

Relativni pokazatelji cijene i stupnja mehaniziranosti postupaka zavarivanja

Postupak zavarivanja	Oznaka postupka	Indeks cijene uređaja	Stupanj mehanizacije R – ručni A – automatski PA – poluautomatski	Dodatni materijala (DM)
Ručno elektrolučno	REL	1	R	elektroda
Elektrolučno taljivom elektrodom u zaštiti aktivnog plina	MAG	1,5 - 5	PA, A	zaštitni plin (Ar ili He) + žica (DM)
Elektrolučno pod zaštitnim praškom	EP	10	PA, A	zaštitni prašak + žica
Elektrootporno pod troskom	EPT	> 20	A	troska + žica
Elektrolučno netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina	TIG	> 2		zaštitni plin (Ar ili He) sa ili bez žice (DM)
Elektrolučno netaljivom elektrodom u (impulsno) u zaštiti inertnog plina	TIG	6 - 10	A	zaštitni plin (Ar ili He) sa ili bez žice (DM)
Elektrolučno taljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina	MIG	1,5 - 5	PA, A	zaštitni plin (Ar ili He) + žica (DM)
Elektrootporno točkasto	EOT	1,5 - 15	R, A	Bez DM
Elektrootporno šavno	EOŠ	0,5 – 10	R, A	Bez DM
Elektrootporno sučeono	EOS	0,5 – 10	PA, A	Bez DM
Elektrootporno bradavičasto	EOB	1,5 – 15	PA, A	Bez DM
Elektrootporno iskrenjem	EOI	4 - 50	PA, A	Bez DM
Elektrootporno tupo	EOT	4 - 50	PA, A	Bez DM
Plinsko zavarivanje	PZ	> 0,2	R, A	Gorivi plin i kisik bez ili sa žicom (DM)
Aluminotermijsko	ATZ	> 0,2	R, A	Termit ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_3\text{O}_4$)
Mikroplazma	MPZ	> 2	R, A	Plazmeni plin obično bez žice (DM)
Elektronskim mlazom (snopom)	EMZ	10 – 50	A	Bez DM
Difuzijsko	DZ	> 10	A	Bez DM

Orijentacijska primjena postupaka zavarivanja s obzirom na debljinu materijala koji se zavaruje

Postupak zavarivanja	Debljina materijala, mm
Ultrazvučno	Do 1
Mikroplazma	0,25 – 2
Laser, 2kW	Do 3
Elektrootporno točkasto i šavno	0,25 – 5
Plazmom	0,5 – 8
Plinsko ($\text{C}_2\text{H}_2 + \text{O}_2$)	0,5 – 4 (4 – 8)
Laserom (do 20 kW)	0,15 - 15
MIG (kratki luk)	0,5 – 4 (4 – 15)
MIG (normalni luk)	2 – 8 (8 – 50)
Elektronskim mlazom (do 5 kW)	Do 30
Elektronskim mlazom (do 25 kW)	1 do 75
Elektronskim mlazom (do 72 kW)	5 do 300
TIG	Do 4 (4 – 10)
MAG	Do 3 (3 – 50)
REL	2 – 5 (5 – 150)
EPT	25 - 450
EP	2 – 25 (25 – 300)
Aluminotermijsko	> 10

Napomena: vrijednosti u zagradi odnose se na debljinu materijala koja se zavaruje u više prolaza.

Označavanje postupaka zavarivanja po ISO EN

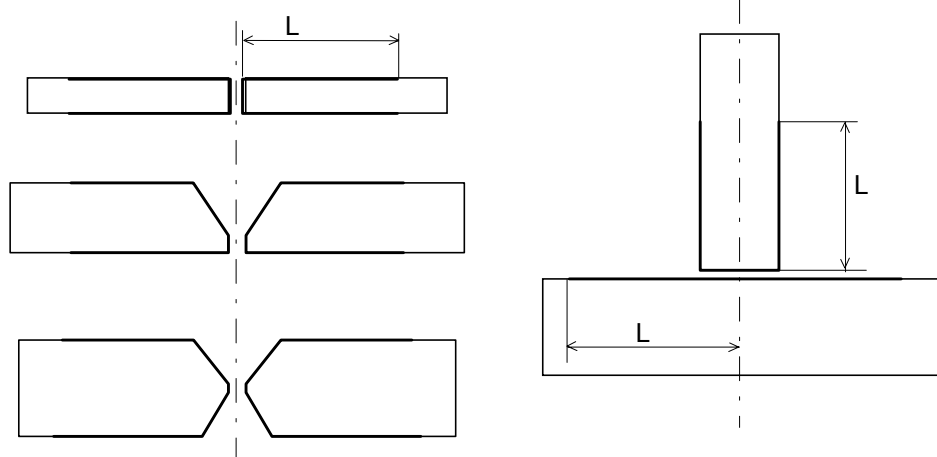
- 111 ... REL zavarivanje
- 12 ... EP zavarivanje
- 121 ... EP zavarivanje sa dodatnom žicom
- 21 ... Elektrootporno točkasto zavarivanje
- 22 ... Elektrootporno šavno zavarivanje

Klasifikacija postupaka zavarivanja prema vrsti energije za zavarivanje

KEMIJSKA	Gorivo u čvrstom stanju	Kovačka vatra		Kovačko
		Eksploziv		Eksplozijom
		Egzotermna termitna reakcija		Aluminotermijsko (taljenjem i pritiskom)
	Gorivo u plinovitom stanju	Izgaranje gorivog plina (napr. acetilen)		Plinsk zavarivanje (taljenjem i pritiskom)
ELEKTRIČNA	Istosmjerna (Direct Current - DC) ili izmjenična (Alternating Current - AC) električna struja	Električni luk		REL, EPP, TIG, MIG, MAG, gravitacijsko, kontaktno, EHV, Elektrolinsko, Circomatic, Elektrolučno zavarivanje svornjaka, Zavarivanje MP, ...
		Električni otpor (Joule-ova toplina)	Rastaljenog materijala	Zavarivanje pod troskom
			Čvrstog materijala	Elektrootporno: točkasto, šavno (kolutno), bradavičasto, tupo, iskrenjem Visokofrekventno: indukcijsko, kontaktno
		Elektronskim mlazom (snopom) u vakuumu ili djelomičnom vakuumu		Zavarivanjeelektronskim mlazom (snopom)
		Svjetlosne zrake		Zavarivanje laserom (krutim, plinovitim)
MEHANIČKA	Mehanički rad kao posljedica djelovanja sile na određenu površinu, trenje, vibracije	Unutrašnje trenje		Kovačko, hladno, difuzijsko
		Površinsko trenje		Zavarivanje trenjem
		Mehaničke vibracije		Zavarivanje ultrazvukom (točkasto, šavno ili kolutno)
OSTALE	Solarna	Sunčeva svjetlost		Postupci u razvoju
	Elektromagnetsko zračenje	Zračenje energije volframskog vlakna u inertnom plinu		
	Zračenje	Halogeno kvarcne lampe		

