-E}$$

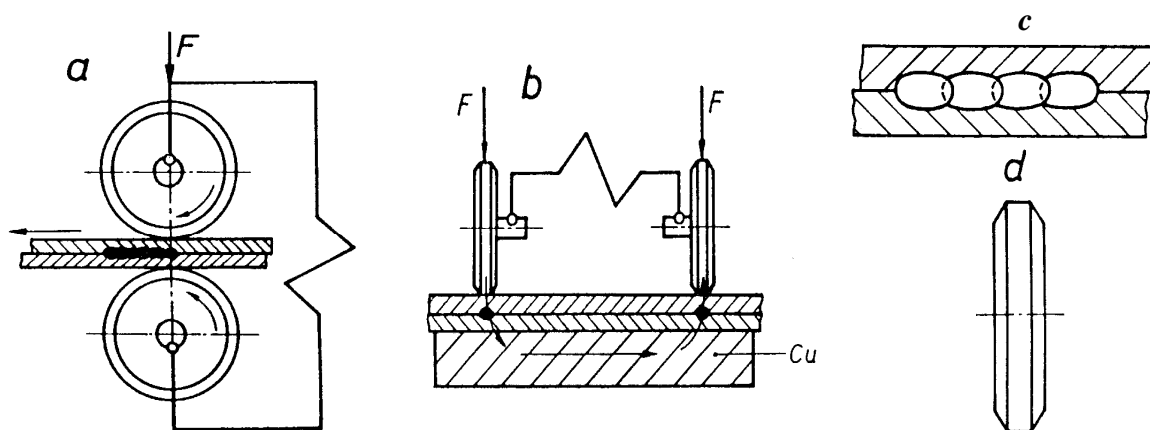
gde su  $R_1$  i  $R_2$  **sopstveni otpori materijala**, a  $R_{1-E}$  (materijal-gornja elektroda),  $R_{2-E}$  (materijal-donja elektroda) i  $R_{k12}$  (materijal-materijal), **kontaktne otpori**.



Slika 1.1-16. [ema a) tačkastog zavarivanja; b) tačkasto zavarenog spoja

### Elektrootporno šavno zavarivanje

Elektrootporno šavno zavarivanje je postupak spajanja metala kombinovanim dejstvom toplote, dobijene električnim otporom između dva lima pritisnuta elektrodama oblika diska, i sile pritiska, sl. 1.1-17. Pri tome nastaje spoj (šav), koji može da se shvati kao niz tačaka, po pravilu delimično prekrivenih, koje obrazuju neprekidan šav, sl. 1.1-17c. Bitna razlika šavnog zavarivanja u odnosu na tačkasto zavarivanje je oblik elektrode (disk umesto šipke - sl. 1.1-17d) i njeno obrtanje oko sopstvene ose, sl. 1.1-17a. Osim toga, kod šavnog zavarivanja je neophodno relativno kretanje elektroda i osnovnog materijala u pravcu obrazovanja šava, sl. 1.1-17a. [avno zavarivanje može da se izvodi dvostrano, sl. 1.1-17a, ili jednostrano, sl. 1.1-17b, u slučaju da nisu pristupačne obe strane.



Slika 1.1-17. [ema šavnog zavarivanja a) dvostrano; b) jednostrano; c) presek šava d) elektroda

### KLASIFIKACIJA POSTUPAKA ZAVARIVANJA

Danas se smatra da je 98 postupaka zavarivanja osvojeno i primenjeno u praksi, uključujući lemljenje, kao što je definisano u standardu ISO 4063 (EN 24063). 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, a u drugu grupu oni postupci kod kojih se proces spajanja odvija bez topljenja. Osim toga, postupci zavarivanja se često dele prema izvoru energije: električna (luk, otpor, snop), hemijska (plamen, eksploziv, termi), 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 (elektrolučno, elektrootporno, gasno, zavarivanje u čvrstom stanju, drugi postupci zavarivanja, lemljenje) i način označavanja su definisani u standardu JUS C.T3.012, tab. 1.1-10. Osnovne prednosti, mane i primena najvažnijih postupaka zavarivanja su date u tab. 1.1-8 i 11.1-9.

