

2.3 SPECIFIČNOSTI POSTUPKA ZAVARIVANJA PRAŠKOM PUNJENIM ŽICAMA

2.3.1 Parametri zavarivanja

Na kvalitetu zavarenog spoja najveći utjecaj imaju upravo parametri zavarivanja, pa je iz tog razloga jako bitan izbor optimalnih parametara zavarivanja, koji se biraju s obzirom na vrstu i debljinu materijala koji se zavaruje, te oblik spoja i položaj zavarivanja, a utvrđuju se ispitivanjem na probnim uzorcima.

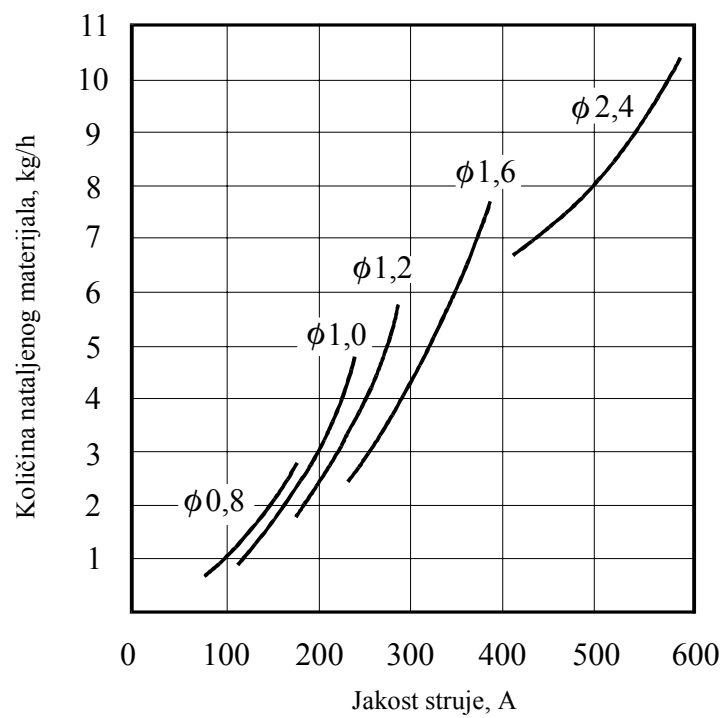
Glavni parametri zavarivanja su:

- a) jakost struje zavarivanja,
- b) napon električnog luka,
- c) brzina zavarivanja,
- d) promjer žice,
- e) količina i vrsta zaštitnog plina.

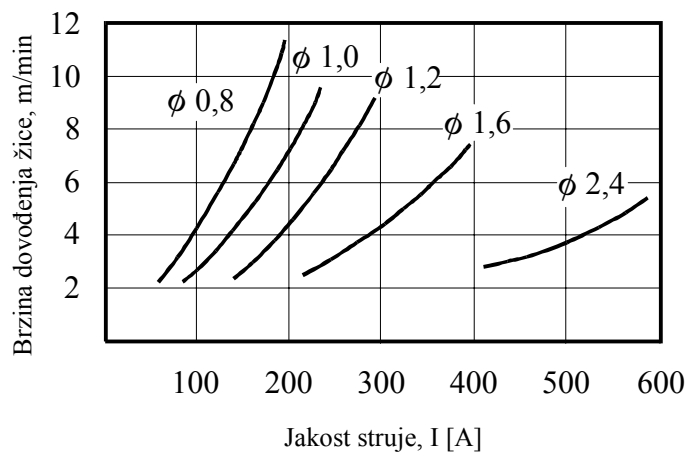
Osim navedenih, na kvalitetu zavarenog spoja utječu i drugi parametri, npr. duljina slobodnog kraja žice.

a) Jakost struje zavarivanja

Jakost struje zavarivanja, a time i napon električnog luka, ovisi o debljini i vrsti materijala koji se zavaruje, obliku spoja, položaju zavarivanja i promjeru žice. Kod zavarivanja u vodoravnom položaju debljih materijala primjenjuju se žice većeg promjera i zavarivanje se vrši uz veliku jakost struje, dok su kod zavarivanja u prisilnom položaju jakosti struje manje bez obzira na debljinu materijala. Orijentacijske vrijednosti struje zavarivanja kod MAG postupka kreću se u granicama od 50A do 600A. Jakost struje utječe na količinu rastaljenog materijala u jedinici vremena, dubinu protaljivanja, oblik zavara i količinu unesene topline.



Slika 2.2 *Utjecaj jakosti struje na količinu nataljenog materijala*



Slika 2.3 Odnos jakosti struje i brzine dovođenja žice za različite promjere

Zbog povećanja učinkovitosti pri zavarivanju proizvoda od nelegiranih konstrukcijskih čelika, gdje god je moguće koristi se što veća jakost struje uz odgovarajući napon električnog luka i promjer žice za zavarivanje. Jakost struje i brzina zavarivanja izravno utječu na količinu unesene topline u procesu zavarivanja, stoga treba voditi računa o debljini materijala i broju prolaza.

Količina unesene topline u procesu zavarivanja izračunava se prema izrazu:

$$E = \frac{I \cdot U \cdot 60}{v \cdot 1000} \cdot \eta, \text{ [kJ/cm]}$$

gdje je:

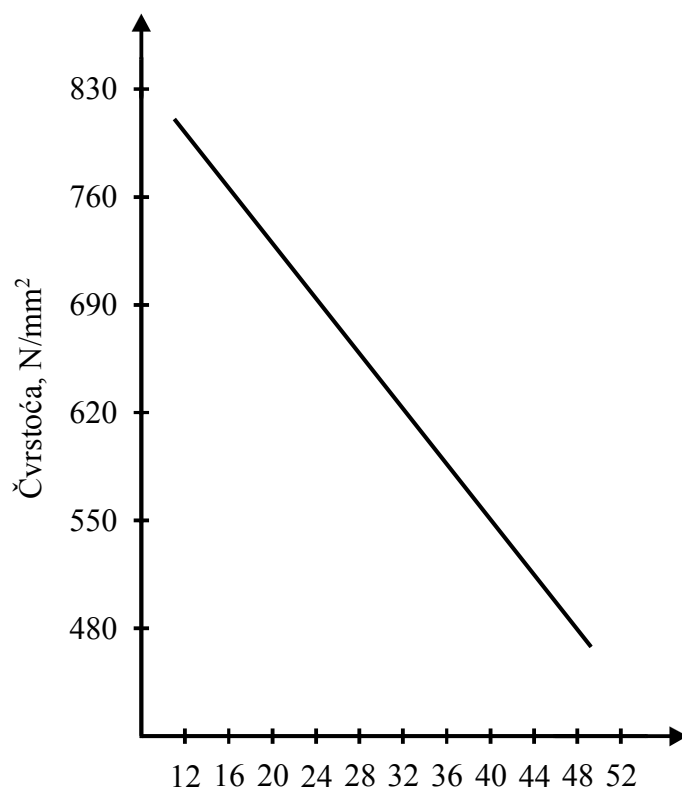
I - jakost struje zavarivanja, A

U - napon električnog luka, V

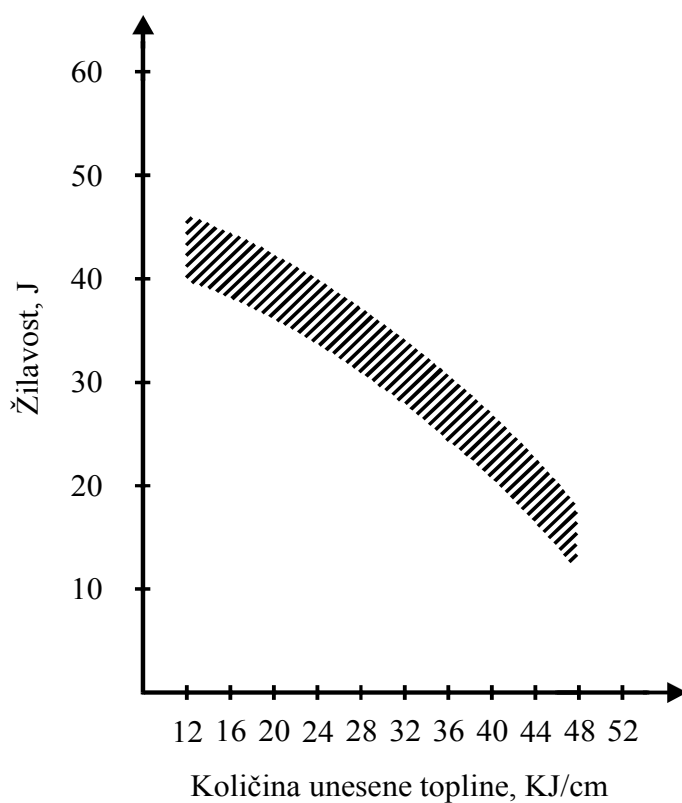
v - brzina zavarivanja, cm/min

η - stupanj iskorištenja električnog luka

Količina unesene topline utječe na brzinu hlađenja, a time i na mehanička svojstva materijala zavara.