Pregled eksperimentalnih proba za procjenu zavarljivosti

Kriterij		Vrsta probe	Naziv probe	Kriterij ocjenjivanja
SKLONOST PREMA PUKOTINAMA U IZRADI	Hladnim (cold cracks)	ukrućene	Tekken, CTS, križna, Fisco, kružna	Kvalitativna (ima ili nema pukotina) ili kvantitativna (kod kojeg naprezanja dolazi do pukotina) ovisno o mogućnosti reguliranja i registriranja promjene naprezanja
		sa reguliranim naprezanjem	Implant, TRC, RRC, LTP	
		simulacijom toplinskog ciklusa zavarivanja	BWRA i simulacije zavarivanja elektrootpornim zagrijavanjem ili zagrijavanjem visokofrekventnom strujom ili (Smitweld, Gleeble, Thermorestor)	
	Toplim (hot cracks)	ukrućene	Tekken, Fisco, kružna	
		sa reguliranim naprezanjem	Varestraint, Transvarestraint, Baumann	
	Lamelarnim (lamellar tearing)	metalografska, strukturna, mehanička	Ispitivanja zatezanjem u pravcu debljine lima (Window metoda, Z metoda po IIW, Križna proba u krutom ramu, Cranfield proba, Det Norske Veritas proba, Lehig proba)	
Zbog naknadnog zagrijavanja i naknadne toplinske obrade (NTO), navarivanja platiranog sloja	simulacija naknadnog zagrijavanja, metalografska i mehanička ispitivanja	BWRA proba, simulacije toplinskog ciklusa zavarivanja (Smitweld, Gleeble, Thermorestor), modificirana implant metoda (naprezanje + simulacija brzog zagrijavanja do temperature NTO)		
MEHANIČAK SVOJSTVA	Mjerenja tvrdoće		HV 1, HV5, HV 10	HV < HV max
	Ispitivanje zatezanjem		Granica razvlačenja (naprezanje tečenja), vlačna i prekidna čvrstoća, kontrakcija (Z), izduženje (A5 ili A10)	Rt, Rm, Rp, Z, A5, A10,
	Ispitivanje savijanjem		Radius savijanja	R30
	Ispitivanje žilavosti		Ispitivanje žilavosti po Charpy-u ili ispitivanja mehanike loma	Kv, CTOD, KI, JI, ...
	Specijalna ispitivanja		Ispitivanja sklonosti koroziji uz naprezanje, interkristalnoj koroziji, pitting-u, selektivnoj koroziji, koroziji u zazoru, abraziji, eroziji, kavitaciji, ...	Kvalitativna ocjena (ima ili nema pukotina) pod određenim uvjetima ispitivanja
Ostalo: puzanje, dinamička nosivost - umaranje, starenje, ...				



Površine koje treba čistiti na duljini L prije elektrolučnog zavarivanja

Ručno elektrolučno zavarivanje (REL)

Princip: Električni luk se uspostavlja kratkim spojem – kresanjem između elektrode i radnog komada, tj. priključaka na polove električne struje (istosmjerne – Direct Current ili izmjenične – Alternating Current). Nakon toga sljedi ravnomjerno dodavanje elektrode u električni luk od strane zavarivača, te taljenje elektrode i formiranje zavarenog spoja.

Primjena: REL postupak ima široke mogućnosti primjene: kod proizvodnih zavarivanja, navarivanja i reparaturnog zavarivanja većine metalnih materijala. Ipak zbog ekonomičnosti (male brzine zavarivanja i orijentacijski 1,5 do 2 kg/depozita na sat) se primjenjuje za izvođenje kraćih zavora, obično debljine ne iznad 15 mm (20 mm) kod sučeonih zavarenih spojeva, te kraćih kutnih spojeva manje debljine zavora (gdje se obično ne traži pojačana penetracija u korijenu zavora).

Parametri: Glavni parametri kod REL zavarivanja su:

- napon zavarivanja (U), koji se tijekom zavarivanja orijentacijski kreće od 18 do 26 V;
- jakost struje zavarivanja (I), koja se pri zavarivanju kreće ovisno o promjeru elektrode (orijentacijske vrijednosti $40 \cdot \phi$ elektrode, A)
- brzina zavarivanja (v), koja se kreće ovisno o primjenjenoj tehnici zavarivanja (povlačenje ili njihanje elektrode), promjeru elektrode i parametrima zavarivanja orijentacijski od 1,5 do 2,5 mm/s.

Napon praznog hoda je najčešće 60 V. Stupanj iskorištenja energije za taljenje 0,75 – 0,85.

Prednosti:

- razvijen širok spektar dodatnih materijala za zavarivanje,
- manja cijena opreme za zavarivanje (uređaja za zavarivanje) u odnosu na MAG i EP postupak zavarivanja,
- pogodan za manja proizvodna i reparaturna zavarivanja,
- mogućnost zavarivanja u svim položajima zavarivanja,
- pogodan za rad na terenu, naročito tamo gdje nema električne energije (moguća primjena agregata),
- vrlo jednostavno rukovanje opremom,
- dobra mehanička svojstva zavora,

Nedostaci:

- mala brzina zavarivanja i niska produktivnost u odnosu na MAG i EP,
- kvaliteta zavora značajno ovisi o vještini zavarivača - čovjeka,
- vrijeme za izobrazbu dobrog zavarivača je dugo,
- neizbježan je otpad elektrode – «čik» (8-10%), te gubitak materijala zbog prskanja u okolinu,
- teže čišćenje troske nakon zavarivanja i gubitak vremena zbog čišćenja troske,
- dolazi do jakog bljeskanja pri zavarivanju, razvijaju se štetni plinovi (potrebna dobra ventilacija prostora),
- dugotrajni rad može ostaviti štetne posljedice na zdravlju zavarivača (reuma, oštećenja dišnog sustava...)

