

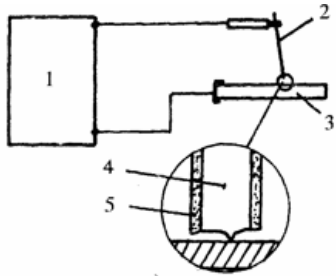
izvor: Sedmak, A., Šijački-Žeravčić, V., Milosavljević, A., Đorđević, V., Vukićević, M.: Mašinski materijali II deo, izdanje Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, 2000 (uskoro ponovo u štampi)

5. ELEKTROLUČNO ZAVARIVANJE

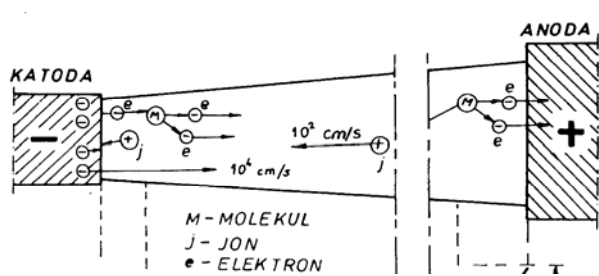
Pod pojmom elektrolučnog zavarivanja podrazumevaju se postupci zavarivanja koji kao izvor toplote koriste električni luk uspostavljen između elektrode i osnovnog materijala, a dodatni materijal je sama elektroda (postupci sa topljivom elektrodom) ili žica za zavarivanje (postupci sa netopljivom elektrodom). Konvencionalni postupci elektrolučnog zavarivanja su E (obložena elektroda), MAG/MIG (topljiva elektrodna žica u zaštiti inertnog ili aktivnog gasa), TIG (netopljiva elektroda i dodatni materijal oblika žice, u zaštiti inertnog gasa), EPP (topljiva elektrodna žica pod praškom) i zavarivanje punjenom elektrodom žicom u zaštiti gasa ili bez nje (samozaštitna žica). Svaki od ovih postupaka koristi toplotu električnog luka za topljenje dodatnog i osnovnog materijala i odgovarajuće izvore električne struje (uređaje za zavarivanje). Topljenje dodatnog materijala i njegov prenos u metalnu kupku je praćen pojavom sila, kao što su elektromagnetna i gravitaciona, sile od strujanja i eksplozije gasova, sila od pritiska plazme i sila od površinskog napona, koje bitno utiču na proces zavarivanja.

5.1. ELEKTRIČNI LUK

Električni luk je stabilno električno pražnjenje (usmereno kretanje elektrona) kroz ionizovani vazduh ili gas. Da bi vazduh bio jonizovan u njemu moraju da postoje elektroni i joni, koji svojim usmerenim kretanjem obezbeđuju protok električne struje. Elektroni i joni u vazduhu nastaju kao posledica procesa koji se odvija pri uspostavljanju električnog luka. Ovaj proces može da se objasni u osnovnim crtama na primeru uspostavljanja luka kratkim spojem, što se koristi kod E postupka (dodir elektrode i osnovnog metala, sl. 5.1). Zbog mikroskopskih neravnina na dodirnim površinama, sl. 5.1, kontakt i protok struje se uspostavlja na veoma maloj površini, gustina struje je veoma velika, pa se dodatni i osnovni materijal tope gotovo trenutno, a delimično i isparavaju. Dejstvom jakog električnog polja, stvorenog naponom praznog hoda (uključen izvor struje, ali strujno kolo još nije uspostavljeno), atomi metalnih para gube elektrone koje privlači pozitivna elektroda (anoda), dok preostali deo atoma (pozitivni jon) privlači katoda, sl. 5.2. Istovremeno mehanizmom termičke jonizacije katoda počinje da emituje elektrone, koji se kreću velikom brzinom (10^4 cm/s) prema anodi. Pri kretanju elektroni se sudaraju sa okolnim atomima i molekulima, stvarajući tako nove elektrone i jone, čije usmereno kretanje održava električni luk. U međuvremenu elektroda se odmiče na pogodno rastojanje, proces uspostavljanja luka je završen i postignuto je stabilno stanje u strujnom kolu koje čine izvor struje, elektroda, luk i osnovni metal. Pri tom temperatura u električnom luku dostiže (kod E postupka) 6000°C , odnosno oko 4200°C (na anodi) i 3600°C (na katodi), što obezbeđuje efikasno topljenje osnovnog i dodatnog metala.



Slika 5.1. Šema uspostavljanja luka



Slika 5.2. Električni luk - šematski prikaz

Da bi se ostvarila jonizacija vazduha potrebno je utrošiti određenu energiju, koja je za različite materijale određena tzv. **potencijalom jonizacije**, tab. 5.1. Potencijal jonizacije je najniži za zemnoalkalne metale, a najviši kod gasova kao što je azot (tab. 5.1). Zbog niskog potencijala jonizacije zemnoalkalni metali se dodaju oblozi elektrode da bi stabilizovali električni luk kod E postupka.

Tabela 5.1. Potencijal jonizacije za neke materijale

element	K	Na	Al	Ca	Fe	C	H ₂	O ₂	W	N ₂
potencijal jonizacije (V)	4,3	5,1	6,0	6,1	7,8	11,2	13,5	13,6	14,0	14,5

S obzirom na karakterističan pad napona u električnom luku mogu da se uoče tri različite oblasti: katodna (2), anodna (4) i stub luka (3), sl. 5.3. Stub luka nije u direktnom kontaktu ni sa anodom ni sa katodom, već je od njih odvojen užarenim oblastima koje se zovu anodna i katodna mrlja, sl. 5.3, pozicije (1) i (5). U atmosferi stuba luka se nalaze elektroni, kao i pozitivni i negativni joni, koji su ukupno električno neutralni. U oblasti katodne mrlje oslobađaju se elektroni, potrebni za održavanje struje u stubu luka. Dužina katodne mrlje je približno 10^{-5} cm, anodne mrlje 10^{-3} cm, a vrednosti katodnog (U_k) i anodnog (U_a) pada napona su date u tab. 5.2. Na osnovu vrednosti katodnog i anodnog pada napona za različite metale, date za različite jačine struje i gasne sredine, može da se zaključi da gasna sredina ima znatno veći uticaj od jačine struje, tj. da zaštitni gasovi kao što su Ar i CO₂ značajno smanjuju katodni i anodni pad napona.

Tabela 5.2. Vrednosti katodnog i anodnog pada napona

katoda	anoda	jačina struje (A)	gasna sredina	U_k (V)	U_a (V)
Fe	Fe	100-200	vazduh	12-17	6-9
Cu, Al	Cu, Al			12-14	10-11
Fe	Fe	200-250	vazduh	13-13,5	7-8
Cu, Al	Cu, Al			13,5-15	8,5-11
Fe	Fe	150-250	Ar	8,3-8,7	2,3-3,2
Fe	Fe	100-250	CO ₂	7,5-9	1,2-3,3

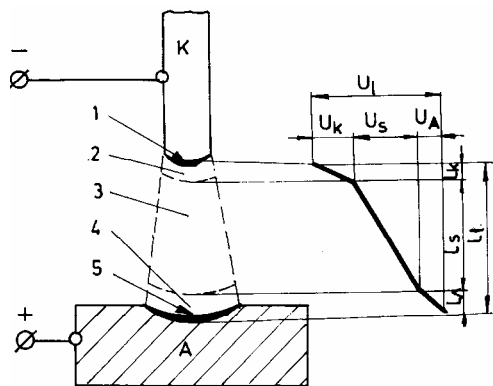
Ukupni pad napona u luku, U_l , definisan je izrazom

$$U_l = U_k + U_{sl} + U_a \quad (5.1)$$

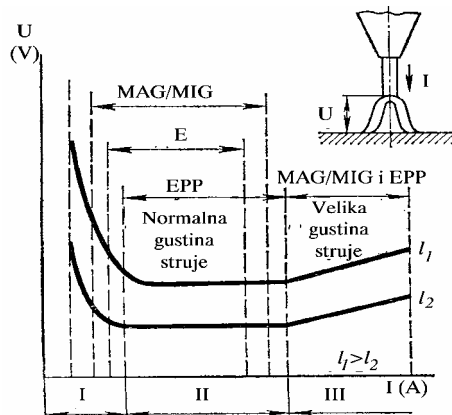
gde je U_{sl} pad napona u stubu luka. Ukupni pad napona i dužina luka su povezani izrazom

$$U_l = a + b \cdot l \quad (5.2)$$

gde je a koeficijent anodnog i katodnog pada napona, koji ne zavisi od dužine luka l , a b srednji pad napona po jedinici dužine luka.