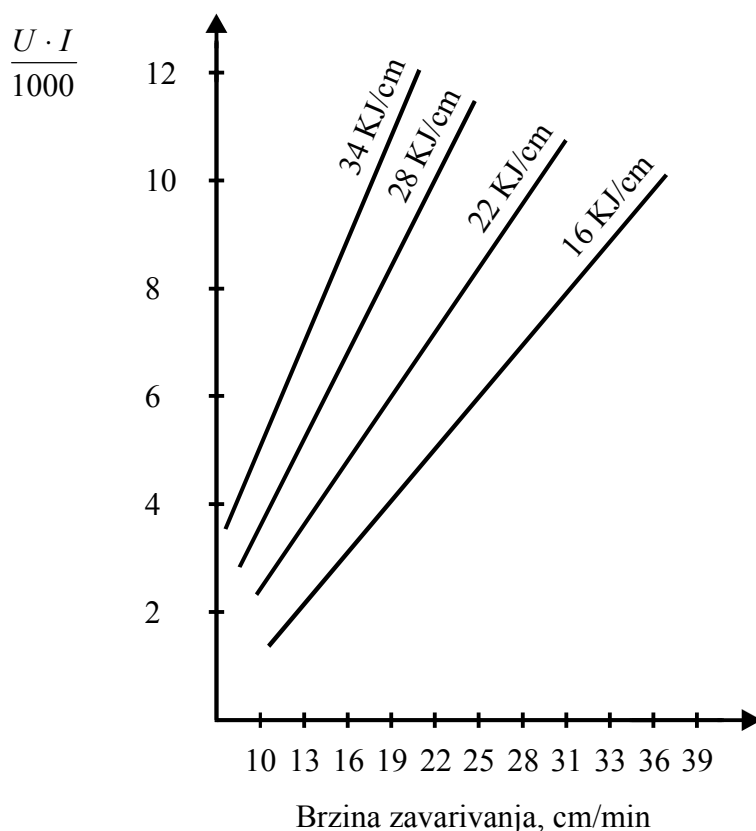


Slika 2.5 Utjecaj unesene topline na čvrstoću materijala zavara



Slika 2.4 Utjecaj unesene topline na žilavost zavara

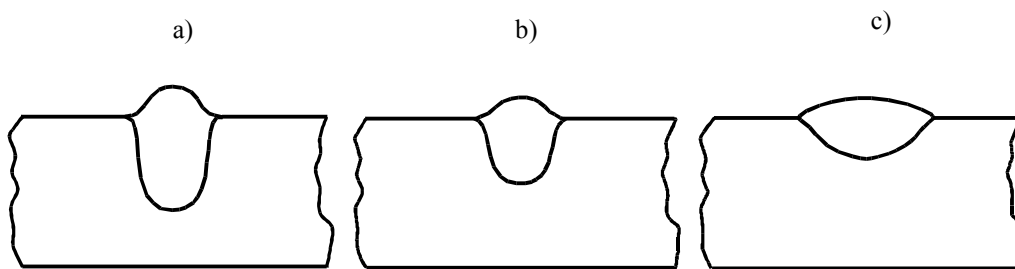
Kada je riječ o zavarivanju sitnozrnatih i CrNi, CrNiMo čelika, parametri zavarivanja su ograničeni jer se količina unesene topline kreće u rasponu od 10 do 18 KJ/cm, pa se iz tog razloga propisuju. Brzina zavarivanja za zadanu jakost struje zavarivanja i napon električnog luka treba biti prilagođena zahtijevanoj količini unesene topline. Na slici 2.7 je prikazana ovisnost brzine zavarivanja o zadanoj količini unesene topline i snazi električnog luka.



Slika 2.5 Ovisnost brzine zavarivanja o unesenoj toplini i snazi električnog luka

b) Napon električnog luka

Orijentacijske vrijednosti napona električnog luka kod MAG postupka zavarivanja kreću se u granicama od 16V do 38V. Napon električnog luka utječe na dubinu protaljivanja, širinu i nadvišenje zavora i može se poistovjetiti sa duljinom luka pa tako većem naponu električnog luka odgovara veća duljina luka. Povećanjem napona električnog luka uz istu jakost struje zavarivanja pri prijenosu metala kratkim lukom povećava se i broj kratkih spojeva. Učestali kratki spojevi znače kraće održavanje električnog luka i hladnije zavarivanje. Na slici 2.8 je prikazan utjecaj napona električnog luka na protaljivanje i širinu zavora uz istu jakost struje u području štrcajućeg luka.



Slika 2.6 Utjecaj napona luka na protaljivanje i širinu zavora pri istim jakostima struje u području štrcajućeg luka

(a-niski napon, b-srednji napon, c-visoki napon)

Iz slike je vidljivo da viši napon uz istu struju zavarivanja daje manju dubinu protaljivanja i veću širinu zavora (ljepši zavar). Previsok napon luka uzrokuje povećano rasprskavanje kapljica rastaljenog metala zavora. Prevelika duljina luka smanjuje zaštitu metalnih kapljica u prijelazu i loše utječe na svojstva zavarenog spoja.

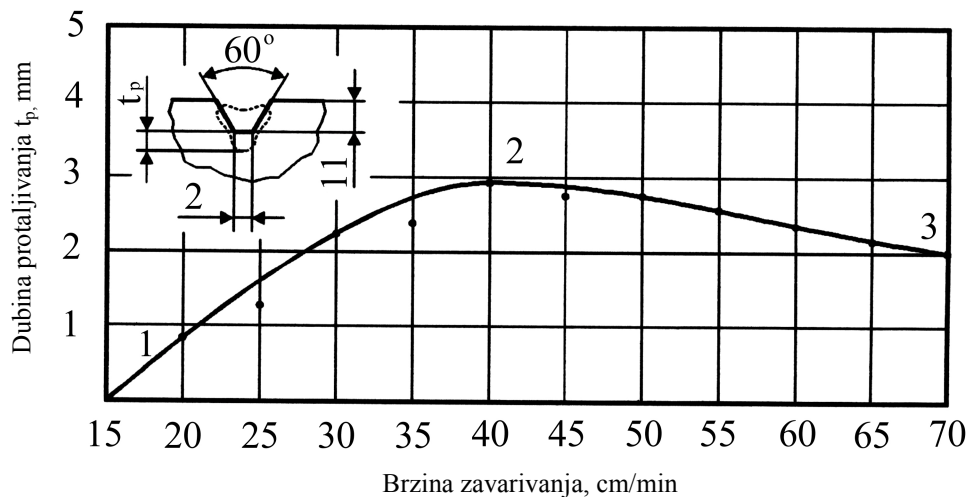
c) Brzina zavarivanja

Brzina zavarivanja, odnosno brzina vođenja električnog luka, utječe na dubinu protaljivanja, širinu zavora te na količinu unesene topline u materijal u zoni utjecaja topline.

Kod nedostatne brzine zavarivanja veći je unos topline, a time je i veća količina rastaljenog materijala, zbog čega dolazi do bježanja taline ispred električnog luka na hladnom materijalu, što uzrokuje pojavu pogreške naljepljivanja. S obzirom da luk ne može prodirati kroz talinu, protaljivanje je slabo, a zbog pregrijanosti taline dolazi do vrtloženja zaštitnog plina, čija je posljedica slabija zaštita i pojava poroznosti u zavarenom spoju.

Pri prevelikoj brzini zavarivanja dolazi do rasipanja energije po većoj površini, uslijed čega je protaljivanje slabo i dolazi do pojave zareza, a zavar je uzak i nadvišen.

Optimalna brzina se određuje u skladu sa drugim parametrima zavarivanja. Na slici 2.2 prikazan je utjecaj brzine zavarivanja na dubinu protaljivanja (MAG postupak zavarivanja punjenom žicom $\varnothing 1.2$ mm, brzina dovođenja žice 9.5 m/min, odstojanje kontrolne vodilice 18 mm, zavarivanje u vodoravnom položaju).