## Smernice za izbor postupaka zavarivanja

Tabela 1.1-8. Prednosti i nedostaci postupaka zavarivanja topljenjem

Postupak zavarivanja	Prednosti	Nedostaci	Primena
Zavarivanje topljenjem	Raznolikost postupaka i oblika spojeva. Mali troškovi za većinu postupaka. Dobre osobine spojeva čelika i drugih legura.	Metalurške promene u metalu šava i ZUT.	
Elektro-otporno zavarivanje	Izvođe ga obučeni ili priučeni radnici. Potrebna je mala priprema i neznatna naknadna obrada zavara.	Ograničen izbor oblika spoja. Ograničena prenosivost opreme.	Primena za proizvode od tankih limova.
Gasno zavarivanje	Mali troškovi za opremu.	Mali stepen iskorišćenja. Česta su vitoperenja spoja. Osobine spoja često loše.	U popravkama (reparaturama) i održavanju.
Elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom (E)	Raznovrsni oblici spojeva. Zavarivanje u svim položajima. Jeftina priprema i oprema. Dobre osobine zavarenih spojeva čelika i drugih legura.	Zahteva obuku zavarivača. Elektroda se često menja. Pri radu u više prolaza potrebno uklanjanje troske.	Veoma korišćen postupak u izradi nove opreme, reparaturama i održavanju.
Elektrolučno zavarivanje pod praškom (EPP)	Automatski postupak. Velika brzina zavarivanja i produktivnost.	Ograničen položaj zavarivanja i primena na nelegirane i niskolegirane čelike.	Sučeon i ugaoni spojevi većih debljina i dužina.
Zavarivanje ne-topljivom elektrodom, zaštita inertnim gasom (TIG)	Raznovrsni tipovi spoja. Zavarivanje u različitim položajima. Moguće izvođenje ručno, mehanizovano i automatsko. Visok kvalitet zavarenog spoja.	Visoka cena zaštitnog gasa. Potrebni su dobro obučeni zavarivači. Zavarivanje u više prolaza pri većoj debljini.	Velika primena za neželjezne metale. Zavarivanje korenog šava ako ne može da se izvede potkoren.
Zavarivanje elek. žicom, zaštita inertnim gasom (MIG)	Visok kvalitet zavarenog spoja kod velikog broja legura. Velika zapremina istopljenog metala. Poluautomatsko i automatsko izvođenje.	Visoka cena inertnog gasa. Potrebna dobra obučenost izvršioca.	Najveća primena kod austenitnih čelika i drugih legura.
Zavarivanje el. žicom, aktivni gas (MAG), prenos u kapljicama	Velika dubina uvarivanja. Niska cena zaštitnog gasa.	Horizontalni i horizontalno-vertikalni položaj. Nelegirani i niskolegirani čelici debljine iznad 6 mm.	Velika primena u proizvodnji posebno u slučaju manjih zahteva u pogledu kvaliteta.
Zavarivanje el. žicom, aktivni gas (MAG), prenos u kratkom spoju	Dobar kvalitet zavarenog spoja. Polu-automatsko i automatsko zavarivanje. Primenljiv za debljine 1-4 mm, sa velikim zazorom i smaknutim ivicama.	Ograničen na nelegirane i niskolegirane čelike. Postoji opasnost od pojave nespojenih mesta.	Zavarivanje korena kod većih debljina lima.
Impulsno MIG/MAG zavarivanje	Zavarivanje u svim položajima, velikog raspona debljina mnogih materijala.	Umereni troškovi. Složenija oprema.	Pogodan za nerđajuće čelike i druge legure.
Zavarivanje plazmom	Velika brzina zavarivanja. Zavarivanje debljina od 0,1 do 8 mm.	Skupa oprema. Otežano zavarivanje lakih metala. Samo horizontalan položaj.	Zavarivanje tankih materijala.
Zavarivanje pod troskom (EPT)	Automatski postupak velike brzine sa velikim udelom istopljenog materijala. Pogodan za velike debljine delova od nelegiranih i niskolegiranih čelika.	Samo u vertikalni položaj, uz pažljivo postavljanje opreme. Gruba struktura. Potrebna termička obrada.	Zavarivanje u proizvodnim pogonima i gradilištima.
Zavarivanje elektronskim snopom	Velika dubina uvarivanja i produktivnost. Visok kvalitet zavarenih spojeva. Minimalna deformacija. Mogu da se zavare finalno obrađeni sklopovi.	Skupa oprema i zavarivanje. Dimenzije delova ograničene dimenzijama vakuum komora.	Ograničena primena, za proizvodnju specijalnih delova.
Zavarivanje laserom	Omogućava primenu vrlo visoko koncentrisanih izvora toplote u bilo kojoj atmosferi.	Visoki troškovi. Delovi sa površinama koje reflektuju se ne mogu zavariti.	Postupak je u fazi razvoja.

