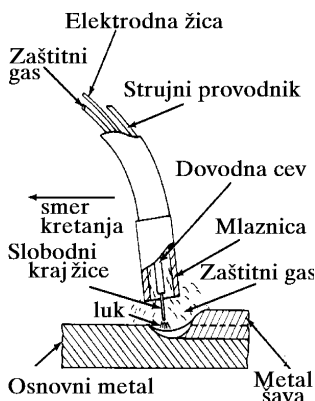


izvor: Sedmak, A., Šijački-Žeravčić, V., Milosavljević, A., Đorđević, V., Vukićević, M.: Mašinski materijali II deo, izdanje Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, 2000 (uskoro ponovo u štampi)

5.5. ELEKTROLUČNO ZAVARIVANJE TOPLJIVOM ELEKTRODNOM ŽICOM U ZAŠTITI GASA – MAG/MIG POSTUPAK

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. 5.30. 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 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.

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. Ovo takođe važi za elektrolučno zavarivanje punjenom elektrodnom žicom, sa dodatnim zaštitnim gasom (obično CO_2) ili bez njega, koji je srodan MAG/MIG postupku, a opisan je u #5.6.



Slika 5.30. Elektrolučno zavarivanje topljivom elektrodom u zaštiti gasa

5.5.1. Prenos dodatnog metala

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. 5.7. S obzirom na ovu poddelu, na oznaku postupka dodaje se eventualno i dopunska oznaka (*s*, *l*, *k* ili *p*), tab. 5.7.

Tabela 5.7. Vrste električnog luka pri zavarivanju u zaštiti gasa

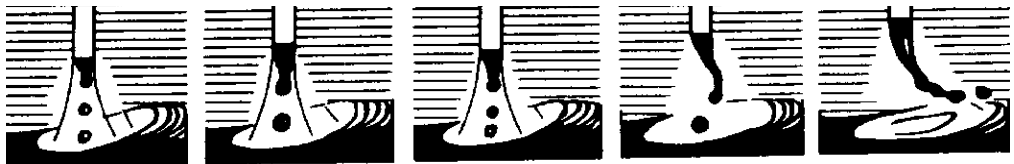
prenos dodatnog metala	oblik električnog luka	simbol	napomena
u mlazu	normalni	s	bez kratkog spoja
krupnim kapima	dugi	l	uz pojavu kratkog spoja
kratkospojeni	kratki	k	u kratkom spoju
impulsni	impulsni	p	bez kratkog spoja

Prenos u mlazu je moguće postići strujom jačine veće od neke granične vrednosti, i to prvenstveno u zaštiti Ar (ili He), jer bi se u zaštiti CO₂ dodatni metal rasprskavao (kod čelika je potrebno bar 80% Ar u smeši, a kod neželjeznih materijala čist Ar). Prenos u mlazu je pogodan za zavarivanje debljih limova, jer koristi velike jačine struje i prečnike elektrode.

Kratkospojeni prenos se postiže primenom najmanjih jačina struje i najmanjih prečnika žice. Na ovaj način se dobijaju zavari malog preseka, koji se brzo hlade, što je pogodno za spajanje tankih limova. Osim toga, kratkospojeni prenos je pogodan za spajanje većih otvora žleba, i za spojeve kod kojih se zahtevaju što manje deformacije, jer se ovakvim lukom unosi mala količina toplote.

Prenos u krupnim kapima je po svim karakteristikama između prethodna dva. Ovakav prenos dodatnog metala se javlja prvenstveno pri upotrebi CO₂, a jačina struje i napon luka čine „međuoblast“ u odnosu na prethodna dva načina prenosa. Kvalitet spoja je po pravilu lošiji zbog nedovoljnog uvarivanja i velikih reaktivnih sila koje deluju na kap, otežavajući njen prenos u rastop.

Najveći uticaj na način prenosa dodatnog metala imaju parametri struje (vrsta i jačina, karakteristika izvora), zaštitni gas, sastav dodatnog materijala i slobodna dužina elektrodne žice, od kojih su najbitniji jačina struje i zaštitni gas. Povećanjem jačine struje prenos dodatnog metala se menja od kratkospojenog do prenosa u mlazu, ali samo sa Ar kao zaštitnim gasom. Pri tom treba imati u vidu da struja suviše velike jačine, u kombinaciji sa povećanom dužinom slobodnog kraja elektrodne žice (sl. 5.30), može da proizvede rotaciju rastopljenog dodatnog metala i njegovo skretanje van metalne kupke (sl. 5.31), što ograničava izbor jačine struje.



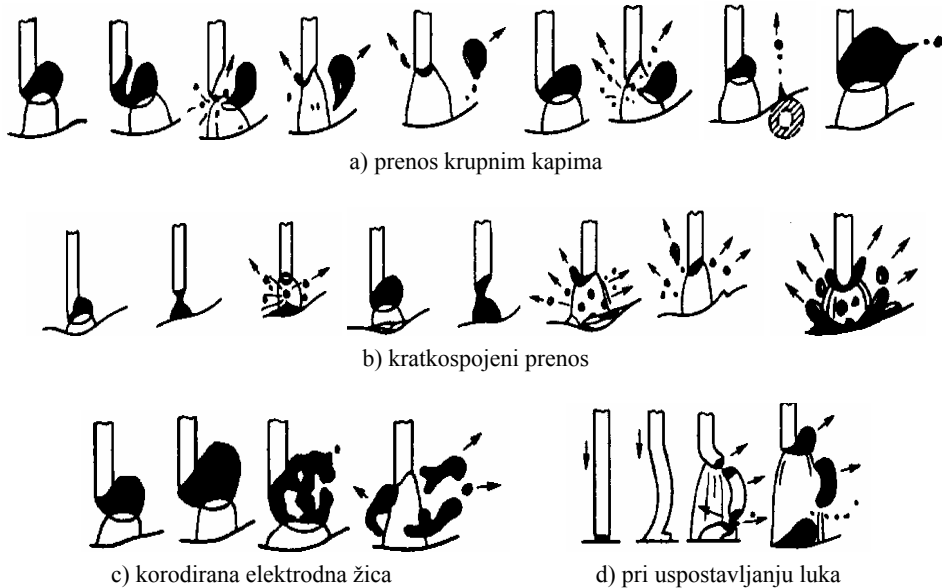
a) $\delta=15\text{mm}$, $I=280\text{A}$; b) $\delta=40\text{mm}$, $I=280\text{A}$; c) $\delta=40\text{mm}$, $I=450\text{A}$; d) $\delta=60\text{mm}$, $I=280\text{A}$

Slika 5.31. Uticaj jačine struje (*I*) i slobodne dužine elektrodne žice (δ) na način prenosa

U slučaju zaštite Ar, prenos u mlazu može da se postigne dovoljnom jačinom struje koja zavisi od prečnika elektrodne žice. Uticaj jačine struje je sličan i kod ostalih zaštitnih gasova ali zavisi i od drugih faktora. Od svih zaštitnih gasova samo Ar, pri dovoljnoj jačini struje, garantuje prenos u mlazu. Helijum, iako inertan kao i Ar, po pravilu daje prenos u krupnim kapima nezavisno od jačine i vrste struje. S druge strane, He obezbeđuje veću dubinu uvarivanja od Ar, a prenos u mlazu može da se postigne dodavanjem bar 20% Ar, što ujedno znatno smanjuje eksplozivnost He i daje značajnu praktičnu primenu ovakvim mešavinama. Prenos u

mlazu je kod MAG postupka moguće postići samo indirektnom polarnošću, i to ako su ispunjeni još neki uslovi (npr. dodatak Na i Cs u zaštitnom premazu elektrode žice). Očigledno je da aktivni gasovi CO_2 i N_2 imaju sličan uticaj na prenos dodatnog metala kao He uz dodatne probleme zbog sila odbijanja koje skreću kap van ose luka (sl. 5.32), posebno kod direktne polarnosti.

Pri zavarivanju čelika inertni gasovi pokazuju izvesne mane kada je prenos dodatnog metala u pitanju (skretanje luka van ose, rasprskavanje dodatnog metala), što može da se smanji ili otkloni dodatkom O_2 ili drugih aktivnih gasova, npr. CO_2 , koji smanjuju površinski napon kapi dodatnog metala. Pozitivni efekti dodavanja O_2 i CO_2 su primetni i u vrlo malim količinama, ali su u praksi najčešće mešavine sa 1–5% O_2 i do 20% CO_2 .



Slika 5.32. Osnovni oblici rasprskavanja kapi dodatnog metala pri korišćenju aktivnih gasova

Osim ova tri načina prenosa dodatnog metala, sve veću primenu ima impulsni prenos, koji po kvalitetu može da dostigne TIG zavarivanje. Osnovna odlika ovog načina prenosa je mogućnost regulisanja veličine kapi u zavisnosti od učestanosti kapanja. Luk je bez kratkog spoja i ostvaruje se impulsnom strujom iz pomoćnog izvora. Učestanost impulsa, a time i broj kapi u određenom vremenskom periodu, može da se podešava. Iskustvo je pokazalo da optimalna učestanost impulsa odgovara učestanosti gradske mreže od 50 Hz. Izvor struje treba da obezbedi dva nivoa jačine struje, osnovni nivo, koji treba da bude dovoljno nizak da onemogući prenos u mlazu, i pulsirajući nivo (sl. 5.7d), koji je znatno iznad nivoa potrebnog za prenos. Stoga se u jednom ciklusu prenese samo jedna kap, a kako je moguće podesiti vremenski period ciklusa i jačinu struje, time je omogućeno dobijanje potrebnog kvaliteta spoja. Koristeći opisani princip u novije vreme je razvijeno nekoliko modifikovanih varijanti impulsnog prenosa, posebno u slučaju primene invertorskog izvora struje koji postaju dominantni u primeni MAG/MIG postupka, jer daju najbolji kvalitet zavarenog spoja.