Slika 2.7 Utjecaj brzine zavarivanja na dubinu protaljivanja kod MAG postupka zavarivanja žicom promjera $\varnothing 1,2$ mm, brzina dovođenja žice 9,5 m/min, odstojanje kontaktne cjevčice 18 mm, zavarivanje u vodoravnom položaju

- 1- minimalno protaljivanje kod malih brzina zavarivanja i bježanje taline ispred električnog luka
- 2- maksimalno protaljivanje kod optimalne brzine zavarivanja
- 3- malo protaljivanje kod velike brzine zavarivanja

d) Promjer žice za zavarivanje

Promjer žice utječe na gustoću struje tako što ista jakost struje i manji promjer žice daju veću gustoću struje koja uzrokuje veću dubinu provarivanja, uži zavar i veću brzinu dovođenja žice. Izbor promjera žice određuje se prema debljini materijala, obliku spoja i položaju zavarivanja pa se, na primjer, za izvođenje korijena zavora s provarivanjem na sučeonom spoju bira žica 1.0 ili 1.2 mm bez obzira na debljinu materijala i položaj zavarivanja. Za popunu takvog žlijeba u prisilnom položaju zavaruje se istom žicom, dok se za popunu u vodoravnom položaju odabire žica većeg promjera, primjerice 1.6 mm. Za slučaj da se provarivanje korijena zavora izvodi na keramičkoj podlozi u vodoravnom položaju, najčešće se koristi žica promjera 1.6 mm s kojom se vrši i popuna žlijeba, dok se u prisilnom položaju pri izvođenju kutnog zavora primjenjuje žica promjera 1.2 mm.

Promjeri žice koji se koriste kod MAG postupka zavarivanja su 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.6, i 2.4 kod punih žica te, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 2.0, 2.6, 3.2, 4 i 5 mm kod praškom punjenih žica.

Jakost struje zavarivanja i napon električnog luka različiti su kod različitih promjera žice. U tablici 2.3 nalaze se granične vrijednosti jakosti struje zavarivanja i napona električnog luka u odnosu na promjer žice kod MAG postupka zavarivanja.

Promjer žice (mm)	Jakost struje I , A		Napon električnog luka U , V	
	min	max	min	max
0.8	50	200	16	25
1.0	80	230	18	25
1.2	100	380	18	35
1.6	150	450	22	35
2.4	380	650	26	38

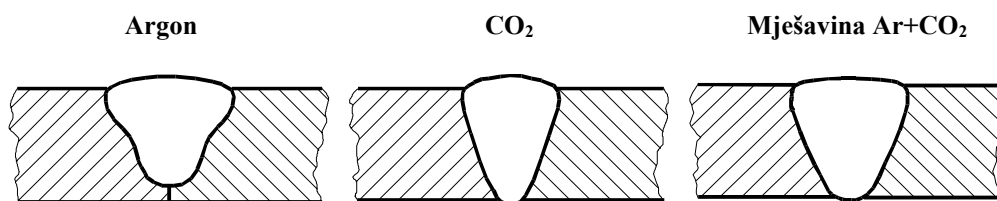
Tablica 2.10 *Granične vrijednosti jakosti struje zavarivanja i napona električnog luka u odnosu na promjer žice kod MAG postupka zavarivanja*

e) Količina i vrsta zaštitnog plina

Poznavanje utjecaja zaštitnog plina je neophodno za procjenu njegovog djelovanja na:

- fizikalno-električna svojstva električnog luka, odnosno prijenos metala sa elektrode na radni komad,
- metalurške procese u kupki zavara,
- tehnološke parametre.

Ako se usporede najčešće uporabljivani plinovi, može se uočiti da argon (Ar), koji ima nisku toplinsku vodljivost, daje usku zonu jezgre luka za razliku od ugljičnog dioksida (CO_2), koji ima veću toplinsku vodljivost i prema tome daje širu jezgru luka. Ova se svojstva nadalje odražavaju na dubinu protaljivanja i izgled zavara, što se vidi iz slike 2.10, koja prikazuje izgled zavara u ovisnosti o primijenjenoj vrsti zaštitnog plina.

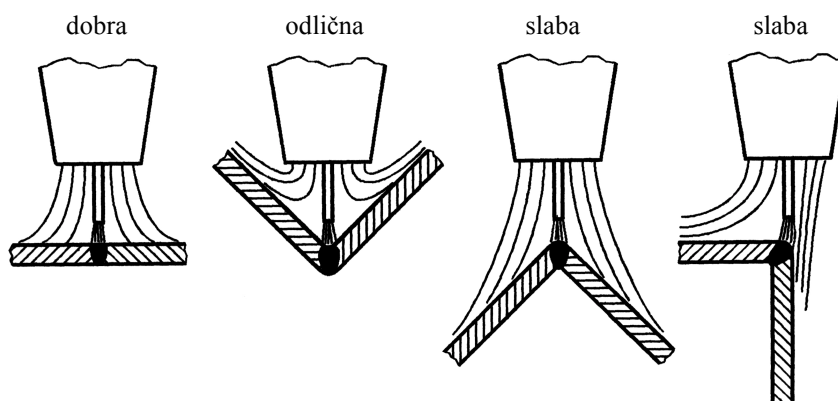


Slika 2.8 *Izgled zavara u ovisnosti o primijenjenom zaštitnom plinu*

Količina zaštitnog plina se određuje prema jakosti struje zavarivanja, promjeru žice, obliku spoja, te mjestu i uvjetima rada. U procesu zavarivanja strogo treba voditi računa o količini zaštitnog plina jer ona ima direktan utjecaj na kakvoću zavara, tako, na primjer,

premala količina ne stvara dovoljnu zaštitu mjesta zavora, a prevelika uzrokuje jako strujanje i pojavu vrtloženja plina, što se, kao i u slučaju nedovoljne količine, izravno odražava na kvalitetu zavarenog spoja na način da povećava vjerojatnost pojave niza grešaka, ponajviše poroznosti.

Orijentacijske vrijednosti količine zaštitnog plina kod MAG postupka zavarivanja za niske struje zavarivanja kreću se oko 12 l/min, za srednje jakosti struje oko 15 l/min, dok se kod viših jakosti kreću oko 20 l/min. Otežani uvjeti, kao što je npr. rad na otvorenom prostoru uz povećano strujanje zraka, zahtijevaju veću količina zaštitnog plina. Oblik spoja također utječe na kvalitetu zaštite mjesta zavarivanja, kao što je prikazano na slici 2.4.



Slika 2.9 Utjecaj oblika spoja na kvalitetu zaštite mjesta zavarivanja

Vrsta zaštitnog plina	Molni udi pojedinog plina	Karakteristike električnog luka		
		napon	stabilnost	prijenos metala
CO ₂	99.9 % CO ₂	srednji	dobra	dobra, ponekad pojačano štrcanje
CO ₂ +O ₂	1-2 % O ₂ ostalo CO ₂	visoki	srednja do loša	zadovoljavajući
Ar+O ₂	2-25 % CO ₂ ostalo Ar	niski do srednji	dobar	dobar
Ar+CO ₂ +O ₂	5-20 % CO ₂ 4-5 % O ₂ ostalo Ar	srednji	dobar	dobar
Ar+O ₂	1-12 % O ₂ ostalo Ar	niski	dobar	dobar

Tablica 2.11 Zaštitni plinovi za MAG postupak zavarivanja

Duljina slobodnog kraja žice je ona duljina koja se nalazi izvan kontaktne cjevčice pištolja za zavarivanje, a ovisi o udaljenosti kontaktne cjevčice pištolja od mjesta zavarivanja. Povećanjem duljine slobodnog kraja žice pri konstantnoj brzini dovođenja smanjuje se jakost struje zavarivanja. Da bi vrijednost jakosti struje zavarivanja ostala konstantna, brzina dovođenja žice mora rasti, što u procesu zavarivanja osigurava regulator.

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}, (\Omega)$$

$$I = \frac{U}{R}, (A)$$

gdje su:

R - otpor struje zavarivanja, (Ω)

ρ - specifični otpor, ($\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$)

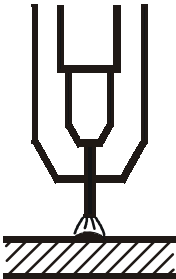
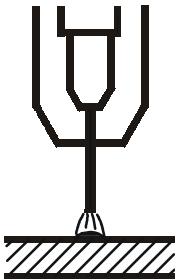
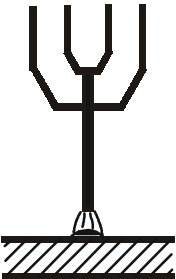
l - duljina vodiča, (m)

A - površina presjeka vodiča, (mm^2)

U - napon struje zavarivanja, (V)

I - jakost struje zavarivanja, (A)

Duljina slobodnog kraja žice izravno utječe na produktivnost kroz povećanje ili smanjenje brzine dovođenja, što se vidi iz slike 2.12.