Tabela 1.1-9. Prednosti, nedostaci i primena postupaka zavarivanja u čvrstom stanju

Postupak zavarivanja	Prednosti	Nedostaci	Primena
Zavarivanje u čvrstom stanju	Izuzetno dobre osobine spoja. Mala promena osobina osnovnog materijala	Ograničen izbor oblika spoja. Oprema glomazna, neprenosiva i skupa.	
Zavarivanje eksplozijom	Izuzetno dobre osobine spoja. Pogodan za spajanje raznorodnih metala. Ne angažuje veliki broj specijalizovanih zavarivača pri zavarivanju.	Ograničen izbor oblika spoja. Velika opasnost zbog korišćenja eksploziva.	Plakiranje. Spajanje cevi za cevnu ploču. Zavarivanje cevi na gradilištima.
Zavarivanje trenjem	Izuzetno dobre osobine spoja. Pogodan za spajanje raznorodnih metala. Mala potrošnja energije.	Ograničen na sučeone spojeve malih površina. Neophodna naknadna mehanička obrada. Skupa oprema.	Spajanje vijaka, spajanje okruglih šipki sa cevima. Zavarivanje cevi na gradilištima.
Zavarivanje ultrazvukom	Velika produktivnost. Mala potrošnja energije.	Nedovoljna snaga izvora. Skupa oprema.	Zavarivanje plastike i tankih metalnih delova
Zavarivanje difuzijom	Odsustvo metalurških promena.	Izuzetno skupa oprema. Dugotrajan proces.	Spajanje delova od skupih legura

Tabela 1.1-10. Klasifikacija postupaka zavarivanja

<b>1</b>	<b>Elektrolučno zavarivanje</b>	<b>4</b>	<b>Zavarivanje u čvrstom stanju</b>
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	<b>7</b>	<b>Drugi postupci zavarivanja</b>
141	inertni gas - TIG	71	aluminotermitsko
15	plazmom	72	električno pod troskom - EPT
185	magnetno elektrolučno rotirajućim lukom	74	indukciono
<b>2</b>	<b>Elektrotoporno zavarivanje</b>	751	laserom
21	tačkasto	76	elektronskim snopom
22	šavno	<b>91</b>	<b>Tvrdo lemljenje</b>
23	bradavičasto	913	u peći
24	sučeono varničanjem	914	uronjavanjem u soli
25	sučeono zbijanjem	916	indukciono
<b>3</b>	<b>Gasno zavarivanje</b>	<b>94</b>	<b>Meko lemljenje</b>
311	oksi-acetilenskim plamenom	<b>97</b>	<b>Zavarivačko lemljenje</b>