Elektrolučno zavarivanja pod zaštitnim praškom (EP)

Princip: Električni se luk uspostavlja pomoću visokofrekventnog generatora (VF generator) koji se uključuje samo u djeliću sekunde, neposredno pred zavarivanje. Nakon uspostavljanja električnog luka, VG generator se isključuje, žica za zavarivanje kontinuirano dolazi u električni luk, tali se i sudjeluje u formiranju zavarenog spoja. Proces se odvija pod zaštitnim praškom. To je automatski postupak zavarivanja.

Primjena: EP postupak se koristi za zavarivanje i navarivanje gdje se traži velika količina deponiranog materijala (zavara) ili kod velikoserijske proizvodnje (napr. kružni zavareni spojevi na propan/butan bocama za domaćinstvo). Zavarivanje se izvodi u horizontalnom položaju (iznimka Circomatic postupak – zavarivanje kružnih zavarenih spojeva na cilindričnim posudama pod tlakom u zidnom položaju). Značajna je primjena ovog postupka kod zavarivanja debelostjenih posuda pod tlakom, te debelostjenih limova (napr. postolja lokomotiva, sekcije mostova),

Parametri: Glavni parametri kod EP postupka zavarivanja su:

- napon zavarivanja (U), koji se tijekom zavarivanja orijentacijski kreće od 26 do 40 V;
- jakost struje zavarivanja (I), koja se pri zavarivanju kreće ovisno o promjeru elektrode (od 100 A do 1000 A; prema nekim literaturnim podacima i do 5000 A). Zbog manje duljine slobodnog kraja žice moguće je iste promjere žice za zavarivanja opteretiti puno većim strujama nego kod REL postupka (gdje je duljina slobodnog kraja praktično duljina elektrode koja se koristi za zavarivanje).
- brzina zavarivanja (v), je značajno veća u odnosu na REL i MAG postupak (orijentacijske vrijednosti 200 do 600 mm/min).

Napon praznog hoda je 100 V (veći nego kod REL postupka iz razloga što se kod EP postupka teže uspostavlja električni luk).

Prednosti:

- velike brzine zavarivanja i daleko veća produktivnost u odnosu na REL i MAG postupak zavarivanja,
- budući da se radi o automatskom postupku zavarivanja, kvaliteta ne ovisi o čvjeku – operateru (jednom uspostavljeni parametri zavarivanja daju konstantnu kvalitetu zavarenih spojeva),
- visok stupanj iskorištenja energije za taljenje (0,9 - 0,95),
- kvalitetan estetski izgled zavara,
- nema otpada žice (»čik-a«), te gubitaka zbog prskanja kapljica u okolinu,
- lako čišćenje troske i mogućnost recikliranja troske,
- vrijeme za izobrazbu operatera je puno kraće od izobrazbe dobrog zavarivača za REL,

Nedostaci:

- veća cijena opreme za zavarivanje (uređaja za zavarivanje) u odnosu na MAG i REL postupak zavarivanja,
- slabija mehanička svojstva zavarenog spoja u odnosu na REL i MAG zavarivanje (brže hlađenje veće količine deponiranog materijala),
- mala brzina zavarivanja i niska produktivnost u odnosu na MAG i REL,
- nema vizualnog nadzora električnog luka tijekom zavarivanja (velike jakosti struje daju svjetlost velike intenzivnosti pa u obzir dolazi nadzor X-zrakama i video kamerama),
- u tehnološkoj liniji koja koristi EP automate obično je potrebna dodatna mehanizacija (okretaljke, okretno-nagibni stolovi, pozicioneri, konzole, ...),

Elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti aktivnog plina (MAG)

Princip: Električni luk se uspostavlja kratkim spojem – kresanjem između žice za zavarivanje i radnog komada, tj. priključaka na polove električne struje (istosmjerne – Direct Current). Nakon toga slijedi ravnomjerno dodavanje žice za zavarivanje u električni luk (elektromotor, valjci za ravnanje i povlačenje ili potiskivanje žice), te taljenje žice i formiranje zavarenog spoja.

Primjena: MAG postupak ima široke mogućnosti primjene: kod proizvodnih zavarivanja, navarivanja i reparaturnog zavarivanja većine metalnih materijala. Ima prednost pred REL zavarivanjem sa stajališta ekonomičnosti (više kg/depozita na sat, veća intermitencija pogona – nema zastoja za izmjenu elektroda kao kod REL postupka, manje čišćenje zavara). Primjenjuje se za zavarivanje limova i cijevi debljine od 1 mm obično do debljine 20 mm (u nekim slučajevima i daleko iznad tih debljina, kada je ekonomski i tehnološki opravdana primjena MAG postupka. Kod većih debljina osnovnog materijala i veće duljine zavararenih spojeva ekonomičnije je koristiti EP postupak (samostalno ili u kombinaciji sa MAG ili REL postupkom, napr. za provarivanje korijena). MAG postupak je izvorno poluautomatski postupak, ali se vrlo često koristi kao automatski i robotizirani postupak zavarivanja. Značajan je udio robota za MAG zavarivanje u automobilske industriji.

Parametri: Glavni parametri kod MAG zavarivanja su:

- napon zavarivanja (U), koji se tijekom zavarivanja orijentacijski kreće od 16 do 26 V;
- jakost struje zavarivanja (I), koja se pri zavarivanju kreće ovisno o promjeru žice za zavarivanje (orijentacijske vrijednosti 80 do 180, A)
- brzina zavarivanja (v), koja se kreće ovisno o primjenjenoj tehnici zavarivanja (povlačenje ili njihanje), promjeru žice za zavarivanje i parametrima zavarivanja orijentacijski od 2 do 4 mm/s.