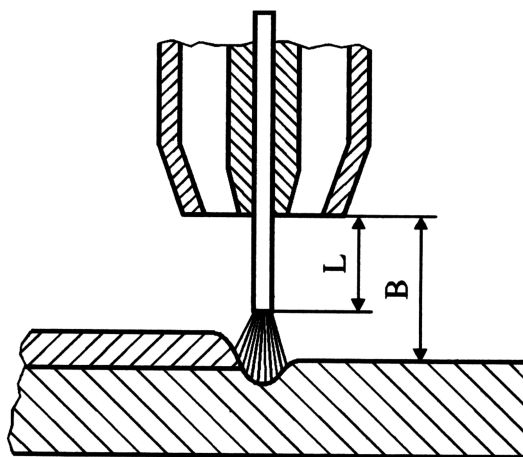
			
Razmak između kontrolne cjevčice i radnog komada, (mm)	10	18	25
Brzina dovođenja žice, (cm/min)	8	9.5	11
Jakost struje zavarivanja, (A)	300	300	300
Količina nataljenog materijala, (kg/h)	4.2	5.0	5.8

Slika 2.10 *Prikaz utjecaja duljine slobodnog kraja žice na količinu nataljenog materijala kod iste jakosti struje zavarivanja*

Preporučena duljina slobodnog kraja žice i udaljenost sapnice za određenu jakost struje prikazane su u tablici 2.1.

Jakost struje I , A	Duljina slobodnog kraja žice L , mm	Udaljenost sapnice L , mm
50	5	10
100	6	10
150	8	10
200	10	12
250	12	12
300	14	12
350	17	15
400	25	15

Tablica 2.12 Ovisnost duljine slobodnog kraja žice i udaljenosti sapnice za određenu jakost struje zavarivanja



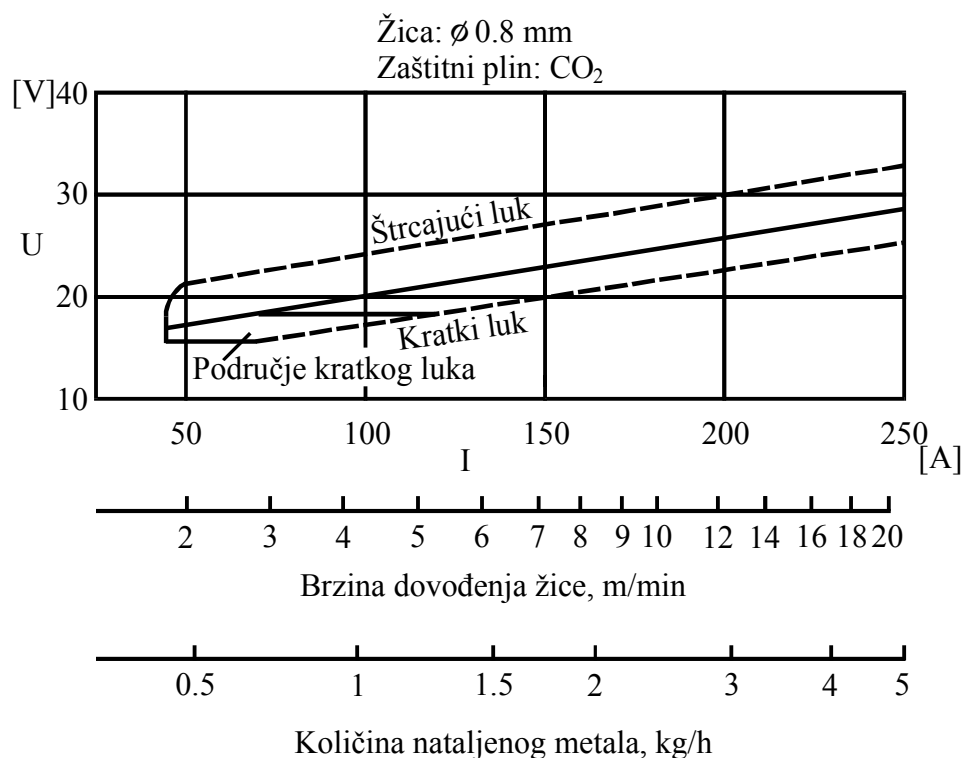
Slika 2.11 Prikaz udaljenosti sapnice i duljine slobodnog kraja žice

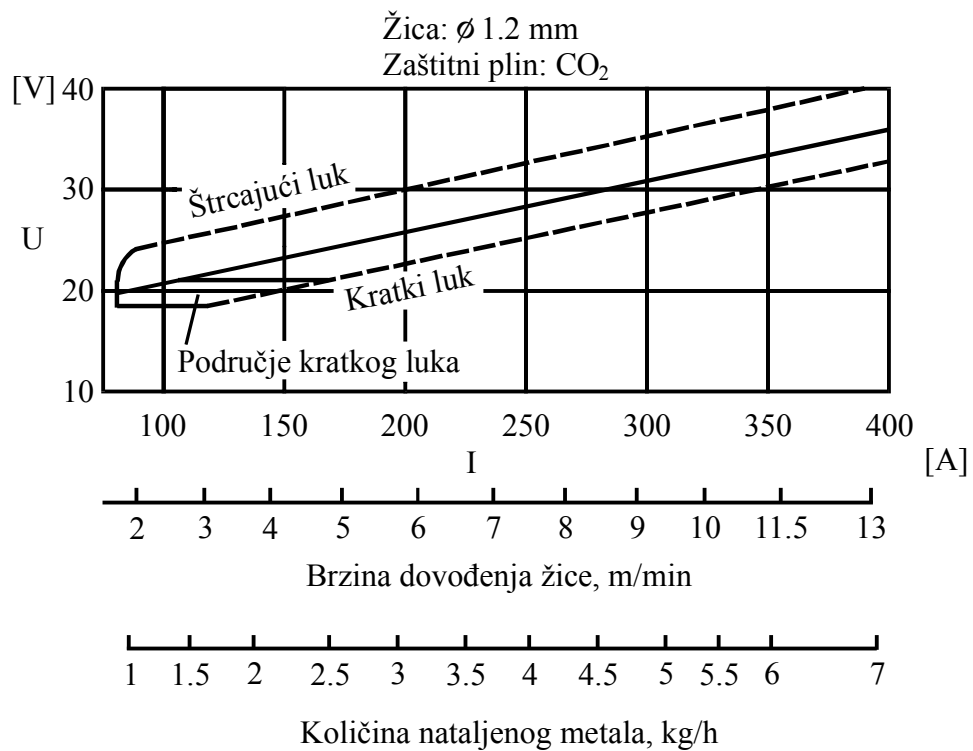
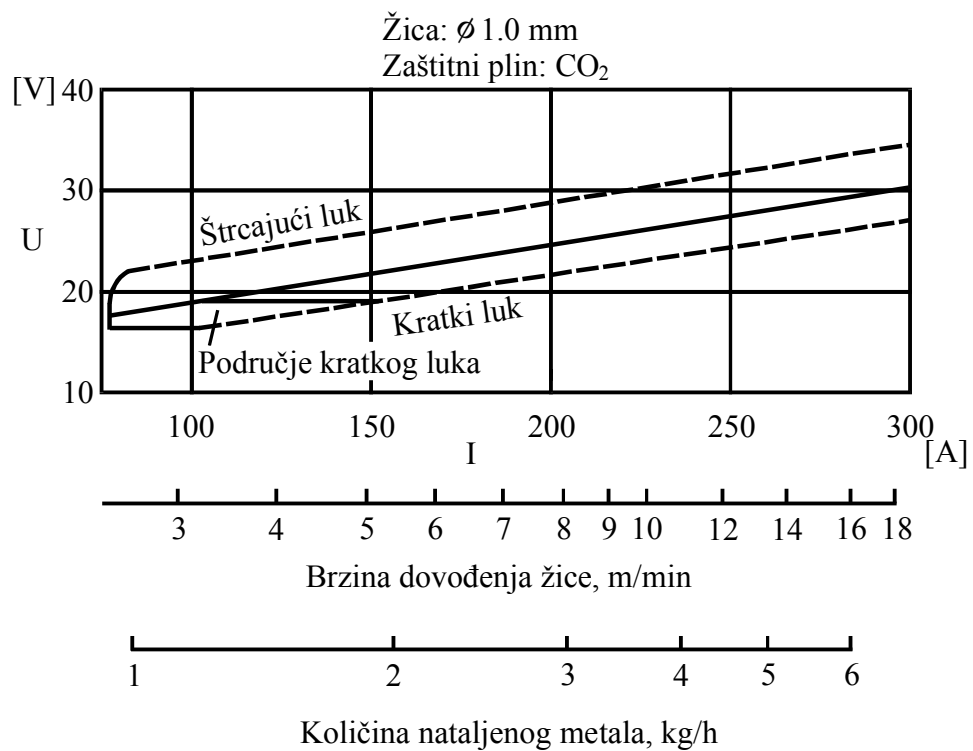
Kod malih jakosti struje zbog male duljine slobodnog kraja žice kontaktna vodilica djelomično izlazi izvan sapnice da se zavarivaču omogući što bolji pregled mjesta zavarivanja.