5.5.2. Zaštitni gasovi

Kao zaštitni gasovi se koriste argon, helijum, ugljen-dioksid, kiseonik, azot, vodonik i njihove mešavine. Najčešće korišćeni zaštitni gasovi i njihove mešavine prikazani su tab. 5.8, zajedno sa podacima o ponašanju, primeni u svojstvima.

Tabela 5.8. Zaštitni gasovi i njihove smeše – primena i svojstva

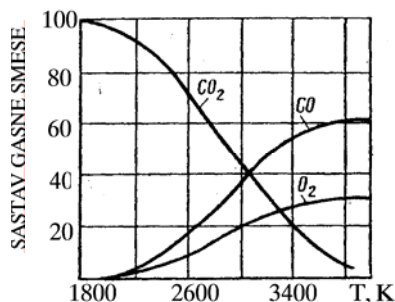
gas	simbol	ponašanje	primena	karakteristika luka
Ar (99,998%)	I1	inertno	svi metali, osim čelika	najveća stabilnost
He (99,99%)	I2	inertno	Al, Mg, Cu	povećana toplotna moć
Ar+(25÷75%)He	I3	inertno	Al, Mg, Cu	između I1 i I2
N ₂ (99,9%)		aktivno	Cu	povećana toplotna moć
Ar+(25÷30%)N ₂		inertno	Al, Mg, Cu	povećana toplotna moć
Ar+(1÷3%)O ₂	M1-1	prakt. inertno	visokolegirani Cr-Ni č.	prenos u mlazu
Ar+(4÷8%)O ₂	M2-3	oksidirajuće	ugljenični i niskoleg. č.	prenos u mlazu
Ar+(1÷15%)H ₂	R2	redukujuće	visokolegirani čelici, Ni	velika dubina uvarivanja
CO ₂ (99,9%)	C	oksidirajuće	ugljenični i niskoleg. č.	moгуće rasprskavanje
Ar+(26÷40%)CO ₂	M3-1	oksidirajuće	ugljenični i niskoleg. č.	moгуće rasprskavanje
Ar+5÷20%CO ₂ +4÷6%O ₂	M3-2	oksidirajuće	ugljenični i niskoleg. č.	malo rasprskavanje
CO ₂ +20%O ₂		oksidirajuće	ugljenični čelici	moгуće rasprskavanje

Primena aktivnih gasova zahteva posebnu pažnju zbog pojave oksidacije. Ova pojava, inače karakteristična za konvencionalne postupke zavarivanja, je posebno izražena kada se CO₂ koristi kao zaštitni gas, jer se tada odigrava sledeća hemijska reakcija:



Smer ove reakcije zavisi prvenstveno od temperature tako što se na višim temperaturama odvija disocijacija (razlaganje gasa), a na nižim temperaturama asocijacija (spajanje gasova). Zbog toga sastav gasne smeše zavisi od temperature, sl. 5.33, pa ispod 1600°C postoji jedino CO₂, a sa porastom temperature se povećava udeo CO i O₂, tako da na 3800°C ostaje svega 7% CO₂, uz 62% CO i 31% O₂. Stoga je oksidacija daleko najizraženija u središnjem delu električnog luka, gde je temperatura najviša, a najmanje izražena na površini metalne kupke, gde je temperatura znatno niža. Prema tome osnovni problem kod MAG postupka je kako smanjiti oksidaciju kapi dodatnog metala tokom njihovog prenosa kroz električni luk.

S obzirom na to da se kao zaštitni gasovi najviše koriste argon i ugljendioksid, pojedinačno ili u mešavinama, prikazane su njihove osnovne osobine i tehnički uslovi korišćenja.



Slika 5.33. Sastav gasne smeše kod MAG postupka

Argon je inertan gas, bez boje, mirisa i ukusa. Iako nije otrovan, treba imati u vidu da Ar u zatvorenoj prostoriji može da smanji koncentraciju kiseonika. Argon je standardizovan po JUS H.F1.018, gde je propisan kvalitet, upotreba, metoda ispitivanja i način isporuke. Argon se proizvodi u četiri kvaliteta, zavisno od čistoće: A (najmanje 99,999% Ar), B (99,99% Ar), C (99,96% Ar) i D (85% Ar). Za zavarivanje se koristi Ar kvaliteta C, a za specijalne slučajeve kvaliteta B. Argon se isporučuje u čeličnim bocama označenim žutom bojom, zapremine 40 l i pritiska do 200 bar, pri čemu u bocu staje 6 Nm³, odnosno 10 kg argona. Boce sa Ar se

ne prazne do kraja, već se uvek ostavlja dovoljan natpritisak da se spreči prodiranje vazduha u bocu.

Ugljendioksid je gas bez boje i mirisa, kiselkastog ukusa. Do koncentracije 2,5% CO₂ nije opasan za udisanje (kraće vreme), ali u većoj koncentraciji ili pri dugotrajnijem dejstvu može da bude štetan. Ugljendioksid je standardizovan po JUS H. F1.016, skladišti se u čeličnim bocama, označene tamnosivom bojom, zapremine 40 l i pritiska 70–100 bar, tako da u svaku bocu staje 15 Nm³, odnosno 30 kg CO₂. Standardom su definisana tri kvaliteta CO₂: tehnički, čist i čvrst (suvi led). U zavarivanju se primenjuje čist CO₂ najmanje koncentracije 99,8%.

5.5.3. Elektrodna žica

Elektrodne žice se proizvode u nizu prečnika 0,8–3,2 mm sa korakom 0,4 mm, a izuzetno 4 i 5 mm, pri čemu se žice manjeg prečnika (do 1,2 mm) obično koriste za prenos krupnim kapima, a žice većeg prečnika (preko 1,2 mm) za prenos u mlazu i impulsni prenos. Podaci o nekim elektrodnim žicama su date u tab. 5.9, pri čemu su korišćene oznake proizvođača (FEP–Fabrika elektroda Plužine), jer elektrodne žice nisu standardizovane po JUS.

Tabela 5.9. Elektrodne žice za zavarivanje čelika u zaštiti gasa

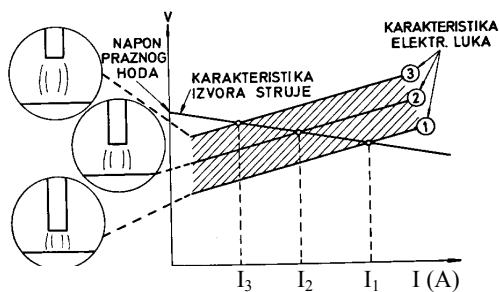
oznaka	hemijski sastav (%)					zaštitni gas	vrsta čelika
	C	Si	Mn	Ni	Cu		
FEP						aktivni	ugljenični
PIVA 60	0,06-0,13	0,8-1,0	1,4-1,6			aktivni	ugljenični i niskolegirani
PIVA 60 Ni	0,08-0,10	0,7-1,0	1,4-1,6	1,0-1,2		aktivni	ugljenični i niskolegirani
PIVA 60 NiCu	0,1	0,9	1,5	0,5	0,5	aktivni	ugljenični i niskolegirani

U slučaju zavarivanja čelika elektrodna žica treba da ima povećan sadržaj Si i Mn u cilju dezoksidacije metala šava i nadoknade sagorelih elemenata u osnovnom metalu. U cilju sprečavanja nastanka poroznosti u metalu šava i zakaljenja, sadržaj ugljenika je ograničen na 0,12%. Pri izboru dodatnog materijala treba uzeti u obzir hemijski sastav i mehanička svojstva osnovnog materijala, stanje i čistoću osnovnog materijala, položaj zavarivanja i oblik prenosa dodatnog metala.

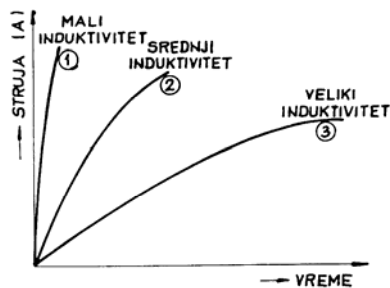
5.5.4. Izvori struje i uređaji za zavarivanje

Za elektrolučno zavarivanje topljivom elektrodnom žicom u zaštiti gasa koriste se izvori struje sa ravnom ili blagopadajućom spoljnom statičkom karakteristikom da bi se iskoristio efekat samoregulacije dužine luka, sl. 5.34. Naime, ako se dužina luka poveća tako da se karakteristike luka menjaju od I_1 do I_3 , sl. 5.34, značajno se smanjuje jačina struje, što je na sl. 5.34 označeno sa I_1 do I_3 . Usled smanjenja jačine struje gotovo trenutno se smanjuje brzina topljenja elektrodne žice, a time i dužina luka. S druge strane, ako se dužina luka smanji (karakteristike luka $3-I$, sl. 5.34), jačina struje raste od I_3 do I_1 , pa se dužina luka povećava. Prema tome dužina luka se vraća na početnu bez obzira na to da li se prethodno povećala ili smanjila, što se naziva efektom samoregulacije.