Slika 5.3. Šema zavarivačkog luka



Slika 5.4. Statička karakteristika luka

Električni luk se, u smislu zavisnosti napona luka od jačine struje, ne ponaša kao klasični provodnici, što znači da za njega Omov zakon ne važi. Zbog toga je potrebno poznavati **statičku karakteristiku električnog luka**, odnosno zavisnost napona od jačine struje, koja je na sl. 5.4 data za dve dužine luka, l_1 i l_2 . Znajući da je toplotna moć luka proporcionalna naponu i jačini struje, može da se zaključi da luk veće dužine (l_1) ima veću toplotnu moć. Zavisnost napona od jačine struje pokazuje tri različite oblasti u ponašanju luka - I oblast u kojoj napon opada sa porastom jačine struje, II oblast u kojoj je napon približno konstantan, i III oblast gde napon raste sa porastom jačine struje. Nelinearna zavisnost napona luka od jačine struje je posledica različitog ponašanja pojedinih oblasti luka pri porastu jačine struje.

Stabilnost električnog luka zavisi od vrste struje. Kod jednosmerne struje luk je stabilniji nego kod naizmenične struje, jer nema ciklične promene napona i jačine struje. Teorijski posmatrano, promena napona i jačine naizmenične struje uslovljava gašenje luka pri svakom prolasku kroz nulu. Praktično se to ne dešava zbog inercije strujnog kola, ali je zato luk nestabilan. Da bi se postigla dovoljna stabilnost luka naizmenične struje koristi se veći napon praznog hoda, što je moguće samo do nivoa koji je bezbedan za zavarivača (60-70V). Stoga se u oblogu elektroda ili prašak kod EPP postupka dodaju hemijska jedinjenja na bazi K, Na, Ca i oksida Fe, koja smanjuju potencijal jonizacije i time povoljno utiču na stabilnost luka. S druge strane, hemijska jedinjenja kao što je kalcijum-fluorid, koja se dodaju oblozi (tipično za baznu oblogu) radi uklanjanja vodonika iz metala šava, povećavaju potencijal jonizacije, pa se zavarivanje elektrodama sa baznom oblogom po pravilu izvodi jednosmernom strujom.

Na stabilnost električnog luka bitno utiče i njegova temperatura. Hlađenje strujom zaštitnog gasa (npr. CO_2) može da ugrozi stabilnost luka, posebno zbog dodatnog oduzimanja toplote od luka usled disocijacije troatomnog gasa kao što je CO_2 . Stoga se MAG postupak izvodi isključivo jednosmernom strujom, a sve češće se koriste žice punjene lako jonizujućim materijama. Ovaj problem je manje izražen kod jednoatomnih gasova (Ar, He) jer kod njih nema dodatnog oduzimanja toplote disocijacijom.

Osim statičke karakteristike i stabilnosti, bitna osobina luka je krutost, pod čim se podrazumeva njegova sposobnost da premosti prostor između anode i katode bez bočnog skretanja. Bočno skretanje je posledica pomeranja anodne ili katodne mrlje, strujanja okolnog vazduha i dejstva elektromagnetnih sila. Od tri navedene pojave, najuticajnije je dejstvo elektromagnetnih sila, koje ponekad zahteva primenu posebnih mera za sprečavanje skretanja luka (videti #5.3.1).

5.2. PRENOS DODATNOG MATERIJALA KROZ ELEKTRIČNI LUK

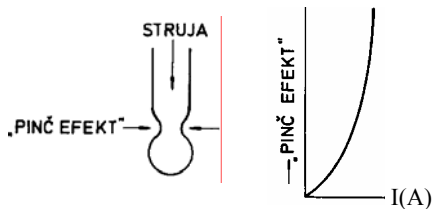
Mehanizam prenosa dodatnog metala kroz električni luk je vrlo komplikovan i još uvek nerazjašnjen u potpunosti, ali se zna da uključuje sledeće bitne pojave: gravitaciju, površinski napon, magnetno polje oko luka, pritisak od strujanja gasova, pritisak plazme i eksploziju gasova.

Gravitacija uvek deluje nadole, što znači da, osim u horizontalnom položaju, ometa proces prenosa dodatnog metala.

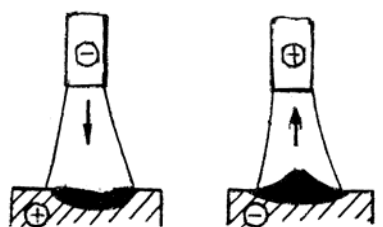
Površinski napon u početnoj fazi teži da stvori kapljicu sfernog oblika i sprečava njeno odvajanje od elektrode, a kada se kapljica odvoji i dođe u metalnu kupku sprečava njeno razlivanje, što pomaže zavarivanje u prinudnim položajima. Sila površinskog napona zavisi od viskoziteta rastopljenog metala.

Magnetno polje oko električnog luka (provodnika), proizvodi elektrodinamičku silu. U slučaju provodnika konstantnog preseka ova sila deluje samo u radijalnom pravcu, a u slučaju provodnika promenljivog preseka, kakav je rastopljeni vrh elektrode, osim radijalne postoji i aksijalna komponenta. Smer dejstva radijalne komponente elektrodinamičke sile je prema osi provodnika, što izaziva suženje preseka kapljice (tzv. "**pinč efekt**", sl. 5.5), dok aksijalna komponenta deluje u smeru prenosa dodatnog metala, a intenzitet sile je proporcionalan kvadratu jačine struje, sl. 5.5. Stoga se povećanjem jačine struje pojačava pinč efekt i olakšava prenos dodatnog metala, ali se takođe povećava i rasprskavanje dodatnog metala.

Od pritiska plazme nastaje sila koja utiče na oblik metalne kupke i metala šava kod zavarivanja jednosmernom strujom. Naime, kada je elektroda na negativnom polu ova sila deluje u pravcu prenosa dodatnog metala, stvarajući udubljenje u metalnoj kupki, i obrnuto, kada je elektroda na pozitivnom polu, sila od pritiska plazme deluje suprotno kretanju dodatnog metala, stvarajući ispupčenje, sl. 5.6.



Slika 5.5. Pinč efekt



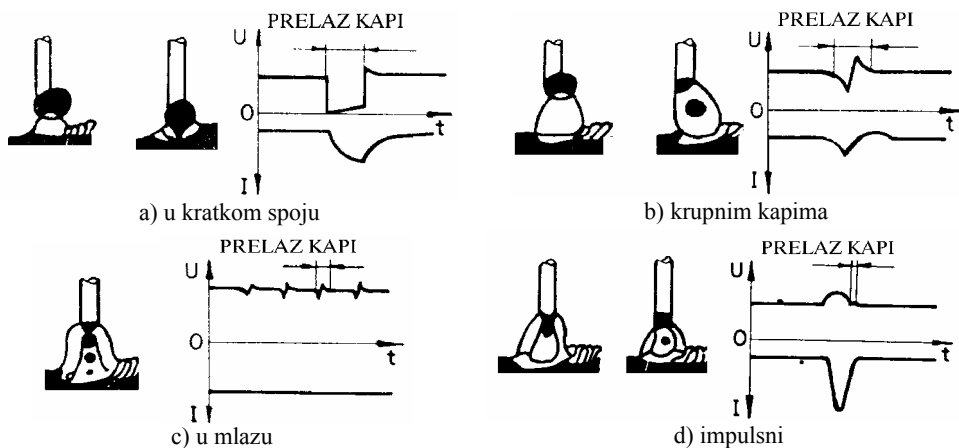
Slika 5.6. Delovanje pritiska plazme

Pritisak od strujanja gasova (koji postoje ne samo kod MAG/MIG i TIG postupka, već i kod E postupka - usled isparavanja obloge) takođe deluje u smeru prenosa dodatnog metala, a utiče i na obrazovanje ivica šava. Sila pritiska je proporcionalna količini gasova, odnosno debljini elektrode.