Napon praznog hoda je najčešće 60 V. Stupanj iskorištenja energije za taljenje 0,75 – 0,85.

Napomena: Postoji moderna varijanta MAG postupka tzv. TIME postupak gdje su vrijednosti napona, struje i brzine zavarivanja (ali i promjera žice za zavarivanje) značajno veće u odnosu na klasični MAG. Tako su napr. za žicu promjera 2,5 mm registrirane srednje vrijednosti parametara zavarivanja: $U = 40 \text{ V}$, $I = 420 \text{ A}$.

Prednosti:

- razvijen dovoljno širok spektar dodatnih materijala za zavarivanje,
- manja cijena opreme za zavarivanje (uređaja za zavarivanje) u odnosu na EP postupak zavarivanja (ali ipak nešto veća u odnosu na REL),
- pogodan za pojedinačnu i masovnu proizvodnju, te reparaturna zavarivanja,
- mogućnost zavarivanja u svim položajima zavarivanja,
- manji gubici vremena zavarivača (nema izmjene elektrode kao kod REL zavarivanja, manje čišćenje zavara),
- pogodan za automatizaciju i robotizaciju,
- kvalitetan zavar i dobra mehanička svojstva zavara,

Nedostaci:

- kvaliteta zavara još uvijek ovisi o vještini zavarivača – čovjeka kod poluautomatskog zavarivanja (ali ipak ne toliko kao kod REL zavarivanja),
- vrijeme za izobrazbu dobrog zavarivača je kraće nego kod REL zavarivanja (mada je praksa da MAG zavarivači prvo nauče REL postupak zavarivanja),
- dolazi do jakog bljeskanja pri zavarivanju, pri zavarivanju se oslobađaju plinovi (potrebna dobra ventilacija prostora),
- dugotrajni rad može ostaviti štetne posljedice na zdravlju zavarivača (reuma, oštećenja dišnog sustava...)

Elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti inertnog plina (MIG)

Princip: Električni luk se uspostavlja kratkim spojem – kresanjem između žice za zavarivanje i radnog komada, tj. priključaka na polove električne struje (istosmjerne – Direct Current ili izmjenične – Alternating Current). Nakon toga sljedi ravnomjerno dodavanje žice za zavarivanje u električni luk (elektromotor, valjci za ravnanje i povlačenje ili potiskivanje žice), te taljenje žice i formiranje zavarenog spoja.

Primjena: MIG postupak ima široke mogućnosti primjene: kod proizvodnih zavarivanja, navarivanja i reparaturnog zavarivanja aluminijskih legura i drugih nerđajućih materijala i legura. On se uglavnom uspoređuje sa TIG postupkom. Ima prednost pred TIG zavarivanjem sa stajališta ekonomičnosti (više kg/depozita na sat). Primjenjuje se za zavarivanje limova i cijevi debljine od 1 mm obično do debljine 20 mm (u nekim slučajevima i daleko iznad tih debljina, kada je ekonomski i tehnološki opravdana primjena MIG postupka. MIG postupak je izvorno poluautomatski postupak, ali se vrlo često koristi kao automatski i robotizirani postupak zavarivanja.

Parametri: Glavni parametri kod MIG zavarivanja su:

- napon zavarivanja (U), koji se tijekom zavarivanja orijentacijski kreće od 16 do 26 V;
- jakost struje zavarivanja (I), koja se pri zavarivanju kreće ovisno o promjeru žice za zavarivanje (orijentacijske vrijednosti 80 do 180, A)
- brzina zavarivanja (v), koja se kreće ovisno o primjenjenoj tehnici zavarivanja (povlačenje ili njihanje), promjeru žice za zavarivanje i parametrima zavarivanja orijentacijski od 2 do 4 mm/s.

Napon praznog hoda je najčešće 60 V. Stupanj iskorištenja energije za taljenje 0,75 – 0,85.

Prednosti:

- razvijen dovoljno širok spektar dodatnih materijala za zavarivanje,
- manja cijena opreme za zavarivanje (uređaja za zavarivanje) u odnosu na TIG postupak zavarivanja,
- pogodan za pojedinačnu i masovnu proizvodnju, te reparaturna zavarivanja,
- mogućnost zavarivanja u svim položajima zavarivanja,
- pogodan za automatizaciju i robotizaciju,
- daleko veća učinkovitost (kg depozita/h) u odnosu na TIG zavarivanje.

Nedostaci:

- kvaliteta zvara još uvijek ovisi o vještini zavarivača – čovjeka kod poluautomatskog Zavarivanja,
- vrijeme za izobrazbu dobrog zavarivača je kraće nego kod TIG zavarivanja (mada je praksa da MIG zavarivači prvo nauče REL postupak zavarivanja),
- kvaliteta zavarenog spoja je slabija u odnosu na kvalitetu TIG zavarenih spojeva (kako sa estetskog stajališta, tako i sa stajališta grešaka u zavarenom spoju i mehaničkih svojstava zavarenog spoja),
- dolazi do jakog bljeskanja pri zavarivanju, pri zavarivanju se oslobađaju plinovi (potrebna dobra ventilacija prostora),
- dugotrajni rad može ostaviti štetne posljedice na zdravlju zavarivača (reuma, oštećenja dišnog sustava...)

Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina (TIG)

Princip: Električni luk se uspostavlja pomoću visokofrekventnog generatora (VF generator) koji se uključuje samo u djeliću sekunde, neposredno pred zavarivanje. Nakon uspostavljanja električnog luka između netaljive volframove elektrode i radnog komada, tj. priključaka na polove električne struje (istosmjerne – Direct Current ili izmjenične – Alternating Current), VF generator se isključuje, a proces zavarivanja se odvija sa ili bez dodavanja dodatnog materijala (žice) u električni luk. Nakon toga sljedi taljenje ivica žlijeba za zavarivanje (kod materijala manje debljine – I spoj), odnosno ravnomjerno ručno dodavanje žice za zavarivanje u električni luk, te taljenje žice i formiranje zavarenog spoja (kod debljih materijala ili kod provarivanja korijena debelih materijala).