Osim drugačije statičke karakteristike, izvori struje za MAG/MIG postupak treba da obezbede i bolju dinamičku karakteristike u odnosu na izvore struje za E postupak, posebno u slučaju kratkospojenog prenosa dodatnog metala. Tako npr. da bi se usporila promena jačine struje posle kratkog spoja u strujno kolo se ubacuje indukcioni kalem, koji proizvodi efekat prikazan na sl. 5.35, čime se popravljaju kvalitet zavarenih spojeva.



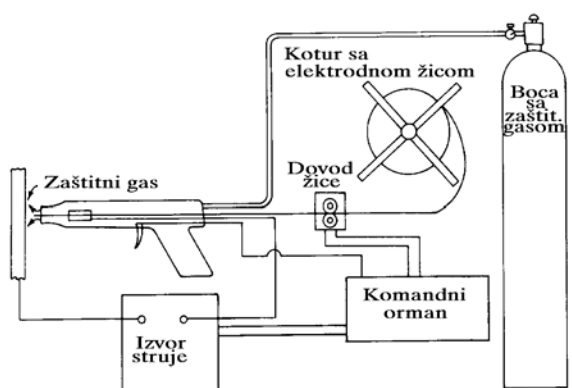
Slika 5.34. Efekt samoregulacije



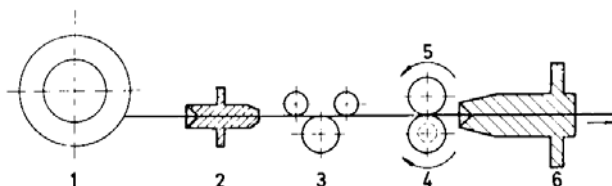
Slika 5.35. Uticaj prigušnice na jačinu struje

Za elektrolučno zavarivanje topljivom elektrodom u zaštiti gasa po pravilu se koristi jednosmerna struja indirektno polarnosti jer daje stabilan luk, ravnomeran prenos dodatnog metala (po potrebi prenos u mlazu, čak i pri korišćenju aktivnih zaštitnih gasova) sa malim gubicima usled rasprskavanja i dobre karakteristike spoja u širokom opsegu jačine struje. Direktna polarnost se koristi ukoliko je neophodno dobiti što manje uvarivanje, npr. kod tankih limova, ali se njena primena izbegava zbog smanjene stabilnosti luka. Naizmenična struja se ne koristi zbog značajno smanjene stabilnosti luka.

Osnovni delovi uređaja za poluautomatsko zavarivanje su pištolj, izvor struje, komandni orman, kotur sa žicom, uređaj za automatski dovod žice, boca (ili boce) za skladištenje zaštitnog gasa sa ventilima i regulatorima protoka, i kablovi za struju i gas, sl. 5.36. Osim navedenih delova, uređaj je po potrebi snabdeven sistemom za hlađenje pištolja, mešačem gasova i meračima protoka gasova. Pištolj za zavarivanje se izrađuje u dve varijante, sa vazдушnim ili vodenim hlađenjem. Kroz pištolj prolaze kablovi za struju i hlađenje, i žica za zavarivanje. Dovod žice obezbeđuje poseban uređaj, sl. 5.37.



Slika 5.36. Uređaj za elektrolučno zavarivanje topljivom elektrodom u zaštiti gasa

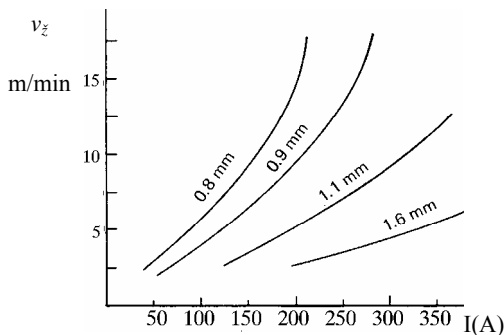


Slika 5.37. Šema dovođenja žice: 1–kotur sa žicom, 2–izlazna vodica, 3–valjci za usmeravanje žice, 4–pogonski valjci, 5–pritisni valjak, 6–ulazna vodica

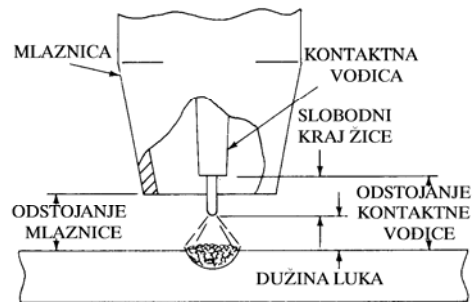
5.5.5. Tehnologija zavarivanja

Osnovni parametri elektrolučnog zavarivanja topljivom elektrodnom žicom u zaštiti gasa su vrsta i jačina struje, napon luka, brzina zavarivanja, prečnik, dužina slobodnog dela i nagib žice za zavarivanje, položaj zavarivanja, vrsta i protok zaštitnog gasa. Vrsta i jačina struje imaju značajan uticaj na dimenzije šava, kao što je objašnjeno kod E postupka, sl. 5.20–21. Pri ostalim konstantnim parametrima, zavisnost brzine topljenja elektrodne žice i jačine struje je linearna za manje vrednosti jačine struje, a pri većim vrednostima jačine struje, posebno kod manjih prečnika žice, zavisnost postaje nelinearna, sl. 5.39.

Slobodni kraj žice mora da bude u određenim granicama jer njegova prevelika dužina uslovljava višak dodatnog metala i nedovoljnu količinu toplote za njegovo topljenje, što daje plitko uvarivanje i nepovoljan oblik šava, a s druge strane, smanjenjem njegove dužine luk postaje nestabilan. Treba uočiti da se sa povećanjem dužine slobodnog kraja žice povećava njen električni otpor i stepen zagrevanja, pa je slabija struja potrebna za topljenje žice. Iskustvo pokazuje da je za kratkospojeni prenos potreban slobodni kraj dužine 6–12,5 mm, a za ostale načine prenosa 12,5–25 mm. Osim slobodnog kraja žice, i odstojanje mlaznice za gas od osnovnog materijala bitno utiče na zavarivanje. S jedne strane, odstojanje mlaznice treba da bude što manja da bi zaštita gasom bila što efikasnija, a s druge strane, suviše malo odstojanje izlaže mlaznicu prevelikoj toploti i smanjuje zavarivaču mogućnost vizuelne kontrole zone zavarivanja. Slobodni kraj žice, kao i odstojanje vodice i mlaznice od osnovnog materijala su prikazani na sl. 5.40.



Slika 5.39. Zavisnost brzine dovođenja elektrodne žice v_z i jačine struje I



Slika 5.40. Karakteristični položaji slobodnog kraja žice i mlaznice za gas

U zavisnosti od jačine struje razlikuju se tri međusobno zavisna položaja slobodnog kraja žice i mlaznice za gas:

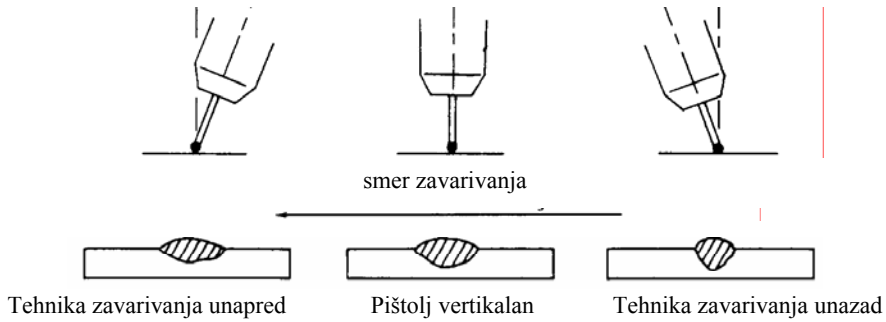
- slobodni kraj žice manji od odstojanja mlaznice, za jačine struje 50–150 A,
- slobodni kraj žice jednak odstojanja mlaznice, za jačine struje 150–350 A,
- slobodni kraj žice veći od odstojanja mlaznice, za jačine struje iznad 350 A.

Napon luka utiče bitno na kvalitet zavarenog spoja, jer promenom njegove vrednosti može da se utiče na način prenosa dodatnog metala i u manjoj meri na dimenzije šava (na isti način kao kod E postupka).

Uticaj brzine zavarivanja je isti kao kod E postupka, sl. 5.22. Brzina zavarivanja se bira prvenstveno u zavisnosti od jačine struje (proporcionalno njenoj vrednosti, da bi se održala zadana vrednost pogonske energije) i položaja zavarivanja (manja brzina zavarivanja za prinudne položaje, pod uslovom da je i jačina struje manja).