Eksplozije gasova zarobljenih u kapljici dodatnog metala po pravilu pomažu prenos dodatnog metala jer izlaze iz kapljice na njenoj zagrejanijoj strani (prema elektrodi), što stvara silu reakcije u pravcu kretanja kapljice. S druge strane, eksplozije gasova mogu da izazovu i rasprskavanje dodatnog metala van metalne kupke.

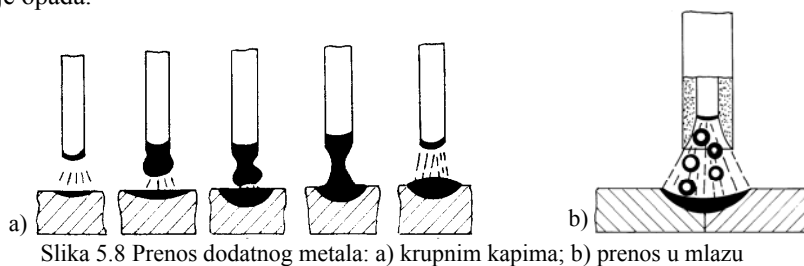
Osim navedenih sila, na rastopljenu kapljicu deluju još neke manje bitne sile, kao što su aerodinamička sila usled kretanja kapljice i sila pri neutralizaciji jona na katodi.

Prenos dodatnog metala se ostvaruje na razne načine, od kojih su najčešći prenos **krupnim kapima u kratkom spoju** (sl. 5.7a), prenos **krupnim kapima bez kratkog spoja** (sl. 5.7b), prenos **sitnim kapima u mlazu** (sl. 5.7c), i **impulsni** prenos (sl. 5.7d).



Slika 5.7. Osnovni načini prenosa dodatnog metala

Prenos krupnim kapima u kratkom spoju se odvija u više faza: pod uticajem toplote na vrhu elektrode (ili elektrodne žice) obrazuje se kap tečnog metala, koja se izvesno vreme ne odvaja usled dejstva površinskog napona, sl. 5.8a. Povećanjem veličine kapi raste uticaj sila koje približavaju kap rastopu, uz приметно sužavanje preseka usled delovanja površinskog napona i elektrodinamičke sile. Usled delovanja površinskog napona kap se pri dodiru sa rastopom odvaja od vrha elektrode, a neposredno pre odvajanja se izdužuje i kratko spaja elektrodu sa rastopom, prekidajući luk. Pri tome napon luka brzo pada do nule, a jačina struje raste, sl. 5.7a. Posle prelaska kapi u rastop, luk se ponovo uspostavlja, napon luka brzo raste, a jačina struje opada.



Slika 5.8. Prenos dodatnog metala: a) krupnim kapima; b) prenos u mlazu

Prenos krupnim kapima bez kratkog spoja je sličan prethodnom, s tim da se kap odvaja od dodatnog metala pre dodira sa rastopljenim metalom, sl. 5.7b. Promena napona i jačine struje je slična, ali manje izražena nego u slučaju prenosa u kratkom spoju, sl. 5.7b. Oba načina prenosa krupnim kapima su karakteristična za tankoobložene elektrode kod E postupka zavarivanja i za MAG/MIG postupka u zaštiti aktivnog gasa. U slučaju prenosa krupnim kapima bez kratkog spoja kod MAG/MIG postupka u zaštiti aktivnog gasa javlja se značajna reaktivna sila koja deluje odbojno na kap, što se smatra modifikovanim načinom prenosa ukoliko ne dođe do značajnog rasprskavanja kapi.

Prenos sitnim kapima je karakterističan po sitnim i mnogobrojnim kapima, koje se pod dejstvom pritiska gasova kreću u mlazu prema rastopu, sl. 5.7c. Promena napona i je mala, a jačina struje je praktično konstantna, sl. 5.7c. Kako je sila gravitacije u ovom slučaju mala, prenos u mlazu je pogodan za prinudne položaje zavarivanja, a s obzirom na velike jačine struje koje koristi, ovaj način prenosa je pogodan za deblje limove. Kod E postupka prenos u mlazu je karakterističan za debeloobložene elektrode, sl. 5.8b, a kod MAG/MIG postupka za zaštitu inertnim gasom.

Impulsni prenos je kombinacija prenosa krupnim kapima i prenosa u mlazu, a postiže se namernim i velikim povećanjem struje u kratkom vremenskom periodu, sl. 5.7d. Ovaj način

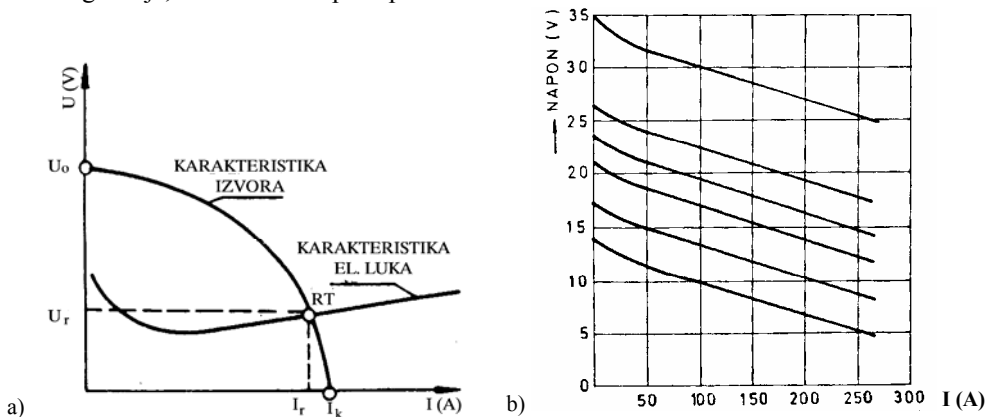
prenosa daje najbolji kvalitet zavarenog spoja i sve više se koristi kod MAG/ MIG postupka, jer je poslednjih godina razvijen niz novih, poboljšanih varijanti, kao što je npr. prenos kod koga dominira površinski napon (STT - *surface tension transfer*).

Osim četiri osnovna načina prenosa dodatnog metala i već pomenutih modifikacija, prema klasifikaciji MIZ postoji još nekoliko varijanti načina prenosa, kao što su rotirajući prenos, koji nastaje kod MAG/MIG postupka u zaštiti inertnog gasa pri velikim jačinama struje i velikim slobodnim dužinama elektrodne žice (videti #5.5.1) i prenos kroz rastopljeni prašak kod EPP postupka (videti #5.8.1). Pri rotirajućem prenosu dodatni metal ima veliku sklonost ka rasprskavanju, pa je njegov praktični značaj mali, posebno u novije vreme kada impulсни način prenosa pomoću invertorskih uređaja postaje dominantna varijanta primene MAG/MIG postupka.

5.3. VRSTE I IZVORI ELEKTRIČNE STRUJE ZA ZAVARIVANJE

Za elektrolučno zavarivanje se koriste obe vrste struje - naizmjenična i jednosmerna. Izvori naizmjenične struje su transformatori, a jednosmerne struje ispravljači i pretvarači. Izvori struje treba da obezbede neophodnu jačinu struje i napon luka u nekom radnom opsegu, kao i lako uspostavljanje luka i njegovu stabilnost. Osim toga, u nekim slučajevima se postavljaju specifični zahtevi, kao što je impulsna struja kod MIG/ MAG postupka, uspostavljanje luka bez dodira sa elektrodom i ispravljanje nesimetrije struje kod TIG postupka, što je detaljnije opisano u odgovarajućim poglavljima.

Osnovna karakteristika svakog izvora struje je zavisnost napona od jačine struje, odnosno njegova spoljna ili statička karakteristika. Osnovni parametri **statičke karakteristike izvora struje** su napon praznog hoda (U_0), koji nastaje kada je izvor struje uključen, ali se ne zavaruje ($I=0$), **struja kratkog spoja** (I_k), koja nastaje kada je elektroda u dodiru sa osnovnim metalom ($U=0$), i **radna tačka** (RT), definisana presekom statičkih karakteristika izvora struje i električnog luka, koja određuje radni napon (U_r) i struju (I_r). Navedeni parametri su prikazani na sl. 5.9a za slučaj strmopadajuće statičke karakteristike, koja se po pravilu koristi kod ručnih postupaka zavarivanja (E, TIG), jer obezbeđuje malu promenu jačine struje pri slučajnoj promeni dužine luka. Za poluautomatske postupke zavarivanja (MAG/MIG) po pravilu se koristi blagopadajuća, odnosno konstantna karakteristika izvora, sl. 5.9b, koja obezbeđuje efekt samoregulacije, dok se za EPP postupak koriste obe vrste izvora.