Primjena: TIG postupak se također široko primjenjuje: kod proizvodnih zavarivanja, navarivanja i reparaturnog zavarivanja aluminijskih legura i drugih nerđajućih materijala i legura. On se uglavnom uspoređuje sa MIG i plazma postupkom zavarivanja. Primjenjuje se za zavarivanje limova i cijevi debljine do debljine 6 mm. TIG postupak je izvorno ručni postupak. Koristi se i kao automatski i robotizirani postupak zavarivanja, ali je primjena tih uređaja kompleksnija i skuplja nego.

Parametri: Glavni parametri kod TIG zavarivanja su:

- napon zavarivanja (U), koji se tijekom zavarivanja orijentacijski kreće od do V;
- jakost struje zavarivanja (I), koja se pri zavarivanju kreće ovisno o vrsti i debljini materijala koji se zavaruje (orijentacijske vrijednosti do , A)
- brzina zavarivanja (v), koja se kreće ovisno o primjenjenoj tehnici zavarivanja, vrsti i debljini materijala koji se zavaruje, te parametrima zavarivanja (orijentacijski od do mm/s).

Stupanj iskorištenja energije za taljenje 0,20 – 0,65.

Prednosti: - Kvaliteta zavarenog spoja vrlo visoka (kako u pogledu broja grešaka u zavarenom spoju, tako i sa stajališta estetskog izgleda i mehaničkih svojstava zavara),
- pogodan za reparaturna zavarivanja,
- mogućnost zavarivanja u svim položajima zavarivanja,

Nedostaci: - Viša cijena opreme za zavarivanje (uređaja za zavarivanje) u odnosu na MIG postupak zavarivanja,
- kvaliteta zavara još uvijek ovisi o vještini zavarivača ,
- nije pogodan za automatizaciju i robotizaciju,
- vrijeme za izobrazbu dobrog zavarivača je dugo (mada je praksa da TIG zavarivači prvo nauče REL i MAG/MIG postupak zavarivanja),
- daleko manja učinkovitost (kg depozita/h) u odnosu na MIG i plazma zavarivanje.
- dolazi do jakog bljeskanja pri zavarivanju, pri zavarivanju se oslobađaju plinovi (potrebna dobra ventilacija prostora),
- dugotrajni rad može ostaviti štetne posljedice na zdravlju zavarivača (reuma, oštećenja dišnog sustava...)

Plinsko zavarivanje

Primjena: Plinski plamen se primjenjuje za zavarivanje, navarivanje, lemljenje, nabrizgavanje, ravnanje, rezanje, površinsko čišćenje i duge vrste površinske obrade materijala. Za zavarivanje se koristi acetilen (kao gorivi plin) i kisik (kao plin koji podržava gorenje).

Kisik:

Za zavarivanje i rezanje kisik se isporučuje u plavim bocama pod tlakom od 150 bar-a. Inače, kisika ima u zraku (21%), a ostatak je dušik (78%) i ostali plinovi (1%). Gorivi materijali oslobađaju veću količinu topline kada sagorjevaju u čistom kisiku, a ne na zraku. Kisik se dobiva frakcionom destilacijom zraka (rijeđe elektrolizom vode – skuplji postupak). Osnovni princip frakcione destilacije je da se zrak prvo pretvara u tekuće stanje (što se postiže tlačanjem na 40 bar-a i pothlađivanjem na – 200 °C). Ako se tekući zrak potom zagrije, isparit će dušik koji ključa pri –196 °C, tako da u aparaturi za frakcionu destilaciju ostaje samo kisik (koji ključa pri –183 °C). Specifična masa kisika pri temperaturi 20 °C i tlaku 1013 mb je 1,43 kg/ m³.

Orijentacijska količina kisika – volumen (V_{kisika} , m³) u boci računa se pomoću sljedeće formule:

$$V_{\text{kisika}} = \text{volumen boce} \cdot \text{tlak u boci (Pa)} \cdot \text{koeficijent stlačenja kisika pri temperaturi 15 °C}$$

Koeficijent stlačenja kisika pri temperaturi 15 °C je $1,078 \cdot 10^{-5}$. Volumen boce je 0,04 m³.

Tako na primjer u punoj boci ima kisika:

$$V_{\text{kisika}} = 0,04 \cdot 15 \cdot 10^{-6} \cdot 1,078 \cdot 10^{-5} = 6,468 \text{ m}^3.$$

Kada se prazni boca kisika, mora se ostaviti određena količina kisika u boci da se izbjegne prodor zraka i vlage u bocu (minimalno očitavanje na regulacijskom ventilu – manometru 0,5 bar-a). Kod rukovanja sa bocama za kisik treba paziti da su uvijek čiste (ne smije biti nečistoća i masti oko regulacijskog ventila), a otvaranje i zatvaranje boce mora biti pažljivo – najviše do pola okreta ventila za otvaranje i zatvaranje boce).

Acetilen:

Acetilen se isporučuje u bijelim bocama pod tlakom od 15 bar-a. Vrlo je nestabilan i eksplozivan u smjesi sa zrakom ili kisikom. Sa povećavanjem tlaka eksplozivnost acetilena raste, tako da je dovoljno 3% acetilena u smjesi sa zrakom da dođe do eksplozije. Isto tako pri zavarivanju ili rezanju bakra (Cu) ili srebra (Ag) dolazi do reakcije acetilena i spomenutih elemenata, te nastaju spojevi koji su eksplozivni pri udarcima ili povišenim temperaturama. Iz navedenih razloga potrebno je pridržavati se pravila koja vrijede za rukovanje sa bocama acetilena i kisika u proizvodnji, transportu i skladištenju. Acetilen je plin iz grupe nezasićenih ugljikovodika, bezbojan je i neotrovan plin karakterističnog mirisa. Otapa se u vodi u omjeru 1 : 1, a u acetonu 1 : 25 pri atmosferskom tlaku i temperaturi 20 °C. Rastvorljivost acetilena u acetonu raste sa porastom tlaka, a opada sa porastom temperature. U boci za acetilen koja je volumena 40 litara, pri tlaku od 15 bar-a i temperaturi 20 °C stane 6 m³ acetilena. Na izlazu iz boce postavlja se regulator tlaka (manometar) koji snižava tlak acetilena na vrijednosti ispod 1,5 bar-a (ako je na izlazu iz boce tlak acetilena prelazi 1,5 bar može doći do stvaranja mjehurića plina i spajanja sa zrakom, što može prouzročiti eksploziju plina). Približna količina plina u boci – volumen ($V_{\text{acetilena}}$, m³) može se odrediti pomoću sljedeće formule:

$$V_{\text{acetilena}} = 0,35 \cdot \text{volumen boce} \cdot \text{rastvorljivost acetilena u acetonu pri 15 °C} \cdot \text{tlaku u boci (Pa)} \cdot 10^{-5}$$

Koeficijent rastvorljivost acetilena u acetonu pri 15 °C je 23. Volumen boce je 0,04 m³.