Položaj pištolja ima veliki uticaj na oblik šava. Tako npr. nagib elektrodne žice u odnosu na vertikalu bitno menja oblik šava od širokog i plitkog (nagib u smeru zavarivanja, tj. tehnika zavarivanja unapred) do uskog i dubokog (nagib suprotan smeru zavarivanja, tj. tehnika zavarivanja unazad), sl. 5.41. Maksimalna dubina uvarivanja se postiže tehnikom zavarivanja

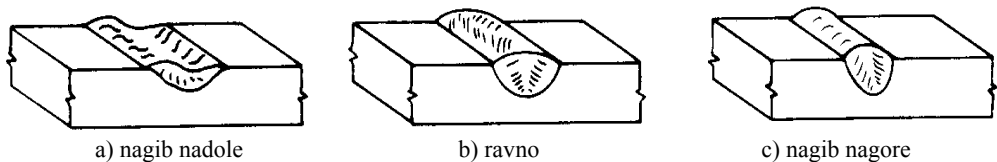
unazad. Osim toga, tehnika zavarivanja unazad daje stabilniji luk, manju poroznost šava i manje rasprskavanje dodatnog metala. S druge strane, rukovanje pištoljem i kontrola metalne kupke su jednostavniji pri zavarivanju unapred, koje stoga ima prednost kod tankih limova i korenih zavora.



Slika 5.41. Uticaj nagiba pištolja na oblik šava

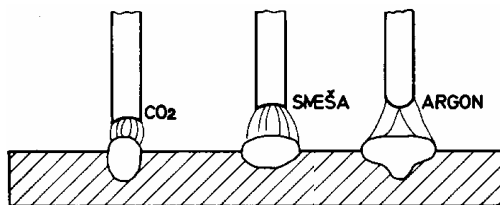
Prema prečniku elektrodne žice bira se jačina struje, jer je u slučaju nedovoljne jačine struje, odnosno prevelikog prečnika elektrodne žice njeno topljenje nedovoljno, a u obrnutom slučaju tipične pojave su rasprskavanje, poroznost i nepravilna geometrija šava. Prema tome, gustina struje, definisana kao količnik jačine struje i prečnika elektrode, određuje dimenzije šava na sledeći način: veća dubina uvarivanja i manja širina šava se dobija većom gustinom struje (ili veća jačina struje za isti prečnik ili manji prečnik za istu jačinu struje).

Prenos dodatnog metala u mlazu i krupnim kapima se po pravilu primenjuju za zavarivanje u horizontalnom položaju, dok se kratkospojani i pulsirajući prenos koriste u svim položajima. Za zavarivanje u vertikalnom i nadglavnom položaju koriste se žice manjeg prečnika, kao i kratkospojani ili pulsirajući prenos dodatnog metala, jer se time pojačavaju dejstva elektrodinamičke sile i površinskog napona, što omogućava savladavanje dejstva gravitacije. Od koristi je i primena manje količine unete toplote, da bi metal šava brže očvrstnuo. Kod nagnutih (pretežno horizontalnih) položaja, nagib radnog predmeta u odnosu na horizontalu utiče bitno na oblik šava, sl. 5.42.



Slika 5.42. Uticaj nagiba u pretežno horizontalnom položaju zavarivanja na oblik šava

Uticaj zaštitnih gasova i njihovih mešavina je već analiziran, a osnovne smernice za izbor su date u tab. 5.8. Uticaj vrste zaštitnog gasa na oblik šava je dat na sl. 5.43. Osim vrste zaštitnih gasova bitan je i uticaj njihovog protoka koji zavisi od vrste spoja, položaja i brzine zavarivanja, oblika i dimenzija žleba, jačine struje i napona luka i prečnika žice. Pri određivanju potrošnje zaštitnog gasa, treba imati u vidu da u slučaju nedovoljne količine okolni gasovi mogu da prođu u metalnu kupku, a u slučaju prevelike količine i brzine strujanja nastaje turbulencija sa istim posledicama.



Slika 5.43. Uticaj vrste zaštitnog gasa na oblik šava

Pri zavarivanju u zaštiti gasa treba imati u vidu strujanje okolnog vazduha koje ne sme da bude takvo da ometa dejstvo zaštitnog gasa. Posebno pri radu na otvorenom potrebno je predvideti dovoljno dobar zaklon od vetra i prinudnog strujanja vazduha.

5.5.6. Modifikovani postupci MAG/MIG zavarivanja

Na osnovu MAG/MIG postupka razvijeni su mnogi modifikovani postupci koji se koriste u pojedinim specifičnim situacijama. Najvažniji od njih su tačkasto zavarivanje, zavarivanje sa velikom slobodnom dužinom žice, zavarivanje u uskom žlebu i različite varijante zavarivanja sa kombinovanim prenosom dodatnog metala.

Tačkasto zavarivanje se izvodi elektrodnom žicom malog prečnika koja se ne pomera, već zadano vreme održava električni luk. Na ovaj način se spajaju tanki limovi u preklopnom spoju, delovanjem izvora toplote sa jedne strane. U odnosu na elektrootporno tačkasto zavarivanje, osnovne prednosti ovog postupka su manja deformacija i veća čvrstoća spoja, što najviše dolazi do izražaja u slučaju spojeva većih dimenzija.

Zavarivanje sa velikom slobodnom dužinom žice se primenjuje u cilju povećanja proizvodnosti, jer se slobodni kraj žice zagreva intenzivnije čime se obezbeđuje brži prenos dodatnog metala. Da bi se ovaj postupak zavarivanja realizovao potrebno je primeniti dodatne mere za stabilizaciju i lakše uspostavljanje luka.

Zavarivanje u uskom žlebu je bitno za spajanje predmeta velike debljine, jer se na taj način smanjuje količina dodatnog metala, kao i deformacije i zaostali naponi zavarenog spoja. Da bi se ovaj postupak realizovao potrebno je preduzeti niz tehnoloških mera kojima se prevazilazi problem lošeg pristupa žlebu, posebno u vezi sa horizontalnim i vertikalnim pomeranjem elektrodne žice i obezbeđenjem dobre zaštite metalne kupke.

Zavarivanje sa kombinovanim prenosom dodatnog metala je posebno interesantno u slučajevima kada koreni zavar treba uraditi kratkospojeno, a zavare popune prenosom u mlazu. Ovakvu varijantu zavarivanja je moguće postići promenom parametara zavarivanja, a primenjuje se kod sučeonih spojeva u vertikalnom položaju.

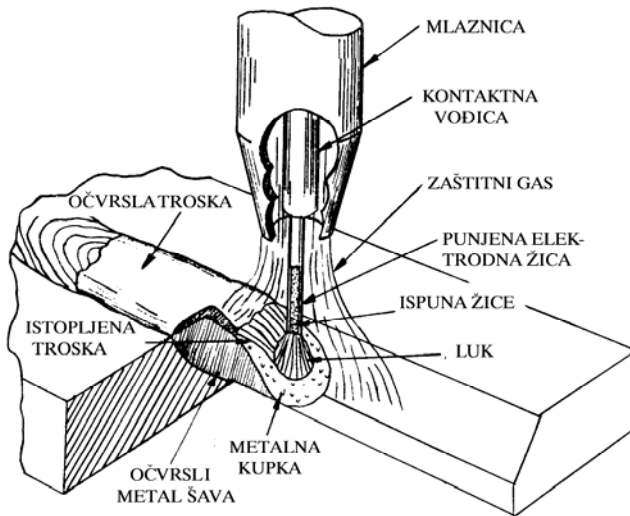
5.6. ELEKTROLUČNO ZAVARIVANJE PUNJENOM ELEKTRODNOM ŽICOM

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 CO_2 , sl. 5.45. 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 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.

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 mali broj potrebnih veličina žica, za iste mehaničke osobine i kvalitet šava. Pored toga, punjene žice imaju veliku otpornost na apsorpciju vlage i daju nizak sadržaj vodonika u metalu šava. 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 elektrodučnog zavarivanja punjenim žicama je sve veća.

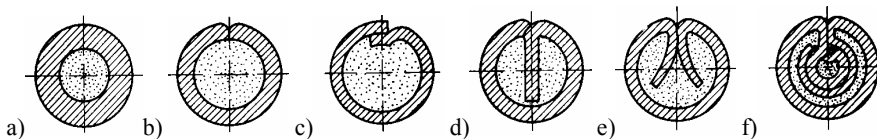


Slika 5.44. Šema elektrodučnog zavarivanja punjenom elektrodnom žicom

Mane elektrodučnog 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.

5.6.1. Punjene žice – vrste, tehnologija proizvodnje

Punjena žica je dodatni metal oblika cevi, sl. 5.45, koja je ispunjena zaštitnim materijalom baznog ili rutilnog karaktera. Osnovne vrste punjenih žica za zavarivanje i navarivanje (nisu standardizovane po JUS) su prikazane u tab. 5.10.