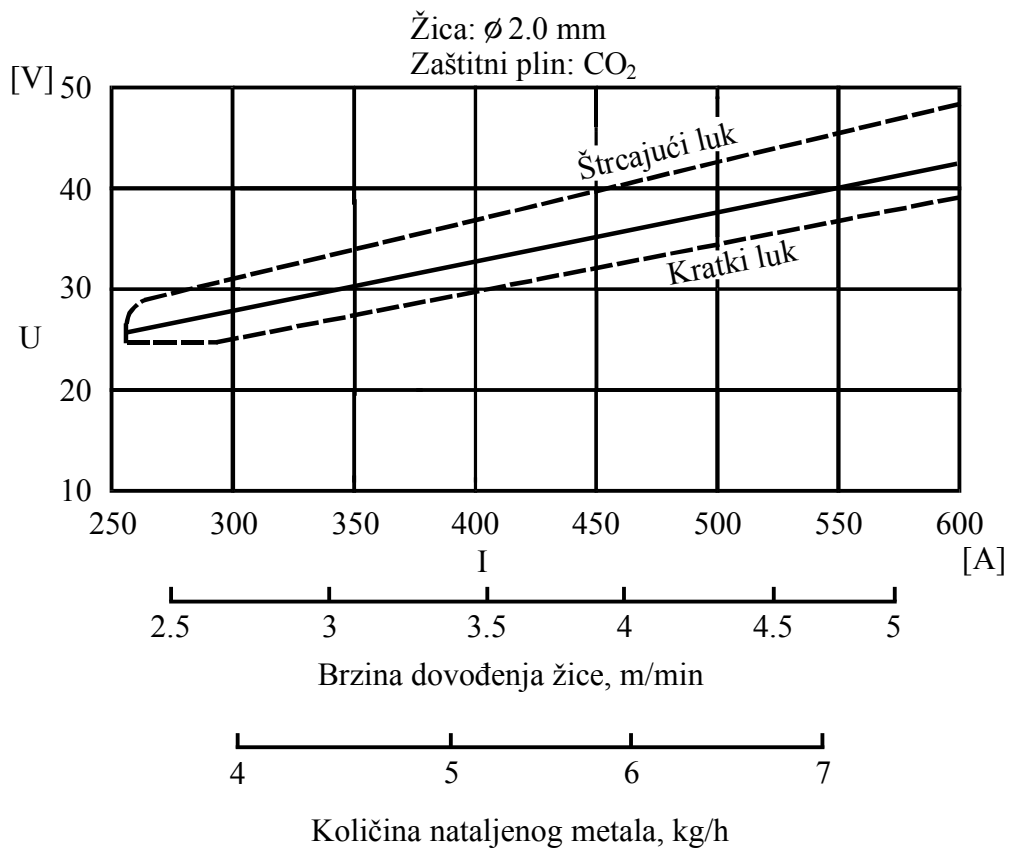
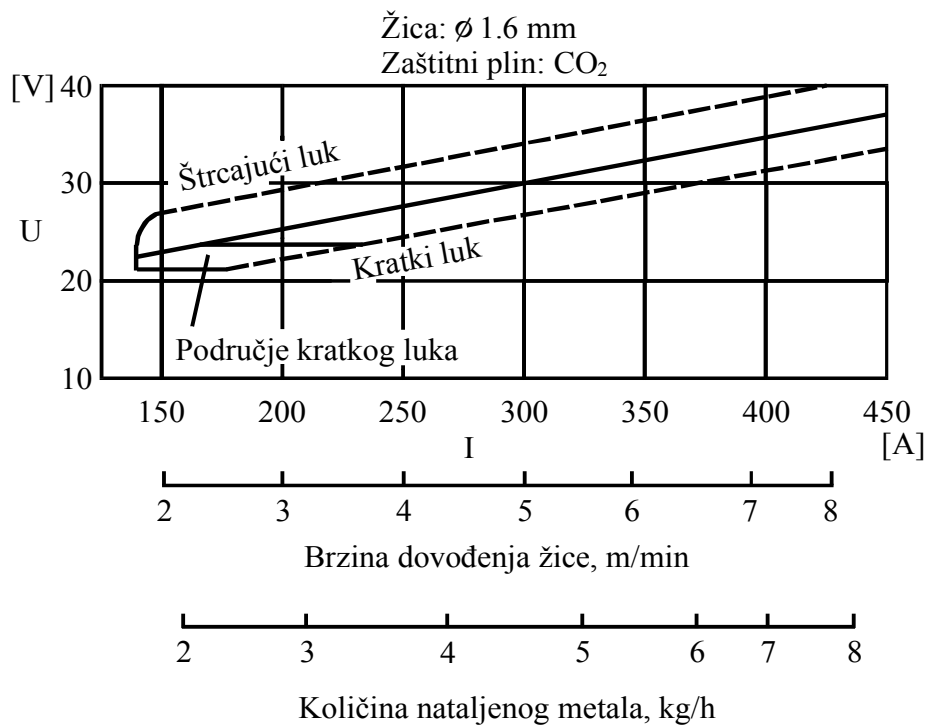
2.3.2 Praktično određivanje parametara zavarivanja

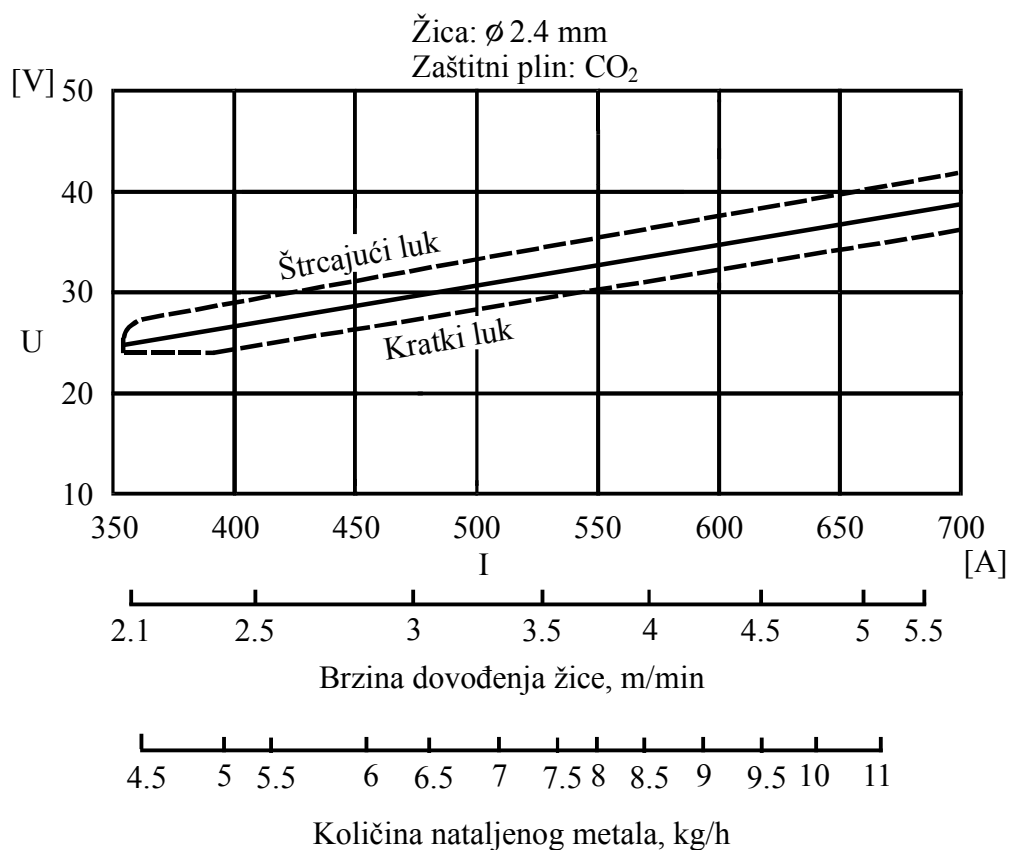
Parametri zavarivanja biraju se određenim redoslijedom. Prvo se odabire promjer i tip žice na osnovu vrste i debljine osnovnog materijala, oblika spoja i položaja zavarivanja, zatim se odabire jakost struje i brzina dovođenja žice ovisno o vrsti električnog luka (načinu prijenosa metala u električnom luku). Nakon tako odabranih parametara pristupa se zavarivanju probnog uzorka, pri čemu se promatra stabilnost i visina električnog luka. Na vrijednost parametara u