Slika 5.9. Statička karakteristika luka a) strmopadajuća; b) blagopadajuća

Za ocenu mogućnosti primene nekog izvora struje za zavarivanje bitna odlika je **intermitencija**, X , (radni ciklus), koja je definisana kao količnik vremena u kome je izvor opterećen (efektivno vreme zavarivanja, t_z) i ukupnog vremena, koje osim efektivnog vremena

zavarivanja uključuje i vreme pauze, t_o , potrebne npr. za zamenu elektrode, tokom koje je izvor u praznom hodu:

$$X=100 \cdot t_z / (t_o + t_z) \quad (5.3)$$

Kada se određuje intermitencija ukupno vreme $t_o + t_z$ nije proizvoljno već se uzima 10 minuta. Tipična vrednost intermitencije za izvor struje za E postupak je 50%, što znači da je u ciklusu od 10 minuta izvor opterećen najviše 5 minuta, a najmanje 5 minuta je u praznom hodu. Za (polu)automatske uređaje izvori struje treba da imaju intermitenciju 100%. Na osnovu vrednosti intermitencije može da se odredi približno i trajna jačina struje koju daje izvor, prema izrazu

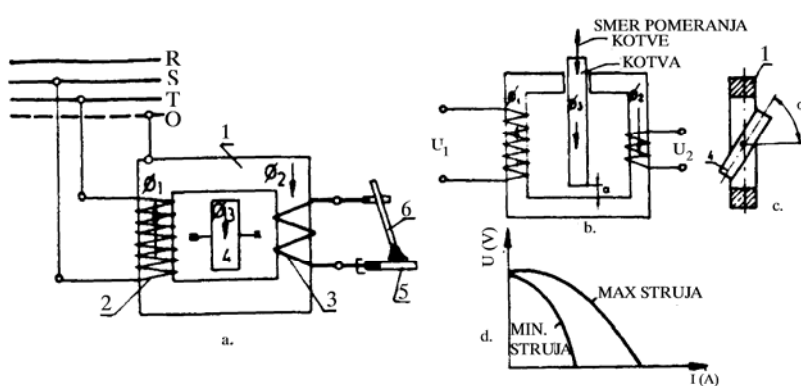
$$I_{100} = I_{nom} \cdot \sqrt{X/10} \quad (5.4)$$

gde je I_{100} trajna jačina struje, a I_{nom} nominalna jačina struje.

5.3.1. Transformatori

Transformatori za zavarivanje se sastoje od jezgra od železnih limova (1) - sl. 5.10, primarnog namotaja (2) vezanog za mrežu, sekundarnog namotaja (3) vezanog za strujno kolo u kome su radni komad (5) i elektroda (6), i regulator jačine struje. Primarni i sekundarni namotaji smanjuju napon mreže (380 ili 220 V) na napon praznog hoda (najviše 100V). Postoje različiti načini regulacije jačine struje, a najčešće se koriste pomična kotva, prigušnica i promenljiv broj namotaja. Transformatori se uglavnom koriste za E postupak, pa se prave tako da daju strmopadajuću karakteristiku.

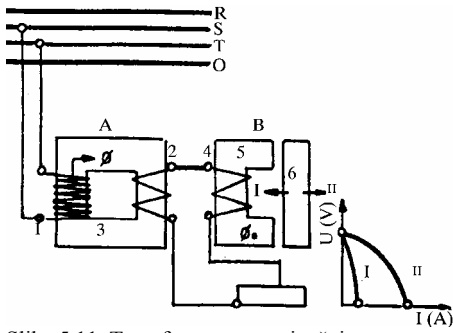
Kod transformatora sa pomičnom kotvom, pozicija (4) na sl. 5.10a, jačina struje se reguliše podelnim pomeranjem, sl. 5.10b, ili zaokretanjem kotve, sl. 5.10c, a odgovarajuće statičke karakteristike (u rasponu minimalne i maksimalne jačine struje) su date na sl. 5.10d. Ovi transformatori mogu da obezbede jačine struje do 1200 A, a pomeranje kotve je ručno ili automatsko.



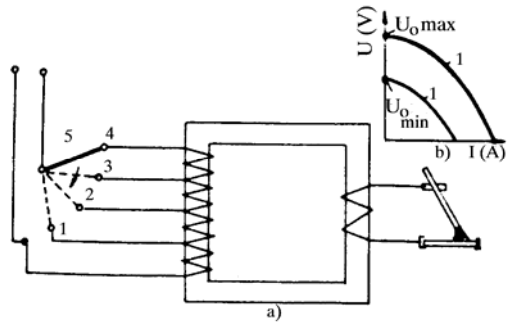
Slika 5.10. Šema transformatora sa pomičnom kotvom

Transformatori sa prigušnicom u sekundarnom kolu, oznaka B na sl. 5.11, daju statičke karakteristike slično prethodnim. Prigušnica je namotaj sa železnim jezgrom (5), koji može da reguliše jačinu struje kontinualno u opsegu od I do II pomoću kotve (6) koja se kreće od položaja I do II, ili stepenasto, nekim drugim konstruktivnim rešenjem. Ovi transformatori obezbeđuju srednje i velike jačine struje i veoma su pogodni za rad na terenu jer nisu osetljivi na promenu napona mreže.

Transformatori sa promenljivim brojem namotaja imaju nekoliko mogućih položaja sklopke (pozicija 5 na sl. 5.12a), čime se menja ne samo jačina struje, već i napon praznog hoda, sl. 5.12b. Ovi transformatori daju relativno male jačine struje i visoke napone praznog hoda, i najčešće se koriste za kućne (neprofesionalne) aparate za zavarivanje.



Slika 5.11. Transformator sa prigušnicom



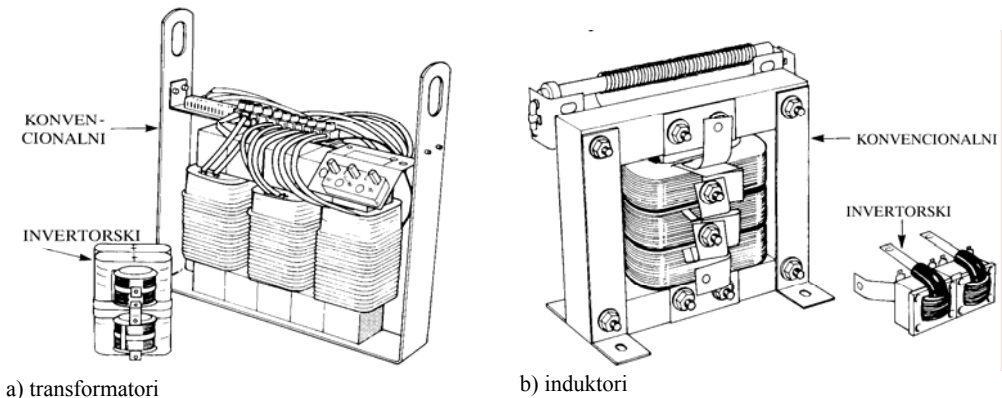
Slika 5.12 Transformator sa promenljivim brojem namotaja

5.3.2. Ispravljači i invertori

Ispravljači su komplikovanije konstrukcije, jer osim transformatora, imaju još i ispravljačke elemente i upravljački sistem. Ispravljački deo može da bude od selenskih ili germanijumskih ploča, odnosno od silicijumskih (poluprovodnih) dioda. Ispravljači mogu da rade sa velikim jačinama struje, pa se koriste za sve postupke zavarivanja. Statička karakteristika može da bude (strmo)padajuća ili konstantna. Iako struja na izlazu iz ispravljača ima izvesnu talasavost (do 5%, što nema bitnog uticaja na stabilnost luka), ovaj izvor jednosmerne struje se znatno više koristi od pretvarača, jer je jeftiniji i ne pravi buku.