Slika 5.45. Karakteristični preseki punjenih žica

Tabela 5.10. Punjene žice za zavarivanje i navarivanje čelika

oznaka (FEP)	hemijski sastav (%)						zaštitni gas	vrsta čelika
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo		
zavarivanje							CO ₂ , mešavina	ugljenični i niskolegirani
PIVA 30 P	0,06	0,4	0,4					
PIVA 40 P	0,06	0,35	0,35	1,2			zaštitni gas	tvrdoća
navarivanje	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo		
PIVA 50 P	0,1	0,2	0,7	0,1	1,3	0,5	CO ₂ , mešavina	≈100 HRB
PIVA 450 P	0,12	0,4	1,0	2,0	1,2	1,0		≈40 HRC

Punjene žice se proizvode od žice dobijene izvlačenjem („žice bez šava“), sl. 5.45a ili spajanjem krajeva trake, savijene na različite načine („šavne žice“), sl. 5.45b–f. Tehnologija proizvodnje žica bez šava koristi metalnu cev koja se puni praškom i postepeno izvlači kroz kalupe da bi se dobio konačni prečnik. Ove žice imaju relativno mali odnos punjenja (količnik mase punjenja i ukupne mase žice), 12–14%, pa im je produktivnost manja. Relativno debeo omotač čini ove žice krutim, što je povoljnije za vođenje žica kroz dugačke kablove. Postoji nekoliko tehnologija za proizvodnju šavnih žica, a sve koriste metalne trake savijene u obliku U–slova, punjene praškom i zatvorene da bi se dobio okrugli poprečni presek. Tri osnovna tipa cevni omotača šavnih žica su:

- dodirni (čeon), kod koga se obloge dodiruju i formiraju spoj koji može da bude zavaren, sl. 5.45b,d,e,
- preklopni, kod koga se cev formira od obloge nejednakog U–oblika tako što jedna ivica preklapa drugu kada se cev zatvori, sl. 5.45c,
- srcasti, kod koga su obe ivice trake savijene u centar cevi posle punjenja, sl. 5.45f.

Čeono zatvorene žice imaju odnos punjenja 18–24%, dok je kod preklopnog i srcastog tipa žice odnos punjenja 30–45%.

Punjene elektrodne žice se proizvode u nizu prečnika 1,2–5 mm, a najčešće se koriste prečnici 1,2–3,2 mm. Većina nelegiranih i niskolegiranih punjenih žica ima prečnik 1,2 mm.

U sastav praška za punjenje žica ulaze stabilizatori luka, materije za obrazovanje troske, dezoksidatori i denitratori (elementi za vezivanje azota), legirajući elementi i metalni prašak kod visokoproduktivnih žica. Prema vrsti praška punjene žice se dele na rutilne, bazne i žice punjene metalnim praškom. Kod samozaštitnih žica dodaju se još i kalcijum fluorid, kalcijum karbonat i kriolit da bi se stvorila zaštitna atmosfera, što čini do 50% sastojaka jezgra.

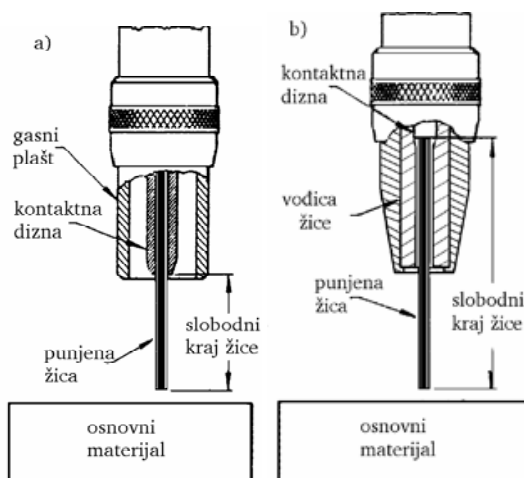
5.6.2. Specifičnosti opreme za elektrolučno zavarivanje punjenim žicama

Za zavarivanje punjenim žicama po pravilu se koristi jednosmerna struja indirektna polarnosti, iz istih razloga kao kod MIG/MAG postupka, a izvor struje može da bude sa strmom ili češće sa blagom karakteristikom. Kada se koristi strma karakteristika, dodavač žice je obično osetljiv na napon luka, tako što registrovanjem promene napona luka koriguje dužinu luka (tzv. naponska regulacija dužine luka).

Osnovna fizička razlika između punjenih i punih žica je da punjene žice mogu lakše da se oštete od punih žica. Zbog toga je važno da se sa punjenim žicama postupa pažljivo i da se sistem za dotur žice prilagodi zavarivanju punjenim žicama. Preporučuje se upotreba mehanizma za dotur žice sa četiri pogonska valjka, umesto sa dva, jer se time omogućava primena manje pritisne sile i smanjuje opasnost od deformacije žice.

Specifičnost opreme za elektrolučno zavarivanje punjenim žicama je i u izgledu pištolja, tj. njegovog usnika i slobodnog kraja žice. Usnik pištolja treba da prenosi struju zavarivanja preko žice na luk i materijal koji se zavaruje. Kao što je prikazano na sl. 5.47a, usnik pištolja za zavarivanje sa zaštitnim gasom se proteže skoro do kraja gasnog plašta, tako da slobodan kraj žice odgovara vidljivom kraju žice van pištolja. Kod pištolja za samozaštitne žice, sl. 5.47b, slobodni kraj žice je mnogo duži, jer nije potrebna dodatna zaštita, pa rastojanje do kraja pištolja može da bude ispunjeno izolovanom vodičom žice, koja štiti žicu od dodira sa

unutrašnjošću pištolja. Duži slobodni kraj žice doprinosi većoj proizvodnosti, zbog veće zagrejanosti žice.



Slika 5.47. Usnik pištolja a) žice sa zaštitnim gasom b) samozaštitne žice

5.6.3. Tehnologija zavarivanja

Osnovni parametri elektrolučnog zavarivanja punjenom žicom su jačina struje, napon luka, brzina dotura žice, slobodna dužina žice, prečnik žice, brzina zavarivanja, vrsta i protok zaštitnog gasa i nagib žice.

Analiza navedenih parametara zavarivanja je već data u prethodnim poglavljima, uključujući uticaj slobodne dužine žice, koji ipak ima i neke specifičnosti kod zavarivanja punjenim žicama, kao što je relativno velika dužina slobodnog kraja žice, posebno kod samozaštitnih žica (20–100 mm). Povećanjem slobodne dužine žice mogu da se obezbede uža i plići šavovi, ako se dopusti da se napon luka i jačina struje smanje usled povećanog zagrevanja žice. S druge strane, ako se istovremeno napon luka i jačina struje održavaju na početnim vrednostima, povećanjem slobodne dužine žice povećava se proizvodnost. Nasuprot tome, kod postupka sa zaštitnim gasom, punjene žice se koriste sa manjom slobodnom dužinom (20–40 mm), što uz povećanu jačinu struju, obezbeđuje veću dubinu uvarivanja. Treba pomenuti da efekat povećanja slobodne dužine žice može samo donekle da se iskoristi kod MAG/MIG postupka (punih žica) zbog njegovog nepovoljnog uticaja na zaštitni gas.

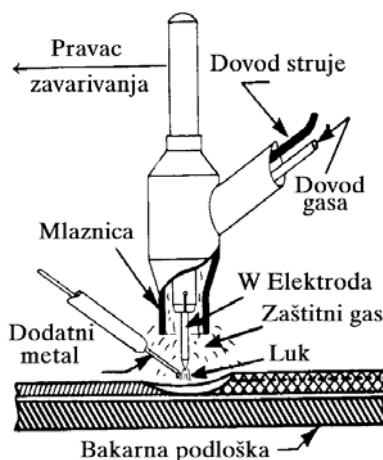
Osim slobodne dužine žice, specifičnost zavarivanja punjenim žicama je izbor vrste zaštitnog gasa koji zavisi od punjenja žice. Kao zaštitni gas najčešće se koristi CO_2 , a od mešavina se najčešće koriste 75% Ar + 25% CO_2 , čime se postiže prenos dodatnog metala u mlazu i veća čvrstoća spoja.

5.7. ELEKTROLUČNO ZAVARIVANJE NETOPLJIVOM ELEKTRODOM U ZAŠTITI INERTNOG GASA – TIG POSTUPAK

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. 5.48. 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 efekat 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, a na isti način i drugih obojenih metala i legura.

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. Kao automatski postupak TIG se često koristi za spajanje cevi (tzv. „orbitalno“ zavarivanje). 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 konkuretan 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.



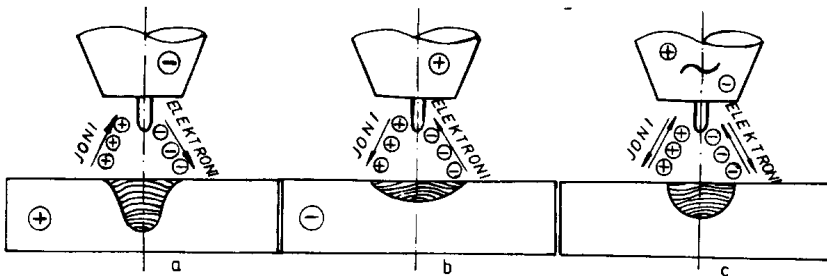
Slika 5.48. Šematski prikaz elektrolučnog zavarivanja netopljivom elektrodom

5.7.1. Vrste i izvori struje

Kod TIG postupka se najčešće koriste naizmjenična struja (NS) i jednosmerna struja direktne polarnosti (JSDP). Uticaj vrste struje na oblik šava izveden TIG postupkom je prikazan na sl. 5.49. Jednosmerna struja direktne polarnosti daje najuži i najdublji šav, sl. 5.49a. Toplota pri zavarivanju se raspoređuje približno 1/3 na elektrodu, a 2/3 na osnovni materijal. Jonizovane čestice su usmerene od materijala ka elektrodi, a elektroni od elektrode ka osnovnom materijalu, tako da se ne dobija efekt površinskog čišćenja teškotopljivih oksida, kao što je to slučaj kod jednosmerne struje indirektno polarnosti (JSIP). Stoga se jednosmernom strujom direktne polarnosti zavaruju metali kod kojih efekt čišćenja nije potreban (čelici, nikal, bakar i njihove legure).