procesu zavarivanja utječe i temperatura između prolaza, pa iz tog razloga zavarivač podešava parametre tijekom samog procesa zavarivanja. Izrazita potreba za namještanjem parametara se javlja nakon prvog prolaza (prije polaganja drugog), jer je temperaturna razlika lica zavara i taljenja žice manja nego taljenja žice i korijena žlijeba kod polaganja prvog prolaza, što se odražava na stabilnost električnog luka. Definiranjem parametara zavarivanja traži se optimalna radna točka, tj. optimalni parametri zavarivanja, koji su prepoznatljivi po najmirnijem električnom luku s najmanjim rasprskavanjem kapljica rastaljenog metala zavara. Za praktično određivanje parametara zavarivanja mogu poslužiti razni dijagrami. Ti se dijagrami mogu naći u nekim priručnicima za zavarivanje i u uputama proizvođača dodatnih materijala. Slika 2.14 prikazuje dijagrame za najčešće korištene praškom punjene žice.





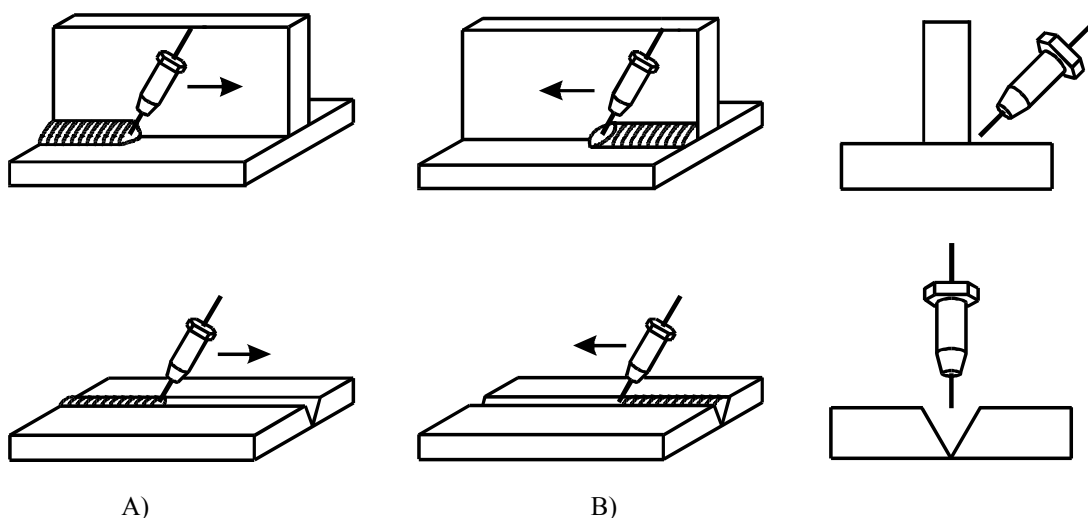




Slika 2.12 Dijagrami za praktično određivanje parametara zavarivanja

2.3.3 Tehnika rada

Za ostvarivanje kvalitetnog zavarenog spoja, pored točno odabranih parametara zavarivanja, nužna je i pravilna tehnika rada u procesu zavarivanja. Tehnika rada pri MAG postupku zavarivanja punjenom žicom gotovo je ista kao pri zavarivanju punom žicom. Može se zavarivati s lijeva udesno i s desna ulijevo, kao što je prikazano na slici 2.15.



Slika 2.13 Prikaz nagiba i smjera povlačenja pištolja pri zavarivanju praškom punjenim žicama

Pri zavarivanju s lijeva udesno (slika 2.6A) zavarivač ima bolji pregled u radu, veća je iskoristivost toplinske energije, bolje je protaljivanje i talina ne bježi ispod i ispred luka. Ova tehnika zavarivanja primjenjuje se kod zavarivanja debljih materijala.

Pri zavarivanju s desna ulijevo (slika 2.6B) slabiji je pregled u radu, manji je unos topline, manje je protaljivanje, što je povoljno pri zavarivanju tankih limova. Talina bježi ispred i ispod luka, pa u slučaju zavarivanja u žlijeb postoji opasnost od naljepljivanja i pojave uključaka troske.

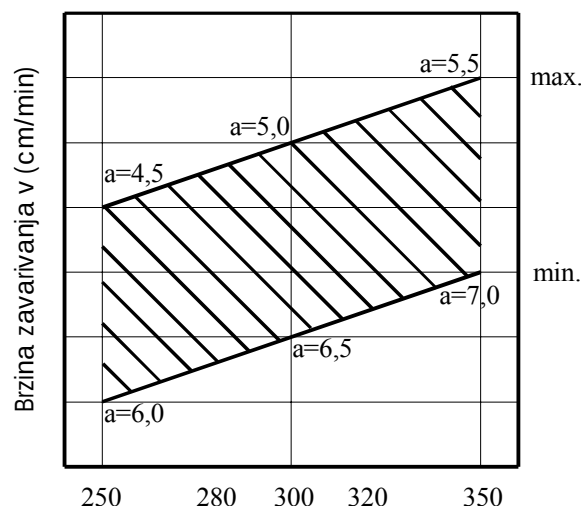
Zavarivanje korijena zavara sa potpunim protaljivanjem najsloženiji je dio posla u izvedbi zavarenog spoja, naročito s većim zahtjevima na kvalitetu (mala nadvišenost, glatka površina, bez prokapljivanja, zajeda i naljepljivanja). Izvedba korijena zavara MAG postupkom punom žicom rijetko zadovoljava prohtjeve kvalitete, za razliku od zavarivanja korijena zavara istim postupkom punjenom žicom. Već kod malih jakosti struja zavarivanja pojavljuje se štrcajući električni luk pa nema naljepljivanja, a korijen zavara je sličan kao kod REL postupka zavarivanja obloženom elektrodom.

U tehnici rada pri zavarivanju korijena zavara s potpunim provarivanjem potreban je razmak u grlu žlijeba (3 mm), bez obzira na debljinu materijala, oblik žlijeba i položaj zavarivanja.

U vertikalnom položaju, pri zavarivanju debljih limova, zavarivanje se obavlja odozdo prema gore, dok se u slučaju tankih limova proces vrši odozgo prema dolje. Korijen zavara s potpunim provarivanjem je izvediv u svim položajima, osim u nadglavnom. Posebno kvalitetan zavar postiže se zavarivanjem MAG postupkom praškom punjenom žicom na keramičkoj podlozi, što se često primjenjuje u brodogradnji. Tako izveden korijen zavara ne zahtijeva nikakvu naknadnu obradu.

U vodoravnom položaju zavarivanje se može izvoditi s vrlo velikim jakostima struje zavarivanja, osim pri zavarivanju čelika kod kojih je ograničen unos topline, kao npr. sitnozrnatih čelika gdje se zavarivanje izvodi u vezanim slojevima pri većim brzinama. Slično je i kod zavarivanja visokolegiranih CrNi, CrNiMo čelika.

Pri zavarivanju korijena kutnog zavarenog spoja MAG postupkom praškom punjenom žicom tehnika rada slična je kao i kod zavarivanja punom žicom. Kod zavarivanja korijena zavara u prisilnom položaju praškom punjenom žicom, kutni zavar se izvodi znatno većim jakostima struje zavarivanja u odnosu na punu žicu.