U novije vreme sve više se koriste invertorski ispravljači, koji su znatno lakši, jeftiniji i pogodniji za upotrebu od ostalih izvora struje za zavarivanje. Prva faza rada invertorskih ispravljača je pretvaranje naizmernične struje gradske mreže u jednosmernu struju, koja se zatim uvodi u invertorsko kolo. U invertorskom kolu se jednosmerna struja pretvara u naizmerničnu, ali se ujedno znatno povećava njena učestanost (sa 50 Hz na 5-50 kHz). Ova struja se zatim svodi na potrebni napon i jačinu pomoću transformatora koji je znatno manji od klasičnog, jer radi pri visokoj učestanosti, sl. 5.13a. Transformisana naizmernična struja se zatim ispravlja u jednosmernu struju uobičajenim elektronskim komponentama, a na kraju prolazi kroz induktor, koji je takođe znatno manji od konvencionalnog induktora, sl. 5.13b. Kontrola svih navedenih procesa zahteva dodatnu elektroniku, što ne povećava značajnije masu uređaja, a omogućava zadavanje proizvoljnog vremenskog ciklusa napona i jačine struje i time prenos dodatnog metala po želji. Zahvaljujući tome invertorski izvor struje može da proizvodi različite statičke i dinamičke karakteristike, što omogućava primenu jednog uređaja na više postupaka zavarivanja (npr. E, MAG/MIG i TIG).

Dodatna prednost invertora je njihova povećana efikasnost jer su gubici u bakarnim namotajima u transformatoru manji u odnosu na konvencionalne transformatore, pa je stepen korisnosti invertora veći od svih ostalih izvora zavarivanja.



a) transformatori

b) induktori

Slika 5.13. Poređenje veličine konvencionalnih i invertorskih uređaja

5.3.3. Pretvarači

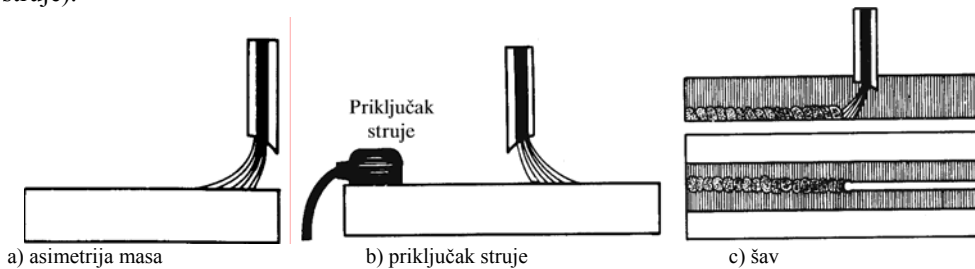
Pretvarači se sastoje od mehanički povezanih pogona (npr. elektromotor) i generatora koji proizvode jednosmernu struju. U oba slučaja sastavni delovi su rotor i stator. Najčešća konstruktivna rešenja su: pretvarač sa nezavisnom pobudom i diferencijalnim rednim pobudnim namotajem, pretvarač sa složenom diferencijalnom pobudom i pretvarač sa poprečnim elektromagnetnim poljem. Konačno, kao posebnu vrstu izvora treba pomenuti agregate, kod kojih je motor sa unutrašnjim sagorevanjem pogon. U tab. 5.3 su date uporedne karakteristike izvora struje za zavarivanje.

Tabela 5.3. Uporedne karakteristike izvora struje za zavarivanje

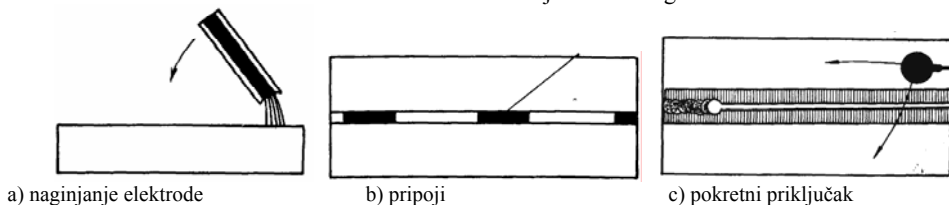
	Pretvarač	Ispravljač	Transformator	Invertor
uspostavljanje luka	vrlo lako	vrlo lako	lako do teško	lako
skretanje luka	veliko	veliko	nezatno	znatno
vrste elektroda	sve	sve	teško sa baznim	sve
opterećenje mreže	ravnomerno	ravnomerno	neravnomerno	ravnomerno
gubici praznog hoda	veliki	srednji	mali	mali
stepen korisnosti	0,6	0,7-0,8	0,8-0,9	0,9-0,95
održavanje	veliko	srednje	malo	malo
cena	visoka	srednja	niska	niska
masa	velika	velika	velika	mala

5.3.4. Izbor vrste struje

Pri izboru vrste struje prvenstveno treba da se vodi računa o stabilnosti i **skretanju električnog luka**. Kod jednosmerne struje luk je po prirodi znatno stabilniji, jer nema promene polariteta struje, ali može da se javi skretanje luka usled magnetnih sila. Osnovni uzroci ovoj pojavi su asimetrični raspored magnetnih masa u odnosu na luk, sl. 5.14a, priključak struje, sl. 5.14b i asimetrija masa usled prisustva šava, sl. 5.14c. Da bi se sprečilo skretanje luka treba ukloniti uzroke njegovog nastajanja ili neutralisati njegovo dejstvo, a ako to nije moguće, zavarivati naizmeničnom strujom, kod koje je ova pojava zanemarljiva. Sprečavanje pojave skretanja luka je prikazano na sl. 5.15a (naginjanje elektrode prema većoj masi), sl. 5.15b (pripojanje pre zavarivanja i pogodan redosled zavarivanja) i sl. 5.15c (pokretni priključak struje).



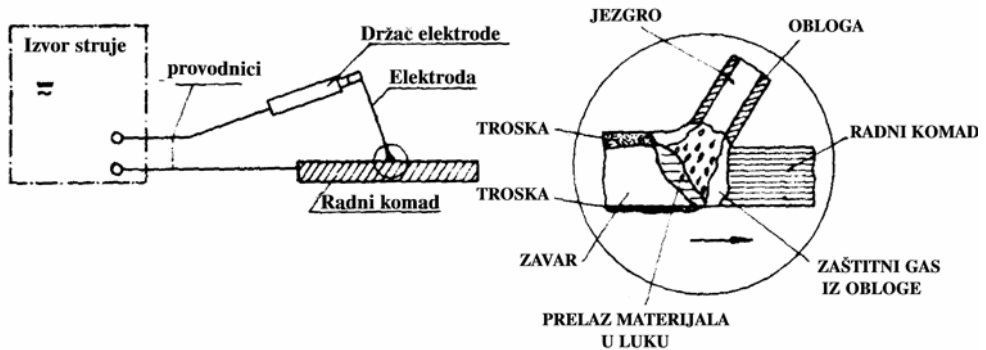
Slika 5.14. Uzroci skretanja električnog luka



Slika 5.15. Načini sprečavanja skretanja električnog luka

5.4. 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. 5.16. 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 specijalnim čekićem.



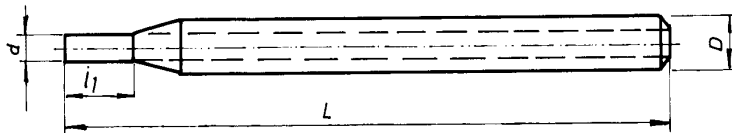
Slika 5.16. Šematski prikaz E postupka zavarivanja

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.

5.4.1. Dodatni materijal i načini njegovog prenosa - obložena elektroda

Elektroda za E postupak zavarivanja ima metalno jezgro, koje je obloženo sem na slobodnom kraju, sl. 5.17. 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.



Slika 5.17. Obložena elektroda (d - prečnik, l_1 - slobodni kraj, L - dužina, D - prečnik obloge)

Zaštita zone zavarivanje od okolnih štetnih gasova (prvenstveno kiseonik, vodonik i azot) se ostvaruje gasovitim i čvrstim produktima topljenja i sagorevanja obloge. Ova uloga obloge se ostvaruje višestruko:

- rastopljena kap dodatnog materijala je zaštićena troskom koja je okružuje pri njenom prelasku u metalnu kupku;
- metalna kupka je zaštićena troskom koja pliva na njenoj površini;
- gasovi okružuju mesto zavarivanja i ne dozvoljavaju pristup štetnim okolnim gasovima.