Indirektna polarnost daje najširi i najplići šav, sl. 5.49b. Toplota pri zavarivanju se raspoređuje suprotno prethodnom slučaju, odnosno 2/3 na elektrodu, a 1/3 na osnovni materijal, što je neracionalno i daje nestabilan luk. Iako jednosmerna struja indirektno polarnosti, zahvaljujući kretanju elektrona od osnovnog materijala ka elektrodi, proizvodi efekt površinskog čišćenja teškotopljivih oksida, s obzirom na navedene nedostatke njena praktična primena je beznačajna, a za zavarivanje aluminijuma i njegovih legura se koristi naizmjenična struja.

Naizmjenična struja daje šav širine i dubine između dva polariteta jednosmerne struje, sl. 5.49c. S obzirom na prirodu naizmjenične struje (promena polariteta 50 puta u sekundi) električni luk je nestabilan. Da bi se ova mana naizmjenične struje svela na najmanju meru primenjuje se tzv. visokofrekventni (VF) napon, odnosno ugrađuje VF generator. Nedostatak je i tzv. nesimetrija struje, usled poremećaja njene vremenske sinusoide. Radi se o različitim sposobnostima aluminijuma i volframa da emituju elektrone, usled čega se povećava negativna poluperioda na račun pozitivne, jer se više elektrona emituje sa volframove elektrode kada je ona na (-) polu. Prva posledica ove nesimetrije je skoro jednosmerno dejstvo električnog luka, što uslovljava prekomerno zagrevanje zavarivačkog transformatora, a druga posledica je značajno smanjenje efekta katodnog čišćenja. Da bi se ovo sprečilo, u strujno kolo se uvodi kondenzatorska baterija, vezana redno sa lukom, koja ima zadatak da povećava pozitivne poluperiode, tj. da uspostavlja simetriju talasa struje. Time se ujedno i povećava efekat čišćenja, što omogućava primenu naizmjenične struje za zavarivanje aluminijuma i njegovih legura. Stoga su noviji transformatori za TIG postupak po pravilu snabdeveni i VF generatorom i kondenzatorskom baterijom.

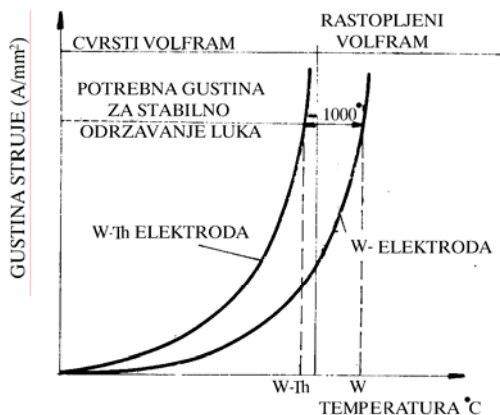


Slika 5.49. Oblik šava u zavisnosti od vrste struje: a) JSDP; b) JSIP; c) NS

5.7.2. Netopljiva elektroda

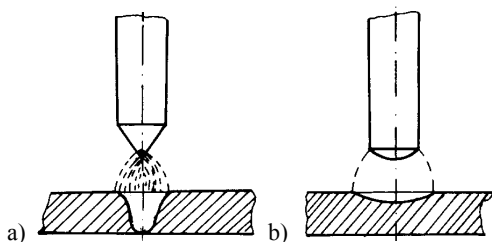
Netopljiva elektroda se pravi od volframa, odnosno legura volframa i torijuma ili cirkonijuma. Za ručni TIG postupak postoje tri vrste elektroda:

- Elektrode od čistog volframa (W) – temperatura topljenja 3410°C , koje se proizvode sinteovanjem praška volframa, čistoće min. 99,5%, jer veći udeo nečistoća prouzrokuje brzo trošenje elektrode.
- Elektrode od volframa sa dodatkom 0,5; 1 ili 2% oksida torijuma (W-Th), koji omogućava lakše emitovanje elektrona, što obezbeđuje lakše uspostavljanje i održavanje strujnog luka i bolje podnošenje strujnih opterećenja. Osim toga, ovim elektrodama se povećava stabilnost luka na temperaturama, nižim i do 1000°C u odnosu na elektrode od čistog volframa, čime se izbegava delimično rastapanje elektrode i obezbeđuje znatno duži radni vek. Na sl. 5.50 je prikazana zavisnost gustine struje od temperature za W i W-Th elektrode.
- Volframove elektrode sa 0,3–0,5% cirkonijuma. Po svojstvima i ceni ove elektrode su između dve navedene grupe. Primenuju se samo kod naizmjenične struje, odnosno za zavarivanje aluminijuma i lakih legura.



Slika 5.50. Zavisnost gustine struje od temperature kod W i W-Th elektrode

Ne samo vrsta materijala, već i oblik vrha elektrode bitno utiče na stabilnost luka i dubinu uvarivanja. Postoje dva osnovna oblika vrha elektrode: konusni i sferni. U prvom slučaju gustina struje je znatno veća, pa je strujni luk koncentrisan, sl. 5.51a. U drugom slučaju jačina struje je mala, luk nije koncentrisan, pa se dobija znatno manja dubina uvarivanja, a veća širina šava, sl. 5.51b.



Slika 5.51. Uticaj oblika vrha elektrode na oblik šava a) konusni b) sferni

5.7.3. Dodatni metal – žice za zavarivanje

Žice za zavarivanje čelika (nisu standardizovane po JUS) su po pravilu oblika šipke dužine 1000 mm, prečnika 0,8–4 mm. U tab. 5.11 su dati podaci o nekim žicama za zavarivanje nerđajućih visokolegiranih čelika proizvodnje FEP.

Tabela 5.11. Žica za zavarivanje nerđajućih visokolegiranih čelika

oznaka	hemijski sastav (%)							osnovni materijal
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Nb	Mo	
TIG 19/9 Nb	0,04-0,07	0,3-0,6	1,5-1,9	19,0-20,5	9,5-10,5	0,4-0,8		Č4571-2, Č4580
TIG 19/12/3 Nb	0,04-0,07	0,3-0,6	1,5-2,0	18,5-19,5	11,5-12,5	0,4-0,8	2,0-2,6	Č4573-4, Č4583
TIG 25/20	0,08-0,12	0,5-0,7	1,7-1,9	24,5-25,5	20,0-21,0			Č4578
TIG 18/8/6	0,05-0,10	0,2-0,5	6,5-7,5	18,5-19,5	8,0-9,0			visokolegirani č.

Za zavarivanje Al i njegovih legura se koriste žice i šipke, tab. 5.12, definisane po JUS C.H3.061. Njihovo označavanje je definisano na sledeći način: naziv proizvoda, d(xL), oznaka legure, stanje legure, gde je d prečnik, a L dužina žice (šipke) u mm. Primer označavanja je:

Žica 2,0 S.AIMg3.20 JUS C.H3.061 za vučenu žicu prečnika 2 mm, izrađenu od legure AlMg3.

Šipke za zavarivanje aluminijuma i aluminijumskih legura moraju da budu obojene na jednom kraju, sa čela, jednom ili dvema bojama, tab. 5.12. Primena žica i šipki za zavarivanje aluminijuma i aluminijumskih legura je takođe data u tab. 5.12.

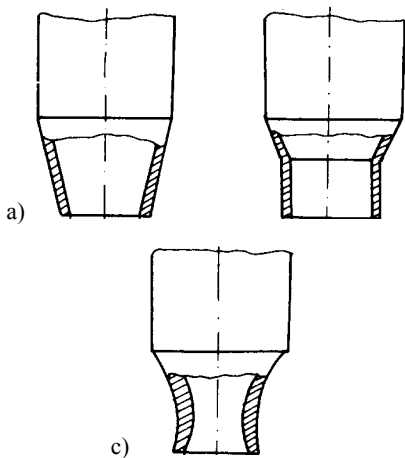
Tabela 5.12. Žice i šipke za zavarivanje aluminijuma i aluminijumskih legura

oznaka	boja	sastav - standard	primena (osnovni materijal)
S.AI99,8	plava-smeđa	JUS C.C2.100	AI99,8; AI99,7
S.AI99,5	plava	JUS C.C2.100	AI99,5; AI99; AlMn1
S.AlMn1	ljubičasta	JUS C.C2.100	AlMn1
S.AlMg3	zelena	JUS C.C2.100	AlMg2; AlMg3; AlMg5
S.AlMg5	zelena-smeđa	JUS C.C2.100	AlMg3; AlMg5
S.AlSi12	smeđa	JUS C.C2.100	Al-Si legure sa Si>8%

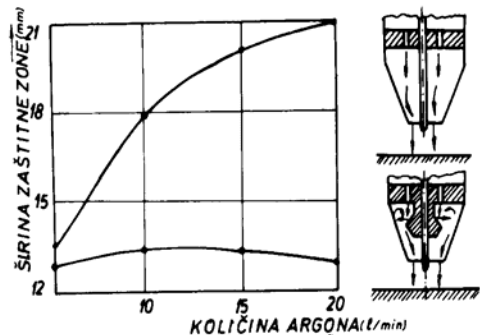
5.7.4. Zaštitni gasovi i mlaznica

Za zaštitu metalne kupke koriste se po pravilu inertni gasovi argon ili helijum, a ponekad i vodonik ili azot. Osnovne prednosti argona u odnosu na helijum su: veća jonizaciona energija, što omogućava lakše uspostavljanje i održavanje električnog luka, manji gradijent napona (6 V) u strujnom luku, što obezbeđuje neznatnu promenu napona pri promeni dužine luka, izraženiji efekat čišćenja oksida, manja osetljivost na strujanje okolnog vazduha, niža cena i sigurniji rad. Prednost helijuma je veća toplotna moć luka, što je bitno kod zavarivanja metala velike toplotne provodnosti, posebno kod većih debljina. Dodatni problem kod primene helijuma je njegova mala gustina (nekoliko puta manja od vazduha, dok je gustina argona veća od gustine vazduha), pa je za održavanje zaštitnog omotača potreban dva do tri puta veći protok gasa. Stoga se u praksi najviše primenjuje argon, a sreću se i mešavine argona sa helijumom (veće debljine i/ili materijali veće toplotne provodnosti) ili sa vodonikom (nerđajući čelik).