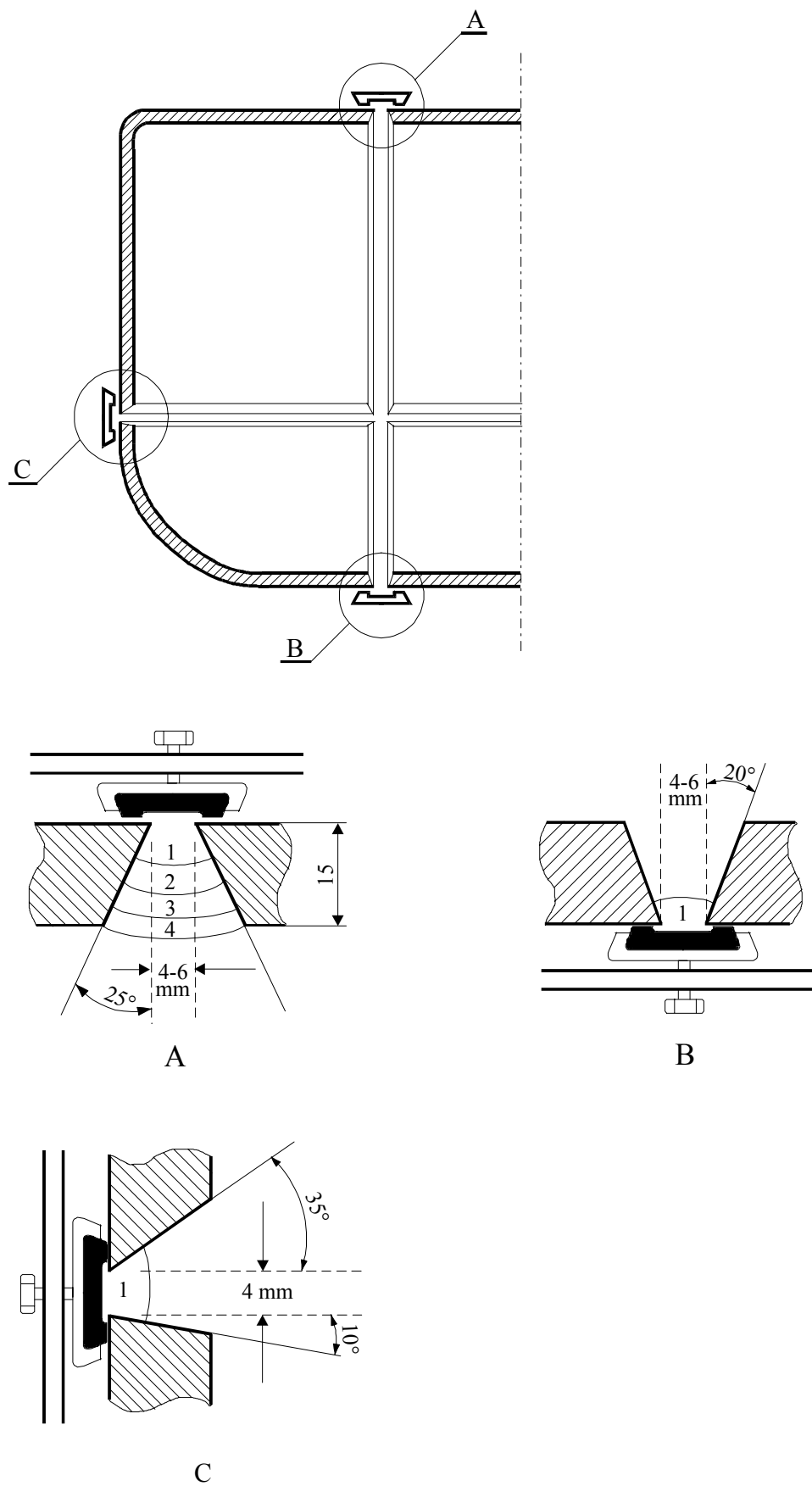


Slika 2.14 Područje odabira parametara zavarivanja korijena kod kutnog zavarenog spoja

2.3.4 Podloge za osiguranje kupke zavara

Zavarivanje uz primjenu praškom punjenih žica osigurava visoku produktivnost, stoga se takve žice uglavnom primjenjuju kao dodatni materijal u proizvodnji zavarenih konstrukcija za čiju izradu je potrebna velika količina nataljenog dodatnog materijala (depozita), primjerice u brodogradnji. Budući da se u većini slučajeva takve konstrukcije izrađuju od debljih limova i zavareni spojevi su većih dimenzija, zavaruje se uz više vrijednosti struje (bez većih ograničenja)

s ciljem postizanja što veće produktivnosti, na koju se postavljaju visoki zahtjevi. Kako su zavareni spojevi većih dimenzija, razmak u korijenu žlijeba je veći, s time se povećava vjerojatnost pojave prokapljivanja. S ciljem sprječavanja prokapljivanja rastaljenog materijala zavara (gubitka materijala) ugrađuju se podloge za osiguranje kupke zavara. Te se podloge izrađuju od keramike jer je to netaljiv materijal sa zanemarivom toplinskom dilatacijom. Oblici keramičkih podloga su različiti, kao i način njihova pridržavanja.



Slika 2.15 *Primjena podloga pri izradi brodske konstrukcije*

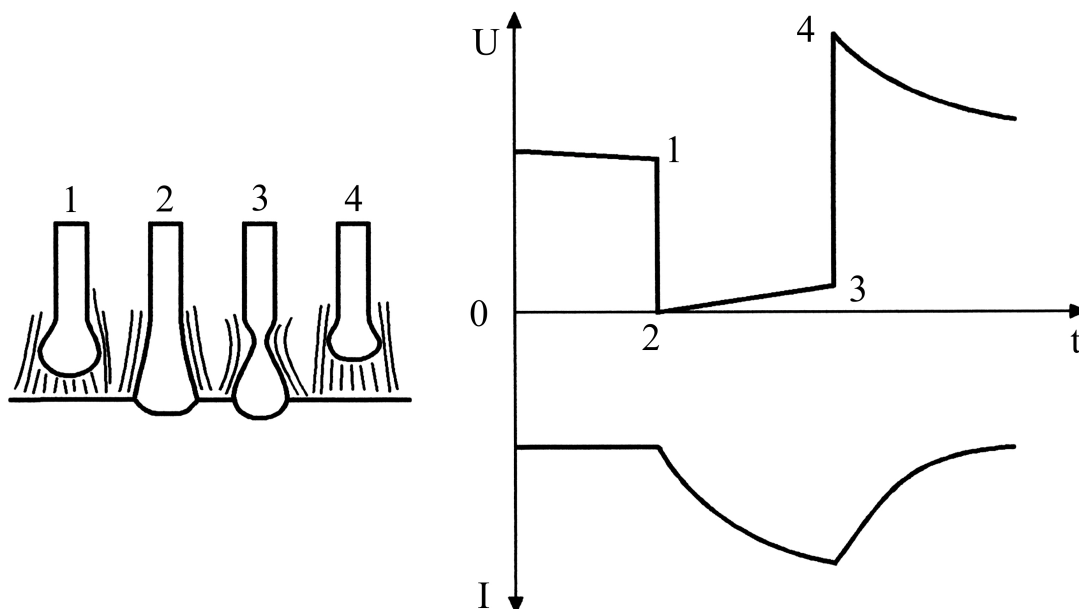
2.3.5 Načini prijenosa metala u električnom luku pri zavarivanju praškom punjenim žicama

Postoje dva osnovna načina prijenosa metala u električnom luku, a to su prijenos metala slobodnim letom i prijenos metala premošćivanjem. Prijenos metala slobodnim letom može se ostvariti štrcajućim i impulsnim lukom, a prijenos metala premošćivanjem se ostvaruje kratkim i mješovitim lukom.

a) Prijenos metala kratkim lukom (short arc).

Kod prijenosa metala kratkim lukom kapljica se formira na vrhu elektrode i raste uz održanje luka sve dok se ne spoji s talinom na mjestu zavara. Tad nastaje kratki spoj, uslijed čega dolazi do prekida luka, napon trenutačno pada na nulu, a jakost struje se naglo povećava. Presjek žice se smanji, kapljica se otkida i ponovo se uspostavlja električni luk. Ako je porast struje brz, dolazi do pojave rasprskavanja, a ako je porast spor otežano je odvajanje kapljice od vrha elektrode, te se narušava stabilnost električnog luka. Na brzinu porasta struje može se utjecati s dodatnim induktivitetom, tj. prigušnicom koja se ugrađuje u izvor struje zavarivanja.

Područje kratkog luka postiže se malim jakostima struje zavarivanja (50 - 170 A) i malim naponima luka (13 - 21 V). Zavarivanje kratkim lukom primjenjuje se za tanke limove, korijene zavara, te za zavarivanje u prisilnom položaju u zaštiti CO_2 i mješavina.