Stabilizacija i jonizacija električnog luka se postiže dodavanjem soli natrijuma, barijuma, kalcijuma i kalijuma u oblogu, koje stvaraju gasove sa velikom sposobnošću jonizacije, čime bitno povećavaju sposobnost vazduha da provodi struju.

Troska, obrazovana od očvrslih delova rastopljene obloge prekriva metal šava i usporava njegovo hlađenje, jer ima znatno manju toplotnu provodnost. Posle zavarivanja troska se uklanja specijalnim čekićem.

Da bi se obavila dezoksidacija metala šava oblozi se dodaju elementi sa velikim afinitetom prema kiseoniku kao što su Ti, Al, Si, Mn, a da se pri tom obrazovani oksidi lako uklanjaju iz metala šava. Prečišćavanje ostalih nečistoća metala šava se ostvaruje na sličan način kao dezoksidacija. Radi se prvenstveno o uklanjanju vodonika iz metala šava, čemu služi CaF_2 , zatim fosfora i sumpora, čemu služe CaO i MnO, kao i svih ostalih štetnih elemenata, npr. azota. Legiranje metala šava je potrebno da bi se nadoknadio sagoreli udeo pojedinih elemenata ili da bi se poboljšala svojstva metala šava. U tom cilju najčešće se dodaju Mn, Si i Ni.

Uloga obloge u omogućavanju prinudnih položaja zavarivanja (npr. nadglavni) se ostvaruje povećanjem njene viskoznosti, što se postiže prvenstveno dodavanjem baznih i celuloznih sastojaka.

Prema sastavu obloga je u metalurškom smislu kisela, kiselo-rutilna, bazna, celulozna, oksidna i rutilna. Osim navedenih postoje i specijalne vrste obloge. Hemijski sastav i osobine ovih obloga su dati u tab. 5.4. Prema odnosu ukupnog prečnika (uključujući oblogu, sl. 5.18), D , i prečnika jezgra, d , elektrode se dele na tanko obložene ($D/d < 1,2$), srednje obložene ($1,2 < D/d < 1,4$) i debelo obložene ($D/d > 1,4$).

Tabela 5.4. Hemijski sastav i osobine različitih obloga čeličnih elektroda

Obloga	Hemijski sastav	Osobine
kisela	oksidi Fe i Mn, alumosilikati, feromangan	smanjen viskozitet troske, lep izgled i loše mehaničke osobine metala šava
rutilna	rutil, alumosilikati, ferolegure	lep izgled i dobre mehaničke osobine šava
kiselo-rutilna	kao kisela, uz dodatak rutila	kombinacija osobina kisele i rutilne obloge
bazna	karbonati, fluoridi, oksidi, hematit	dobra mehaničke osobine šava, posebno žilavost (nizak sadržaj H)
celulozna	celulozna vlakna, rutil, silikati, dezoksidatori	svi položaji, visok sadržaj H, koreni zavari cevovoda
oksidna	oksid Fe i Mn, kvarc, alumosilikati	lep izgled i loše mehaničke osobine metala šava

Na način prenosa dodatnog metala kod E postupka najviše utiču debljina i vrsta obloge i jačina struje. Povećanjem debljine obloge i dodavanjem sastojaka koji smanjuju površinski napon pospešuju se prenos sitnim kapima. Jača struja takođe omogućava prelaz od krupnih ka sitnim kapima, jer pojačava dejstvo pinč efekta i pritiska gasova.

5.4.2.1. Označavanje elektroda

Da bi se olakšala identifikacija elektroda uvedeno je standardizovano označavanje, i to posebno za pojedine vrste konstrukcionih materijala, tab. 5.5. Osim navedenih materijala, postoje i elektrode za zavarivanje drugih metala, koje zasad nisu standardizovane. Sem standardne oznake elektroda treba imati u vidu i oznake proizvođača (npr. PIVA 150 B za debelo obloženu bazu elektrodu, namenjenu zavarivanju ugljeničnih i niskolegiranih čelika čvrstoće do 510 MPa i sitnozrnih čelika napona tečenja do 380 MPa, označenu po JUS C.H3.011 kao E 515 B 120 262H). Pregled oznaka, sastava, mehaničkih svojstava, osnovnih karakteristika i primene obloženih elektroda FEP - PIVA je dat u dodatku A, tab. A1-3.

Tablica 5.5. Standardi za obložene elektrode

Oznaka standarda	Namena
JUS C.H3.011	niskougljenični i niskolegirani čelici i čelični liv
JUS C.H3.015	čelici otporni na puzanje
JUS C.H3.017	nerđajući i visokolegirani čelici
JUS C.H3.016	livena gvožđa (sivi liv, nodularni liv i temper liv)
JUS C.H3.019	navarivanje čelika

5.4.2.2. Tehnološke karakteristike elektroda

Pod tehnološkim karakteristikama elektrode se podrazumevaju **konstanta topljenja**, **brzina topljenja** i **koeficijent iskorišćenja**, definisani po JUS C.T3.020. Konstanta topljenja elektrode, K_e , je masa istopljenog metala elektrode, M_e (g), u jedinici vremena, t_z (s), i po jedinici jačine struje zavarivanja, I_z (A):

$$K_e = \frac{M_e}{I_z \cdot t_z} \text{ (g/A}\cdot\text{s)} \quad (5.5)$$

Konstanta topljenja zavisi od vrste i sastava jezgra i obloge elektrode, i vrste i polariteta struje. Brzina topljenja elektrode, v_e , je masa istopljenog metala elektrode, M_e (g), u jedinici vremena zavarivanja, t_z (s):

$$v_e = \frac{M_e}{t_z} \text{ (g/s)} \quad (5.6)$$

Brzina topljenja zavisi od vrste i prečnika elektrode i jačine struje zavarivanja. Na osnovu jed. 5.5 i 5.6 očigledno je da važi relacija:

$$v_e = K_e \cdot I_z \quad (5.7)$$

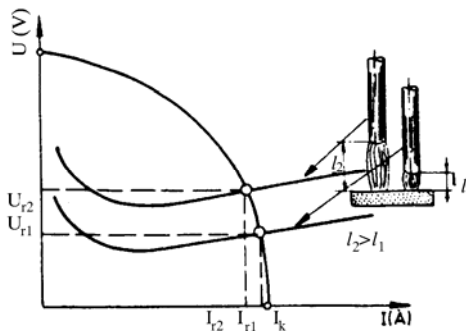
Koeficijent iskorišćenja elektrode, R (%), je količnik mase istopljenog metala elektrode, M_e , i mase stvarno utrošenog metalnog jezgra, M_j , izražen u procentima:

$$R = \frac{M_e}{M_j} \cdot 100\% \text{ (-)} \quad (5.8)$$

Koeficijent iskorišćenja kod običnih elektroda dostiže najviše 90%, zbog gubitaka usled sagorevanja i rasprskavanja jezgra elektrode. Kod specijalnih, visokoproduktivnih elektroda, koeficijent iskorišćenja može da bude veći od 100% usled prisustva fero-praha u oblozi elektrode, koji posle topljenja prelazi u metal šava.

5.4.2. Vrste i izvori struje, uređaji i oprema za E postupak

Uređaj za E postupak se sastoji od izvora struje, dovodnih i odvodnih kablova, držača elektrode, stezaljke za masu, a u dodatnu opremu spadaju zaštitna odeća i maska zavarivača i njegov ručni alat. Za E postupak koriste se obe vrste struje, jednosmerna i naizmenična, pri čemu izbor prvenstveno zavisi od vrste obloge i obično je preporučen od strane proizvođača elektrode. U svakom slučaju koristi se izvor sa strmopadajućom statičkom karakteristikom, koji obezbeđuje malu promenu jačine struje pri slučajnoj promeni dužine luka, koja je neminovna kod ručnog zavarivanja. Na sl. 5.17 je pokazano kako se menja jačina struje (I_{r1} i I_{r2}) i napon (U_{r1} i U_{r2}) pri povećanju dužine luka (l_1 na l_2). Kao što se vidi sa sl. 5.18, promena napona je značajna, dok je promena jačine struje mala. Kako promena napona ne utiče bitno na ostale parametre zavarivanja, strmopadajućom karakteristikom je obezbeđeno dovoljno kvalitetno zavarivanje, jer se parametri procesa, koji najviše zavise od jačine struje, održavaju u uskim granicama.