Osim vrste zaštitnog gasa, i oblik mlaznice ima veliki uticaj na efikasnost zaštite. Koriste se tri osnovna oblika mlaznice: konusni, cilindrični i profilisani, sl. 5.52. Najbolja zaštita se postiže profilisanim mlaznicama. Na efikasnost zaštite utiče i dovod gasa do mlaznice, sl. 5.53, koji se izvodi sa odbojnikom ili bez njega. Kao što se sa sl. 5.53 vidi, odbojnik vrlo povoljno utiče na širinu zaštitne zone, odnosno efikasnost zaštite.



a) konusna, b) cilindrična, c) profilisana
Slika 5.52. Konstrukтивni oblici mlaznica



Slika 5.53. Uticaj dovoda gasa do izlaza iz mlaznice na širinu zaštitne zone

5.7.5. Uređaj za zavarivanje

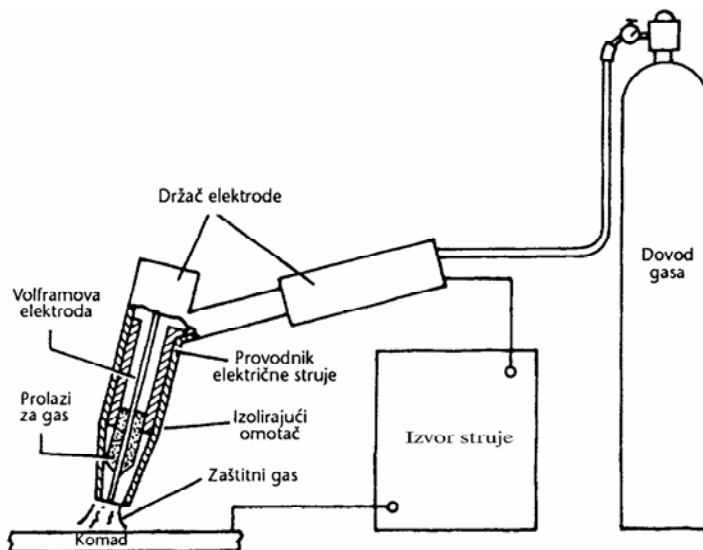
Uređaj za zavarivanje TIG postupkom je dat na sl. 5.54, a njegovi osnovni elementi su:

- izvor struje,
- boca (ili boce) za zaštitni gas, sa odgovarajućim ventilima,
- gorionik sa netopljivom elektrodom,
- paket creva za dovod argona, rashladnu vodu i električni kablovi.

Izvor struje je po pravilu strmopadajuće statičke karakteristika, kao kod E postupka, da bi slučajna promena dužine luka što manje uticala na jačinu struje. Ako se napaja naizmjeničnom strujom, uređaj treba da proizvodi simetrične, odnosno uravnotežene talase struje.

Pištolj za zavarivanje treba da ima dovoljan strujni kapacitet da se ne bi pregrevao, a po pravilu se hladi vazduhom ili vodom. Sastavni deo pištolja je mlaznica čiji oblik bitno utiče na efikasnost zaštite. Mlaznica treba da ima takav oblik da isticanje zaštitnog gasa bude bez turbulencije, a da pri tome bude što udaljenija od mesta zavarivanja, da bi zavarivač imao bolji pregled.

Creva za dovod zaštitnog gasa treba da budu od specijalnog plastičnog materijala ukoliko se koristi He čiji su atomi toliko mali da kroz obično gumeno crevo difunduju u okolinu. Osim navedenog, uređaj za TIG zavarivanje često ima i elemente za regulisanje jačine struje, uspostavljanje luka bez dodira vrha elektrode o radni komad, automatsko otvaranje i zatvaranje protoka argona i rashladne vode, VF generator i kondenzatorsku bateriju, a u slučaju TIG zavarivanja sa zagrejanom žicom postoji i dodatni element za elektrootporno zagrevanje žice.



Slika 5.54. Uređaj za TIG postupak – osnovni elementi

5.7.6. Tehnologija zavarivanja

Osnovni parametri zavarivanja TIG postupkom su vrsta i prečnik elektrode, vrsta i prečnik žice, brzina zavarivanja, vrsta i jačina struje, kao i sastav i protok zaštitnog gasa. Uticaj i izbor nekih osnovnih parametara (vrsta elektrode, žice i struje, sastav i protok zaštitnog gasa) je već objašnjen, a uticaj prečnika žice, brzine zavarivanja i jačine struje je praktično isti kao kod drugih elektro-lučnih postupaka. Uticaj i izbor prečnika elektrode je usko vezan za materijal od koga je elektroda napravljena, tj. jačinu (gustinu) struje, kao što je prikazano na sl. 5.50.

5.7.7. Modifikovane varijante TIG zavarivanja

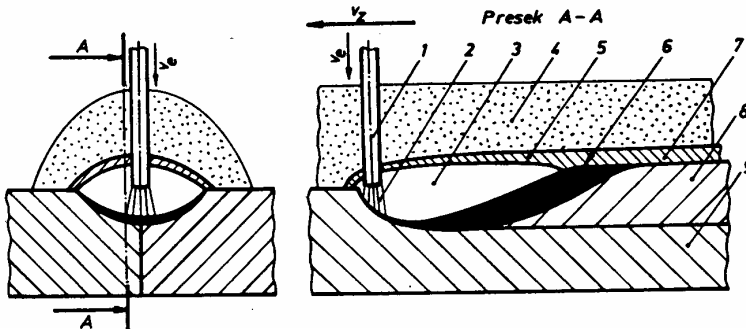
Postoje mnogobrojne varijante modifikovanog TIG postupka od kojih se najčešće koriste impulsno zavarivanje, zavarivanje u uskom žlebu, orbitalno zavarivanje cevi (opisano u #12), zavarivanje sa zagrejanom žicom, tačkasto zavarivanje i zavarivanje sa dvostrukom zaštitom.

Impulsno TIG zavarivanje omogućava optimalno korišćenje energije, jer se jačina struje značajno povećava samo u kratkom periodu vremena kada se rastopljeni vrh dodatni metala odvaja i prenosi u metalnu kupku, sl. 5.7d. Impulsno TIG zavarivanje je veoma pogodno za automatsko (orbitalno) zavarivanje cevi.

TIG zavarivanje sa zagrejanom žicom zahteva grejač koji električnim otporom predgreva žicu za zavarivanje, što omogućava brže topljenje dodatnog metala.

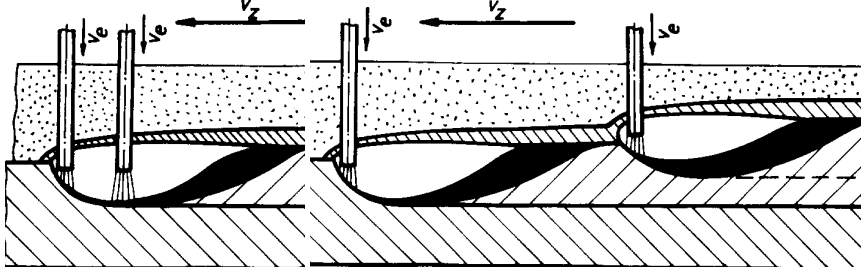
5.8. ELEKTROLUČNO ZAVARIVANJE POD PRAŠKOM – EPP POSTUPAK

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. 5.55. 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. 5.55. 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.



Slika 5.55. Šema EPP postupka (varijanta sa jednom elektrodnom žicom)

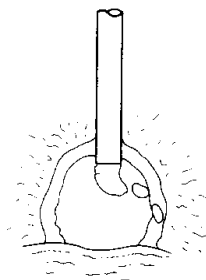
Za razliku od E postupka, gde jačina struje, napon električnog luka i brzina zavarivanja mogu da se menjaju u relativno uskim granicama, kod EPP postupka raspon promena je znatno veći, što omogućava efikasniju primenu ovog postupka, naročito ako je neophodna velika produktivnost kao kod debljih limova i dužih šavova. U tom slučaju se koriste dve elektrodne žice: u varijanti sa zajedničkom metalnom kupkom, koja se odlikuje jedinstvenom kristalizacijom metala šava i bržim hlađenjem, sl. 5.56a; ili u varijanti sa zasebnom metalnom kupkom, sl. 5.56b, koja se odlikuje sporijim hlađenjem.



a) sa zajedničkom metalnom kupkom

b) sa zasebnom metalnom kupkom

Slika 5.56. Šema zavarivanja sa dve elektrodne žice



Slika 5.58. Prenos dodatnog metala kroz rastopljeni sloj praška

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 konstruktivnih 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).