Tako je na primjer sadržaj acetilena u punoj boci:

$$V_{\text{acetilena}} = 0,35 \cdot 0,004 \cdot 23 \cdot 15 \cdot 10^5 \cdot 10^{-5} = 4,8 \text{ m}^3$$

Pri pražnjenju boce brzina istjecanja acetilena, odnosno protok acetilena mora biti manje od 1 m³/h da ne bi došlo do isparavanja acetona iz boce i smrzavanja redukcionog ventila (manometra). Isto tako, boca se ne smije potpuno isprazniti, već se mora ostaviti određena količina acetilena koja odgovara tlaku na manometru 1 – 1,5 bar-a, ovisno o vanjskoj temperaturi.

Plinski plamen:

Plamen acetilena i kisika daje maksimalnu temperaturu od 3100 °C, dok plamen butana i propana sa kisikom daje maksimalnu temperaturu 2830, odnosno 2850 °C.

PLAZMA ZAVARIVANJE

Plazma zavarivanje se ponekad uspoređuje sa TIG zavarivanjem iz kojega je razvijeno. kod oba se postupka koristi netaljiva volfram elektroda, i relativno malo je unošenje topline. Kod zavarivanja plazmom volfram elektroda je upuštena u sapnicu. Plin pod tlakom izlazi kroz mali otvor na donjem dijelu sapnice. Oko tog mlaza vrućeg plazmenog plina postoji i drugi koncentrični omotač zaštitnog plina.

Postoje dvije vrste luka koji generira plazmu:

1. "preneseni luk" na radni komad i
2. nepreneseni luk

Kod prenesenog luka radni predmet je uključen u strujni krug. Kod neprenesenog luka luk gori između usta sapnice i vrha volfram elektrode. Plin pod tlakom zagrijan na visoke temperature-ioniziran, u stanju plazme, izlazi velikom brzinom kroz mali otvor na donjem dijelu sapnice. Izlazeći mlaz toplog plina je izvor energije za zavarivanje. Nepreneseni luk je podesan za zavarivanje i za rezanje (kada se plazma glava koristi za rezanje) predmeta koji nisu električki vodljivi. Kao plazmeni plin se koristi Ar, He i H, a za zaštitni plin se koristi također Ar, He i H ili mješavine zaštitnih plinova. Protok plazmenog plina se kreće od 1.0 - 32.0 l/min, a zaštitnog plina se kreće od 10 do 30 l/min.

Glave-gorionici za plazmu su složeniji od glava za TIG zavarivanje. Postoje odvojeni dovodi za glavni i zaštitni plin. U glavu se dovodi voda za hlađenje sapnice za plazmene plinove. Električni luk se pali pomoću generatora visoke frekvencije. Koriste se jačine struje 0.1 - 500 A. Elektroda je od čistog volframa ili legirana s torijem, cerom ili cirkonijem. Elektroda se najčešće spaja na negativni pol izvora struje. Pri radu s nižim jačinama struje, kada se zavaruju tanki limovi, oprema i postupak se naziva mikro plazma. Mogu se postići zavareni spojevi dobre kvalitete kao napr za: medicinske instrumente, kompenzatore, turbinske lopatice...Uvijek se primjenjuje pri zavarivanju zaštita korijena.

Moguće je i zavarivanje "pokretnom rupom" (keyhole), kada koncentrirana energija tvori malu rupu kroz debljinu predmeta koji se zavaruje, oko koje je rastaljeni materijal, koji se iza pokretne rupice skrućava. Tako je moguće zavarivati "I" spoj Ti ili Al do 12 mm debljine, a nerđajući čelik do 6 mm u jednom prolazu /3/.

Referencije:

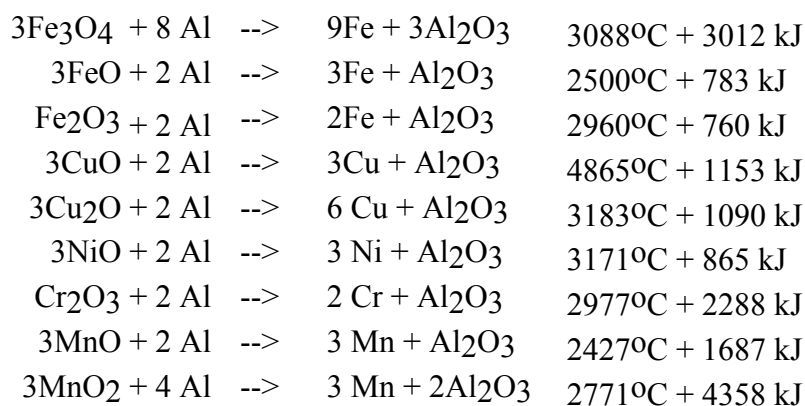
- /1/ Anzulović, B. Zavarivanje i srodni postupci. Skripta, FESB, Split 1990
- /2/ Kralj, S; Andrić, Š. Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka., FSB, Zagreb 1992.
- /3/ Plasma Arc Welding Process, Welding Journal, Datasheet 11/96

TERMITSKO (ALUMINO - TERMITSKO) ZAVARIVANJE TALJENJEM

Općenito

Termit je opći naziv za egzotermnu reakciju između smjese metalnih oksida i aluminija. Višak topline se koristi za taljenje osnovnog materijala i dodatnog materijala, koji je sastavni dio smjese.