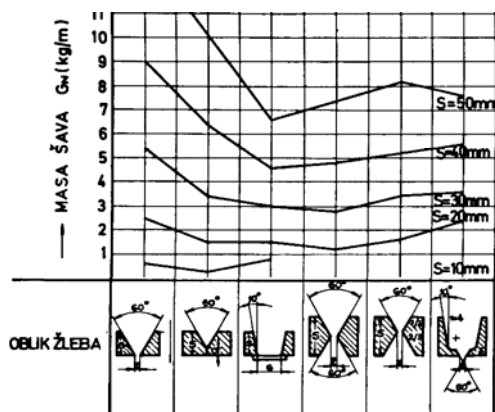


Slika 5.18. Promena radne tačke kod strmopadajuće karakteristike

Zaštitna odeća i maska zavarivača, kao i druge mere zaštite su bitne kod svih elektrolučnih postupaka zavarivanja, a posebno kod E postupka. Opasnosti pri elektrolučnom zavarivanju su udar struje, prejaka svetlost, zagađena atmosfera i prskanje troske i metala. Da bi se sprečili udari struje uređaj mora da bude atestiran, uz strogu periodičnu proveru zaštitne izolacije i uzemljenja. Zaštitna odeća se sastoji od specijalnog radnog odela, kecelje, rukavica, potkolenice i nadlaktice, a najvažniju ulogu ima zaštitna maska, bez koje električni luk ne sme da se gleda.

5.4.3. Tehnologija zavarivanja

Tehnologija zavarivanja obuhvata pripremu osnovnog materijala, izbor elektrode, izbor parametara i tehniku zavarivanja. U pripremi osnovnog materijala najvažnije je oblikovanje žleba, a ponekad je potrebno i čišćenje okolnih površina do metalnog sjaja. Pri izboru oblika i dimenzija žleba, osim o debljini osnovnog materijala, treba da se vodi računa o pristupačnosti korenu, sprečavanju pojave prokapljina, deformacijama zavarenog spoja i što manjem utrošku dodatnog materijala. Uticaj oblika žleba na masu šava je prikazan na sl. 5.19, gde se vidi da ne postoji jedinstveno rešenje za najmanju masu šava, već se za različite debljine osnovnog materijala najmanja masa šava dobija različitim oblicima žleba. Rešenje sa najmanjom masom šava je po pravilu i rešenje sa najmanjom deformacijom zavarenog spoja, jer se unosi najmanje toplote. Pristupačnost korenu i sprečavanje pojave prokapljina zahtevaju suprotne mere: u prvom slučaju razmak u korenu treba da bude što veći, a u drugom slučaju što manji.



Slika 5.19. Uticaj oblika žleba na masu šava

Rubni šav (tab. 1.2, prvi red) je pogodan samo za limove tanje od 2 mm i priprema se savijanjem i stezanjem ivica, "I" žleb je pogodan za limove debljine od 3 do 5 mm i priprema se ravnim odsecanjem ivica, a "V" žleb je pogodan za limove debljine od 3 do 20 mm i priprema se zakošenjem ivica, najčešće pod uglom 60° . Razmak u korenu treba da bude što veći da bi se omogućio pristup elektrodi, ali je ograničen zahtevom za minimalnom potrošnjom dodatnog metala i što manjim deformacijama zavarenog spoja. Za predmete većih debljina koristi se "Y" žleb, tj. "V" žleb sa zatupljenjem u korenu, čime se smanjuje opasnost od prokapljina. S druge strane, ovakvim oblikom žleba se povećava opasnost od uključaka troske u metalu šava, pa se po pravilu "Y" žleb radi dvostrano, tako što se koren izlebi, pa ponovo zavari sa druge strane. Takođe, za predmete većih debljina se koristi "X" žleb, tj. dvostrani "V" žleb, čime se smanjuju deformacije, posebno ugaone, koje se inače javljaju kod debljih i dužih limova sa "V" žlebom. Osim toga, površina "X" žleba je bitno manja od odgovarajućeg "V" žleba, pa su uštede dodatnog metala značajne. Osnovne preporuke za izbor oblika i dimenzija žlebova su date u tab. 1.2, zajedno sa preporukama o primeni podložne pločice i/ili žlebljenju korenog zavarava.

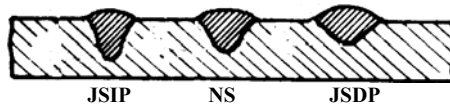
Prečnik i vrste obloge elektroda se biraju prema osnovnom metalu i specifičnim zahtevima konkretnog problema zavarivanja. Prečnici elektroda su standardizovani prema sledećem nizu: 2; 2,5; 3,25; 4; 5; 6; 8 i 10 mm, a biraju se tako da se uzima najveći prečnik koji veličina žleba dozvoljava. U slučaju višeprolaznog zavarivanja, za koren šava se koriste elektrode prečnika 2,5÷4 mm, a za popunu žleba se koriste elektrode većeg prečnika, zavisno od debljine osnovnog materijala. Osim osnovnih preporuka za izbor prečnika elektrode, treba uzeti u obzir vrstu struje, položaj i redosled zavarivanja.

Položaj zavarivanja značajno utiče i na izbor obloge elektrode. Za prinudne položaje se uglavnom biraju elektrode sa tankom oblogom ili oblogom srednje debljine, a da bi se sprečilo curenje tečnog metala šava koriste se rutilne ili celulozne obloge. Osnovne smernice pri izboru obloge elektrode su sledeće:

- Ugljenični i niskolegirani čelici: čvrstoća metala šava treba da bude ista ili veća nego kod osnovnog metala. Ako se traži posebno dobra žilavost koristi se bazna obloga, kao i u slučaju većih debljina i krutosti konstrukcija.
- Kombinacija ugljeničnih i niskolegiranih čelika: kod sučeonih spojeva elektroda se bira prema čeliku manje čvrstoće, a kod ugaonih prema čeliku veće čvrstoće.
- Visokolegirani čelici: metal šava treba da ima čvrstoću bar kao osnovni metal.
- Obojeni metal i legure: elektroda se bira prema osnovnom materijalu jer po pravilu ne postoje različite elektrode za jedan materijal.

Pri izboru parametara treba imati u vidu prvenstveno vrstu, polaritet, jačinu i napon struje, dužinu električnog luka, ugao nagiba i pravac kretanja elektrode i brzinu zavarivanja.

Vrsta struje se bira u zavisnosti od vrste obloge elektrode. Za kisele, rutilne i oksidne obloge najčešće mogu da se koriste naizmenična ili jednosmerna struja direktne polarnosti (JSDP), dok se kod baznih, po pravilu, koristi jednosmerna struja indirektno polarnosti (JSIP). Zavisnost oblika šava od vrste struje prikazana je na sl. 5.20, gde se vidi da je dubina uvarivanja najveća za JSIP, a najmanja za JSDP, uticaj na nadvišenje je obrnut, a na širinu šava zanemarljiv. Pogrešan izbor vrste i polariteta struje dovodi do grešaka tipa poroznosti, nestabilnog električnog luka i većeg razbrzgavanja dodatnog metala tokom zavarivanja.