5.8.1. Prenos dodatnog metala

Prenos dodatnog materijala kod EPP postupka zavarivanja može da bude krupnim ili sitnim kapima, zavisno od jačine struje. Pri tome rastopljeni vrh elektrodne žice postaje konusan i kreće se kružno oko svoje ose, uz istovremeno njihanje, kao klatno. Kapi koje se odvoje od vrha žice mogu da se prenesu kroz luk ili kroz rastopljeni sloj praška, sl. 5.58. U svakom slučaju opasnost od rasprskavanja praktično ne postoji, a pitanje prenosa dodatnog metala je od znatno manje važnosti nego kod MAG/ MIG postupka.

5.8.2. Vrste i izvori struje

Kod EPP zavarivanja koristi se jednosmerna struja strmopadajuće ili blagopadajuće karakteristike, kao i naizmjenična struja blagopadajuće karakteristike. Izvor struje treba da obezbedi relativno veliku jačinu struje (najčešće 400–1500 A) što može da se po potrebi postigne i paralelnim vezivanjem više izvora.

Primena strmopadajuće karakteristike zahteva pažljivo praćenje dužine električnog luka i njegovo održavanje u što užim granicama, jer nema efekta samoregulacije kao kod blagopadajuće karakteristike. Regulacija dužine luka se postiže automatskim podešavanjem brzine dovođenja žice koja se povećava ako se poveća dužina i napon luka, i obrnuto. Kod primene blagopadajuće karakteristike koristi se efekt samoregulacije. Ovaj način regulacije je po pravilu povoljniji od prethodnog jer je reakcija na promenu napona gotovo trenutna zbog velike promene jačine struje i brzine topljenja elektrodne žice, odnosno dužine luka. Treba imati u vidu da je ova prednost blagopadajuće karakteristike izraženija kod predmeta manje debljine.

U slučaju primene naizmenične struje obavezno se koristi blagopadajuća karakteristika jer je električni luk nestabilniji po prirodi stvari, pa bi dodatna nestabilnost usled inercije pri regulaciji kod strmopadajuće karakteristike bila neprihvatljiva. Prednost naizmenične struje je u manjem skretanju električnog luka, tako da je pogodna za veće intenzitete struje i zavarivanja sa dve žice. Jednosmernom strujom se bolje kontroliše oblik i veličina metala šava, a uspostavljanje luka je mnogo lakše, što posebno važi za indirektnu polarnost. S druge strane direktna polarnost daje najveće brzine topljenja dodatnog metala, ali i manju dubinu uvarivanja, pa dolazi u obzir za tanje limove. Prema tome izbor vrste struje kod EPP zavarivanja zavisi od konkretnog problema.

5.8.3. Dodatni materijali

Dodatni materijali za zavarivanje EPP postupkom su elektrodna žica i prašak, ukoliko sadrži legirajući elemente. Elektrodne žice su različitog hemijskog sastava, zavisno od namene, a po pravilu imaju veći sadržaj mangana, radi smanjenja sklonosti šava ka vrućim prslinama i niži sadržaj ugljenika, radi smanjenja krtosti metala šava. Zbog povećane opasnosti od pojave poroznosti, elektrodne žice se proizvode sa kontrolisanim sadržajem fosfora, sumpora i ugljenika. Prema standardu JUS C.H3.052 elektrodne žice se označavaju slovnim simbolom \check{Z} i brojem 1 do 6, a za legirane žice i simbolom hemijskog elementa, npr. $\check{Z}1\text{Si}$, $\check{Z}2\text{Mo}$, $\check{Z}6\text{Mo}$, $\check{Z}2\text{Ni}$, $\check{Z}3\text{NiMo}$, tab. 5.13. Elektrodne žice se izrađuju u standardnom nizu prečnika: 0,8; 1; 1,6; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6; 8; 10 i 12 mm, a najčešće 2–5 mm.

Tabela 5.13. Elektrodna žice za EPP zavarivanje – oznake, sastav, primena

oznaka JUS	oznaka (FEP) PIVA	hemijski sastav	primena
$\check{Z}1$	EPP 1	C 0,08; Si 0,15; Mn 0,55	ugljenični i niskolegirani čelici, $R_m < 510$ MPa
$\check{Z}2$	EPP 2	C 0,1; Si 0,15; Mn 1,0	ugljenični i niskolegirani čelici, $R_m < 540$ MPa
$\check{Z}2\text{Mo}$	EPP 2Mo	C 0,1; Si 0,15; Mn 1,0; Mo 0,5	ugljenični i niskolegirani čelici $R_m < 680$ MPa, finozrni čelici $R_e < 450$ MPa, čelici za povišene temper.

Sastav i baznost praška za zavarivanje utiču na tok oksidacije i redukcije, a time i na uslove primarne i sekundarne kristalizacije materijala šava. Radi postizanja odgovarajućeg hemijskog sastava šava, osim baznosti, važan je i sadržaj MnO u prašku. Prema sadržaju MnO praškovi se dele na visokomanganske (>35% MnO), srednjemanganske (15–30% MnO) i niskomanganske (<15% MnO). Baznost praška može da se izračuna po sledećoj formuli:

$$B = \frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaF}_2 + (\text{MnO} + \text{FeO}) / 2}{\text{SiO}_2 + (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{ZrO}_2) / 2} \quad (5.13)$$

Prašak je u hemijskom smislu bazni za $B > 1,3$; kiseo za $B < 0,9$; neutralan za $0,9 < B < 1,3$. Kiseli prašak se primenjuje za niskougljenične čelike, a bazni za legirane čelike.

Po standardu JUS H.B1.060 praškovi se dele i označavaju prema načinu proizvodnje, granulaciji (krupnoći zrna), mehaničkim svojstvima, nameni za određene jačine i vrste struje zavarivanja, brzini zavarivanja i naponu praznog hoda pri zavarivanju naizmeničnom strujom.

Prema načinu proizvodnje praškovi se dele na: topljene (T), aglomerisane (A), sinterovane (S), mešane (M). Prema karakteru troske, praškovi se dele na kisele i bazne, a prema stepenu legiranja metala šava na pasivne (koji ne legiraju rastop) i aktivne (koji legiraju rastop).

U zavisnosti od namene praškovi se proizvode za zavarivanje niskougljeničnih, niskolegiranih, srednjelegiranih i visokolegiranih čelika, za zavarivanje obojenih metala, kao i za razne vrste navarivanja. Prašak se bira i koristi isključivo u kombinaciji sa određenom elektrodnom žicom, prema preporuci proizvođača. Upotreba praškova je dozvoljena samo u suvom stanju, pa vlažan prašak treba obavezno osušiti. Ako se izrađuje isti prašak u više granulacija, za manje jačine struje zavarivanja upotrebljava se grublja granulacija.

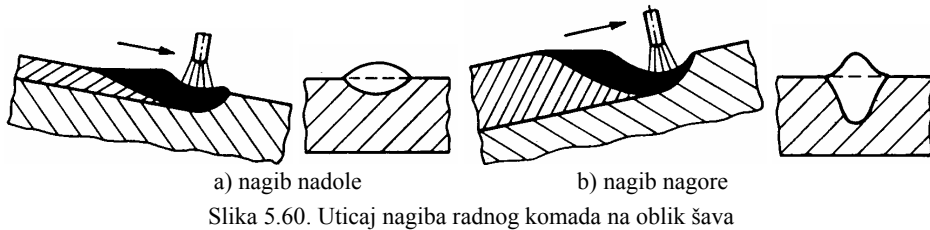
5.8.5. Tehnologija zavarivanja

Osnovni parametri EPP zavarivanja su vrsta i jačina struje, napon električnog luka, brzina zavarivanja i prečnik elektrodne žice. Uticaj osnovnih parametara je objašnjen u prethodnim poglavljima, pa su ovde date samo specifičnosti vezane za EPP postupak. Osim osnovnih parametara, na oblik metala šava bitnije utiču još i vrsta i granulacija praška, nagib elektrodne žice i radnog komada.

Treba imati u vidu da jačina struje direktno određuje brzinu topljenja elektrodne žice, w_z , odnosno efikasnost procesa, pa se po pravilu teži što većoj vrednosti jačine struje. Maksimalna jačina struje je ograničena dozvoljenom gustinom struje, odnosno prečnikom žice.

Povišenjem napona luka povećava se potrošnja praška i pospešuje prelaz legirajućih elemenata iz praška u metal šava. Međutim, suviše visok napon luka daje oblik šava koji je sklon prslinama i nalepljivanju.

Kao što je već pomenuto, elektrolučno zavarivanje pod praškom je moguće samo u horizontalnom položaju, ili sa malim nagibom radnog komada. Nagib radnog komada može da se iskoristi kod tankih limova da bi se dubina uvarivanja smanjila, sl. 5.60.



U zavisnosti od nagiba žice razlikuje se zavarivanje unapred, sl. 5.61a, i unazad, sl. 5.61b. Kod zavarivanja unapred luk i toplota su usmereni prema osnovnom metalu, a kod zavarivanja unazad prema metalnoj kupki, usled čega se rastop potiskuje iz žleba i dobija metal šava sa prevelikim nadvišenjem, sl. 5.61b.