Tipične reakcije termita su [3]:



U svim egzotermnim reakcijama Al se koristi kao reducirajuće sredstvo. U principu se umjesto Al može koristiti Mg, ali ovaj ima visoku temperaturu taljenja oksida, pa pri taljenju troska ne bi bila dovoljno fluidna.

Za zavarivanje čelika se može koristiti tri dijela cundera (željezni oksid) i jedan dio količine Al. Teorijska temperatura prema prvoj jednadžbi je 3088°C . Zbog gubitaka: radijacija, grijanje posude - lonca, temperatura taline u loncu je 2530°C . Za paljenje smjese termita se koristi smjesa peroksida, klorata i kromata kao oksidirajuća sredstva, a prašak Al, Mg, Ti ili Si kao reducirajuće sredstvo. Ova masa daje temperaturu iznad 1205°C koja je potrebna za zapaljenje osnovne mase. Paljenje je moguće i sa usijanom čeličnom šipkom. Izgaranje termita nije eksplozivno.

Dodavanjem čestica metala ili legura u mješavinu termita mijenjamo kemijski sastav taline i svojstva zone taljenja zavarenog spoja. Aluminij oksid kao troska pliva na površini taline.

Princip

Pri termitskom zavarivanju metal se rastali u loncu, a izvor topline je čitava mješavina termita. Kasnije, kao kod lijevačkog zavarivanja, talina se lijeva u zazor - šupljinu u kalupu, između dijelova, koji se spajaju.

Varijante postupka:

1. Termitsko zavarivanje taljenjem. Princip je objašnjen
2. Termitsko zavarivanje pritiskom. Egzotermička reakcija se koristi samo za zagrijavanje do temperature kovanja sučeljenih dijelova, da bi kasnije zagrijani dijelovi silom pritiska spojili - zavarili.
3. Lemljenje. Pasta za čišćenje i dodatni materijal se postave na mjesto spoja, a termitskom masom samo se vrši potrebno zagrijavanje na temperaturu lemljenja.

Priprema spoja

Napr. za zavarivanje šinja se stavlja razmak 14 mm, ako se ostavi zadebljanje na mjestu spoja, a 20 mm, ako se radi bez zadebljanja.

Parametri i uvjeti zavarivanja

Temperatura taline 2000-2400°C. Vrijeme egzotermne reakcije prosječno 4-20 s. Preporučuje se predgrijavanje kalupa prije ulijevanja talina na 900° za čelik. Zazor između elemenata pri sučeonom zavarivanju se računa prema formuli $a = 0.75 \sqrt[3]{A_z}$, mm; A_z = presjek zavora, mm².

Prednosti

Postupak je jednostavan i brz. Ne treba električna struja. Brzina zavarivanja odgovara brzini ulijevanja. Napr. 2000 kg taline se može uliti za 30 s [2]. Pogodan za montažne uvjete. Što je presijek dijelova za spajanje veći, to je efektivnost ovog postupka bolja.

Primjena

Čelik do $C_E < 1.2 \%$, sivi lijev, Al, Cu. Moguća je primjena egzotermne reakcije za zavarivanje taljenjem, zavarivanje pritiskom i za lemljenje. Primjenjuje se i za popravak napr. odljevaka, kada postoji šupljina na površini. U građevinarstvu se koristi za zavarivanje betonskog željeza. Moguće je i spajanje bakrenih vodiča.

Referencije

- [1] Ruge, J. Handbuch der Schweisstechnik, Band II: Verfahren und Fertigung, Springer Verlag, 1980.
- [2] Neuman, A; Richter, E. Tabellenbuch Schweiss und Lottechnik, VEB, VT, Berlin, 1979
- [3] Welding Handbook, Sect.3, Part B, Welding, Cutting and Related Processes, 6th Edition, AWS, MacMillan, London, 1971.

ZAVARIVANJE MAGNETSKI POKRETANIM ELEKTRIČNIM LUKOM (MPL)

Postupak zavarivanja pokretanim električnim lukom je zavarivanje koje se ostvaruje pritiskom, nakon omekšavanja osnovnog materijala (dviju cijevi) uslijed djelovanja električnog luka koji se rotira u zazoru žlijeba za zavarivanje. Rotacija električnog luka u zazoru žlijeba za zavarivanje je rezultat djelovanja suprotnih magnetskih polja na cijevima koje se zavaruju, nakon uspostavljanja električnog luka pomoću pomoćnog magnetskog polja.

MPL postupak zavarivanja služi za zavarivanje cijevi, prirubnica, šupljih profila itd. Općenito nema ograničenja za promjer cijevi, odnosno radnog komada, jer on ovisi o snazi i karakteristikama izvora zavarivanja (istosmjerna struja), te sili sabijanja. Obično se ne zavaruju cijevi veće debljine stijenke od 8 mm. Proces se odvija automatski bez dodatnog materijala, sa strujom zavarivanja 200 – 250 A i silom sabijanja sučeljenih cijevi od 60 – 80 N/mm². Osnovni su parametri zavarivanja:

- jakost struje zavarivanja,
- vrijeme gorenja električnog luka (rotacije),
- sila i vrijeme sabijanja.

Utrošak cijevi po zavarivanju je do 2 mm, sa neznatnim srhom. Razmak između zavarenih dijelova prije zavarivanja je od 1,5 do 2,5 mm. Brzina rotacije električnog luka po zakonitostima elektromagnetizma je iznad 400 okretaja/sek. Sama brzina rotacije ovisi o gustoći magnetskog toka, jakosti struje i promjeru šupljeg profila. Vrijeme zavarivanja je 1 – 20, a obično 3 – 5 sekundi. Dužina hvatanja cijevi je 120 mm. Za svaki oblik i dimenzije kontrure zavarenih dijelova potrebna je nova zavojnica.

Područje primjene:

Postupak zavarivanja ima široku primjenu u strojogradnji, brodogradnji, izgradnji vozila, enetgetici, građevinarstvu, proizvodnji poljoprivrednih strojeva, elektrotehnici, elektronici, kem. industriji i dr.

Objekti zavarivanja:

- cijevi (plinovodi, vrelovodi, naftovodi, ...)
- prirubnice,
- boce za tehničke plinove,
- rezervoari,
- šuplji profili različitih oblika i dr.