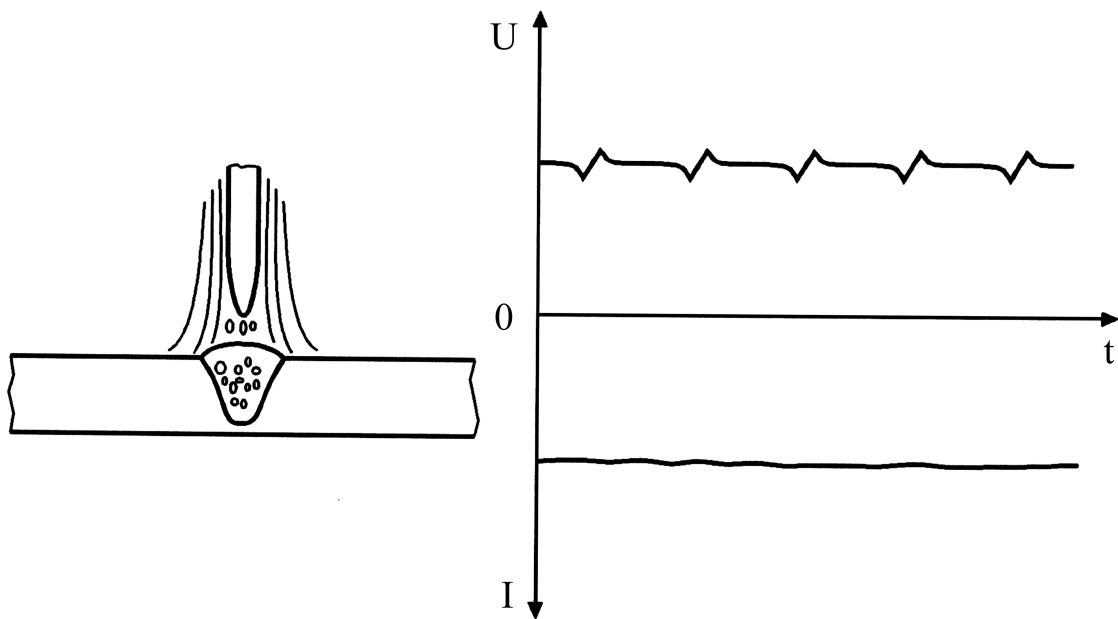


Slika 2.16 Prijenos metala kratkim lukom sa pripadajućim oscilogramom

b) Prijenos metala štrcajućim lukom (spray arc)

Prijenos metala štrcajućim lukom karakterizira tanki mlaz sitnih kapljica metala pri čemu elektroda ni u jednom trenutku ne dolazi u dodir s talinom.

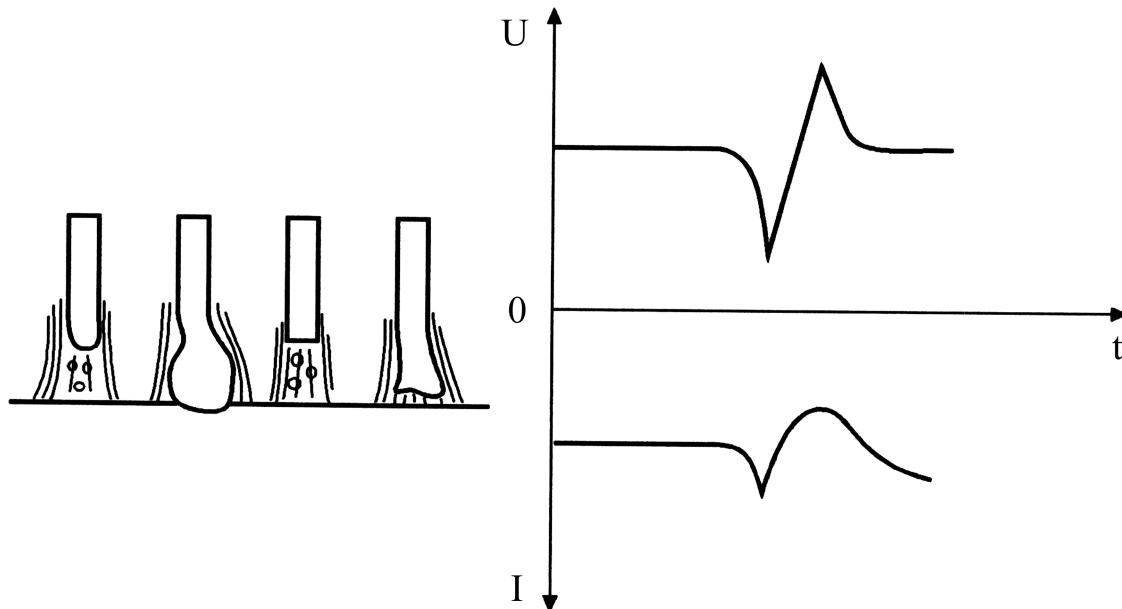
Područje štrcajućeg luka postiže se velikim jakostima struje zavarivanja (200-600 A) i naponima luka (25-40 V). Time se ostvaruju velika penetracija i velik unos topline, što je povoljno za zavarivanje debljih materijala, ali samo u vodoravnom položaju uz zaštitu argona i njegovih mješavina.



Slika 2.17 Prijenos metala štrcajućim lukom sa pripadajućim oscilogramom

c) prijenos metala mješovitim lukom

Prijenos metala mješovitim lukom je kombinacija štrcajućeg i kratkog luka sa krupnijim kapljicama. Područje mješovitog luka postiže se jakostima struje zavarivanja od 170 A do 235 A i naponima luka od 22 V do 25 V. Zbog nepredvidivosti pojava kratkih spojeva u procesu zavarivanja, ovaj način prijenosa metala se izbjegava.



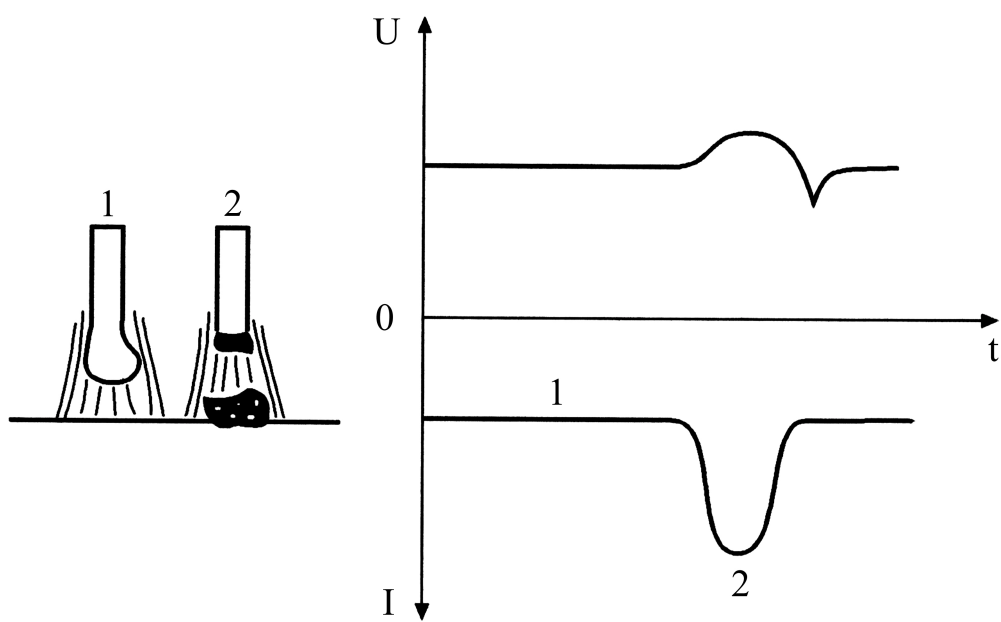
Slika 2.18 Prijenos metala mješovitim lukom sa pripadajućim oscilogramom

d) prijenos metala impulsnim lukom

Za prijenos metala impulsnim lukom karakteristično je da struja zavarivanja varira između dvije granične vrijednosti. Niža ili osnovna struja održava električni luk i proces stvaranja kapljica, a viša struja, ili struja impulsa odvaja kapljice od elektrode. Proces se ponavlja periodično. Frekvencija impulsa, a s njome i broj kapljica, može se podešavati.

Zavarivanje impulsnim lukom osigurava prijenos kapljica metala, kao kod štrcajućeg luka, uz manje vrijednosti srednje jakosti struje. Prednosti ovog načina prijenosa metala su mogućnost zavarivanja u svim položajima i zavarivanje šireg raspona debljina materijala žicama istog promjera.

Ovakav luk primjenjuje se za zavarivanje aluminija, bakra i visokolegiranih CrNi čelika uz zaštitu argona i mješavina obogaćenima argonom.



Slika 2.19 Prijenos metala impulsnim lukom sa pripadajućim oscilogramom