Slika 5.20. Zavisnost oblika šava od vrste i polariteta struje

Jačina struje značajno utiče na oblik šava i mehaničke osobine spoja. Pri povećanju jačine struje nadvišenje i dubina uvarivanja se povećavaju, dok je širina šava praktično nepromenjena, sl. 5.21. Suviše velika jačina struja daje grubozrnu strukturu metala šava i povećava sagorevanje legirajućih elemenata, a nedovoljna jačina struja malu dubinu uvarivanja i slabu vezu šava i osnovnog metala. U oba slučaju česta je pojava troske u očvrslom metalu šava, kao posledica turbulencije rastopa i njenog povlačenja u dubinu kod suviše jake struje, odnosno lepljenja za stranice žleba kod suviše slabe struje. Stoga je pravilan izbor jačine struje od presudnog značaja za dobijanje kvalitetnog spoja. Kao osnovna smernica za izbor jačine struje pri zavarivanju ugljeničnih i niskolegiranih čelika u horizontalnom položaju mogu da se koriste iskustveni izrazi:

$$I_z = (20 \div 25) \cdot d_e, d_e < 4 \text{ mm}; I_z = (35 \div 50) \cdot d_e, d_e = 4 \div 5 \text{ mm}; I_z = (15 + 6 \cdot d_e) \cdot d_e, d_e > 5 \text{ mm} \quad (5.9)$$

gde je d_e prečnik elektrode (mm), a I_z jačina struje (A). Pri zavarivanju u prinudnim položajima jačina struje se smanjuje do 20%, dok se za visokoproduktivne elektrode koristi jača struja.



Slika 5.21. Zavisnost oblika šava od jačine struje

Povećanjem prečnika elektrode povećava se odvođenje toplote i smanjuje gustina struje, što sužava šav i smanjuje dubinu uvarivanja, sl. 5.22.



Slika 5.22. Zavisnost oblika šava od prečnika elektrode

Povećanjem brzine zavarivanja smanjuje se količina rastopljenog dodatnog i osnovnog metala, što utiče na dimenzije šava tako da se širina šava smanjuje, dubina uvarivanja raste do neke vrednosti, pa onda opada, a nadvišenje prvo opada, pa raste, sl. 5.22. Nedovoljna brzina zavarivanja uslovljava greške tipa nalepljivanja i uključaka troske, a prebrzo zavarivanje daje preveliko nadvišenje šava.



Slika 5.23. Uticaj brzine zavarivanja na oblik šava

Napon luka, U_l (V), može da se odredi preko jačine struje I_z (A):

$$U_l = 20 + 0,04 \cdot I_z \quad (5.10)$$

Napon luka ima mali uticaj na oblik šava, posebno ako se ima u vidu mali raspon promene kod E postupka, 22-32 V. Povećanjem napona luka povećava se širina šava, a promene dubine uvarivanja i nadvišenja su neznatne.

Povećanjem dužine luka povećava se širina šava, a dubina uvarivanja i nadvišenje smanjuju, sl. 5.24. Suviše kratak luk "uranja" u rastop, povećavajući turbulenciju tečnog metala koji "beži" prema nezagrejanim površinama žleba, što daje loš kvalitet spoja sa greškama tipa nalepljivanja i uključaka troske. S druge strane, predugačak luk je nestabilan i rasprskava dodatni metal. Stoga je potrebno odrediti optimalnu dužinu luka, prema sledećim preporukama:

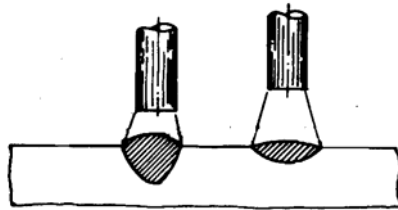
$$l = (0,9 \div 1,1) \cdot d_e \text{ (sučeoni spojevi ugljeničnih i niskolegiranih čelika)} \quad (5.11a)$$

$$l = (0,8 \div 0,9) \cdot d_e \text{ (ugaoni spojevi ugljeničnih i niskolegiranih čelika)} \quad (5.11b)$$

$$l = (0,8 \div 0,9) \cdot d_e \text{ (sučeoni spojevi visokolegiranih čelika)} \quad (5.11c)$$

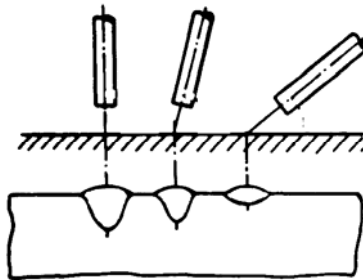
$$l = (0,7 \div 0,8) \cdot d_e \text{ (ugaoni spojevi visokolegiranih čelika)} \quad (5.11d)$$

Treba imati u vidu i uticaj vrste obloge na izbor dužine luka. Kod kiselih i rutilnih obloga preporučuje se dužina približno jednaka prečniku elektrode, a kod baznih obloga i kod elektroda od obojenih metala preporučuje se dvostruko manja dužina, uglavnom radi bolje zaštite metalne kupke.



Slika 5.24. Zavisnost oblika šava od dužine luka

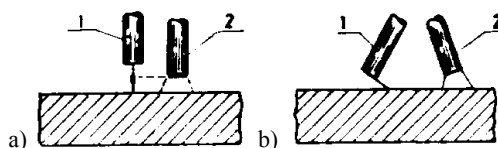
Nagib elektrode u ravni upravnoj na ravan predmeta koji se zavaruju utiče prvenstveno na dubinu uvarivanja, a u manjoj meri na širinu i nadvišenje šava. Najveća dubina se postiže pri uglu od 90° , odnosno kada je elektroda upravna na površinu zavarivanja, sl. 5.25. Izbor nagiba elektrode zavisi od osnovnog materijala, obloge elektrode, položaja zavarivanja i vrste spoja.



Slika 5.25. Uticaj nagiba elektrode na oblik šava

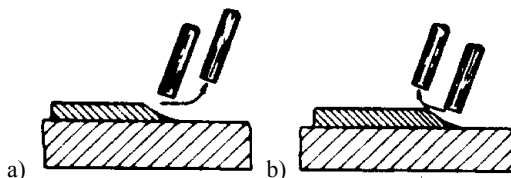
5.4.3.1. Tehnika zavarivanja

Uspostavljanje električnog luka je osim dodiranjem i odmicanjem (sl. 5.26a), moguće i povlačenjem vrha elektrode, uz prelazak na potrebno rastojanje (sl. 5.26b). Drugi način ima prednost, jer se luk uspostavlja bez oštećenja obloge, a dužina luka se reguliše povećanjem, a ne njegovim smanjenjem, što je daleko lakše.



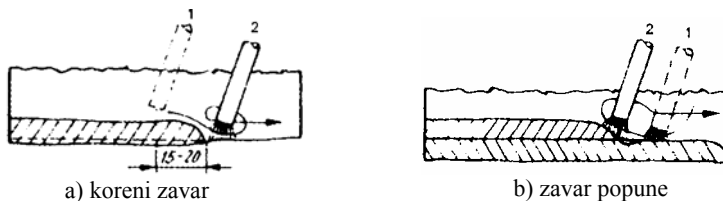
Slika 5.26. Uspostavljanje luka (a) primicanje-odmicanje (b) povlačenje

Prekidanje električnog luka je najbolje izvesti povlačenjem elektrode unazad (sl. 5.27b) na očvrslu trosku i udaljavanjem nakon toga. Pri direktnom podizanju elektrode (sl. 5.27a) može da nastane greška u šavu tipa poroznosti.



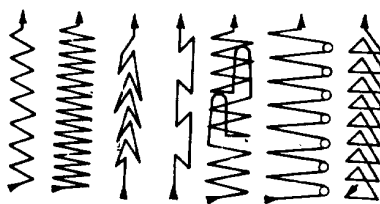
Slika 5.27. Prekidanje električnog luka a) nepravilno; b) pravilno

Posebnu pažnju treba posvetiti nastavku prekinutog šava, s obzirom na krater koji može pri prekidu da nastane na kraju zavara. Da bi se izbeglo popunjavanje kratera "na hladno", primenjuju se posebne tehnike, zavisno od vrste zavara (koreni ili popuna), kao što je u dve projekcije prikazano na sl. 5.28. U prvom slučaju (koreni zavar - sl. 5.28a), luk se uspostavlja na 15 do 20 mm od kraja zavara, na već izvedenom korenim zavaru, posle čega se prelazi u koren, radi popune žleba. U drugom slučaju (zavar popune - sl. 5.28b), luk se uspostavlja na donjem delu (prethodni zavar) ili na stranici žleba, zatim se vraća nazad na aktuelni zavar i tek onda se nastavlja sa daljom popunom žleba.



Slika 5.28. Nastavljanje zavarivanja

Često se kod izvođenja E postupka koristi tzv. njihanje elektrode, tj. popunjavanje žleba njenim poprečnim kretanjem (a ne samo podužnim), sl. 5.29.



Slika 5.29. Prikaz osnovnih načina njihanja elektrode