MPL-om se mogu zavariti:

- cijev na cijev,
- cijev na ploču ili puni komad.

Primjenjeni materijali:

- feromagnetni,
- neferomagnetni,
- čak i obojeni materijali,
- mogućnost primjene na raznorodne materijale.

Karakteristike metode:

- mali utrošak energije
- izuzetno kratko trajanje zavarivanja,
- jednostavna priprema zavara
- prikladnost za rad u pogonu i na terenu,
- ujednačenost kvalitete zavara (dozvoljeno smaknuće cijevi i do 30%),
- zavarivanje bez dodatnog materijala,
- mogućnost primjene zaštitne atmosfere,
- prikladnost za automatizaciju,
- smanjen broj operatera.

Metalurški greške. Početno stanje strukture i svojstava isporučenog materijala se u proizvodnji raznim toplinskim i mehaničkim operacijama (npr. deformiranjem) bitno mijenja, a posebno nepovoljan lokalni utjecaj može imati zavarivanje. Nepovoljne posljedice su metalurški greške:

- omekšivanje,
- zakaljivanje-povećanje krhkosti,
- izlučivanje raznih faza (sigma faza, karbidi, nitridi ...), što ima za posljedicu krhkost i smanjenje otpornosti
- na različite oblike korozije,
- anizotropnost svojstava i nosivosti podužno i poprečno na spoj zbog inherentnih grešaka zavarenog spoja
- smještenih po liniji zavara. Spoj ima manju nosivost ako opterećenje djeluje okomito na liniju zavara.

Geometrijske greške nastale greškama u proizvodnji - pri pripremi spojeva ili nepravilnom tehnologijom (npr. slijedom) zavarivanja, kada dolazi do odstupanja od teorijskog oblika. Zbog grešaka geometrijskog oblika na mjestu spoja se javljaju dodatna naprezanja u eksploataciji. Geometrijske greške su:

- denivelacije (posmaknuća rubova)
- kutne deformacije,
- ekscentričnost (npr. kod cijevi i posuda),
- uvučenost ili izbočenost mjesta zavara,
- odstupanja od teorijskog zahtjevanog oblika i dimenzija spoja (premala dimenzija kutnog spoja, nepravilan oblik kutnog zavara, ...)

Konstruktivne greške:

- Lokacija spoja. Izbjegavati spoj na mjestu najvećih naprezanja (najvećeg momenta napr.).
- Izbor oblika spoja. Kutni spoj ima veliku koncentraciju naprezanja u odnosu na sučeonu spoj, pa je povoljnije izabrati sučeonu spoj. Odstranjivanjem nadvišenja na licu zavara i korijenskog provara poboljšava se nosivost sučeonog zavarenog spoja, jer se odstranjuju koncentratori naprezanja.
- Nagle promjene oblika i konstruktivni zarezi su koncentratori naprezanja, koji nepovoljno djeluju na zavarene spojeve, ako su u blizini ili baš na mjestu koncentrata naprezanja.

Utjecaj grešaka na pouzdanost zavarenog proizvoda ovisi o karakteristikama grešaka

Karakterizacija pojedine greške ovisi o:

- vrsti-tipu greške,
- orijentaciji u odnosu na smjer glavnih naprezanja,
- veličini greške, te
- položaju u odnosu na debljinu i površinu (površinske, unutarnje, blizina ispod površine)

Prema oštrocini djelovanja (djelovanje greške kao koncentrata naprezanja) greške se dijele na:

- plosne (pukotine, zajedne, greške vezivanja, ...)
- volumenske (poroznost, uključci troske, ...)

Lokalne i kontinuirane greške

Bilo koja greška se može protezati po čitavoj duljini šava ili biti kratka, napr. samo nekoliko mm. Kontinuirano neprovaren korijen na cijevi ili posudi po tlakom djeluje nepovoljnije nego lokalno neprovaren korijen.

Blizina drugih grešaka

Više bliskih grešaka se može zamijeniti djelovanjem jedne veće greške veličine grupe grešaka. Više bliskih pukotina možemo zamijeniti jednom pukotinom. Slično možemo primijeniti na više bliskih zajedne ili neprovarenih dužina korijena.

Istovremena prisutnost različitih vrsta grešaka

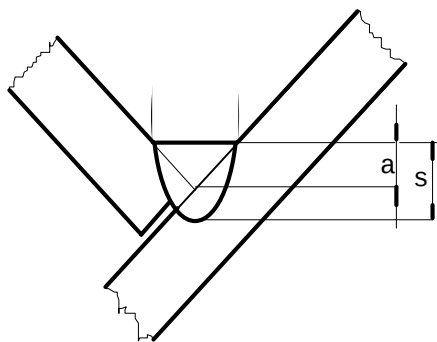
Nepovoljno je ako istovremeno se na jednoj lokaciji nalaze napr. metalurški, geometrijske i proizvodne greške, te visoka zaostala naprezanja na vlak od zavarivanja.

Ocjena kritičnosti greške mehanikom loma

Kada se ocjenjuje kritičnost jedne greške zavarenog spoja, potrebno je uzeti u obzir ostale greške i nepovoljne utjecaje u blizini analizirane greške uz vrh oštrocine greške, koji se obično mogu obuhvatiti izrazima mehanike loma.

$$K_{IC} \leq \sigma \sqrt{\pi \cdot a \cdot \frac{1}{Q}}, \text{ MPa} \sqrt{\text{m}} \quad \Rightarrow \quad a_{cr} \leq \frac{K_{IC}^2 Q}{\sigma^2 p}$$

Žilavost loma materijala K_{IC} može u ZUT biti vrlo niska. Ako se na istoj lokaciji nalazi zarez-zajedne, tada je ta zajedne mnogo opasnija, nego u slučaju žilave ZUT. Također, krka ZUT je manje opasna, ako nema zareznog djelovanja u njoj.



Kod zavarivanja visokočvrstih i austenitnih nerđajućih čelika, gdje se mora strogo kontrolirati toplinski input, može se i površina presjeka zone taljenja, na laboratorijskom makro izbrusku, koristiti kao jedan pokazatelj primjenjenog toplinskog inputa pri početnoj temperaturi metala T_0 .

