

OPRAVDANOST PRIMJENE MAG forceArc POSTUPKA ZAVARIVANJA U IZRADI ČELIČNIH KONSTRUKCIJA

JUSTIFICATION OF THE APPLIACITION OF MAG forceArc PROCESS IN THE CONSTRUCTION OF STEEL STRUCTURES

Marko Horvat, Veljko Kondić, Dražen Brezovečki

Stručni članak

Sažetak: U radu su prikazani osnovni mehanizmi prijenosa metala kod elektrolučnog postupka zavarivanja taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi plinova. Dane su teorijske osnove MAG forceArc postupka zavarivanja tvrtke EWM Group. Analiza postupka provedena je makroskopskom analizom presjeka zavarenih spojeva. Opravdanost primjene ovog postupka prikazana je kroz analizu osnovnih prednosti forceArc-a postupka u odnosu na konvencionalni prijenos metala štrcajućim lukom.

Ključne riječi: forceArc, mehanizam prijenosa metala, prijenos metal štrcajućim lukom

Professional paper

Abstract: This paper presents basic modes of metal transfer in gas metal arc welding process. Also, there are present the theoretical basic of MAG forceArc welding process produced in EWM Group company. Process was analysed by macroscopic analysis of cross section of the welded joint. The justification of the application of process is present during the analysis of main benefits of force Arc process in the comparison to conventional spray arc metal transfer.

Key words: forceArc, mode of metal transfer, spry transfer

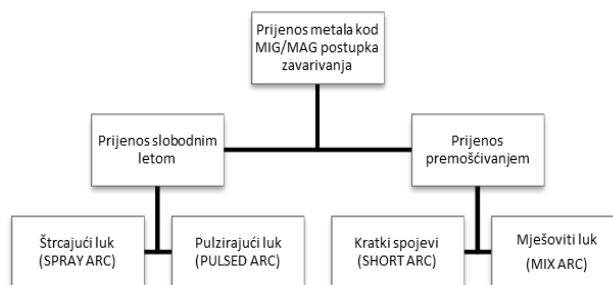
1. UVOD

Elektrolučni postupak zavarivanja taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog/aktivnog plina (MIG/MAG – Metal Inert Gas/Metal Active Gas; GMAW – Gas Metal Arc Welding) jedan je od najzastupljenijih postupaka nerastavljivog spajanja u industriji. Usprkos svojoj relativno dugoj povijesti, konstantan razvoj i istraživanje ovog postupka zavarivanja (ponajprije zahvaljujući razvoju izvora struje za zavarivanje) pruža mogućnosti novih poboljšanja, a konačni cilj je kvaliteta zavarenih spojeva, visoka produktivnost i ekonomičnost postupka [1].

2. KONVENCIONALNI MIG/MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA

Prema definiciji, konvencionalan MIG/MAG postupak je elektrolučni postupak zavarivanja, kod kojeg se električni luk uspostavlja između taljive, kontinuirane elektrode u obliku žice i radnog komada, u pravilu spojene na + (plus) pol istosmjernog izvora struje za zavarivanje. Proces zavarivanja odvija se u zaštitnoj atmosferi plinova koju osiguravaju inertni plinovi (Ar, He – MIG proces) ili aktivni plin CO₂ i plinskih mješavina, npr. 82% Ar + 18% CO₂ (MAG postupak).

Kod MIG/MAG postupka zavarivanja, prijenos metala odvija se mehanizmom prijenosa rastaljene kapljice s vrha elektrode (žice - dodatnog materijala), slobodnim letom kroz električni luk na osnovni materijal, ili na način da rastaljena metalna kapljica dođe u fizički kontakt s osnovnim materijalom (radnim komadom), prilikom čega nastane kratki spoj. Općenito, mehanizme prijenosa metala kod MIG/MAG postupka zavarivanja možemo prikazati slikom 1 [1, 2, 3, 4, 5].

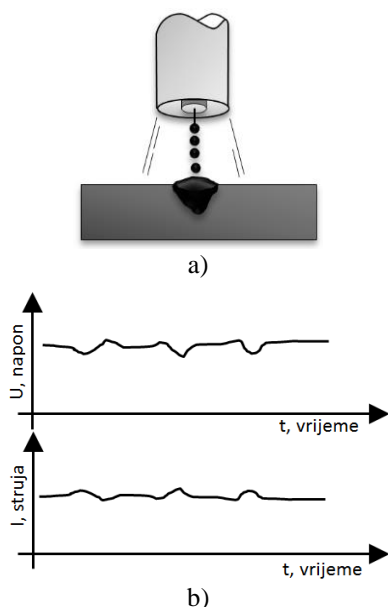


Slika 1. Mehanizam prijenosa metala kod MIG/MAG zavarivanja, prema [2]

2.1. Prijenos metala štrcajućim lukom

Osnovna karakteristika prijenosa metala štrcajućim lukom (slika 2), je prijenos metala (rastaljene kapljice) s

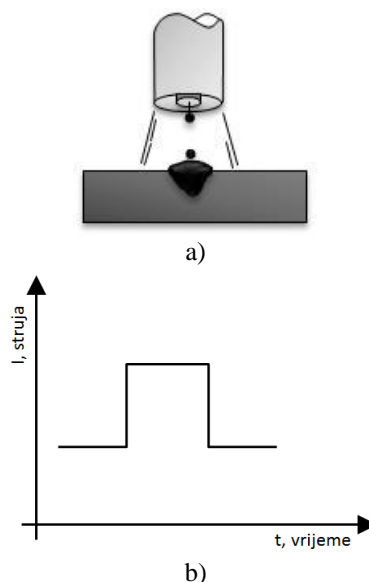
vrha elektrode slobodnim letom kroz atmosferu električnog luka. Takav prijenos metala omogućuje veća količina energije koju je potrebno unijeti u sam proces zavarivanja. Pod time se podrazumijeva povećanje jakosti struje koja će u konačnici dati veće zagrijavanje i povećanje "pinch-efekta", odnosno smanjenje sila koje nepovoljno djeluju na odvajanje rastopljenih kapljica (sile površinske napetosti, reaktivne sile itd.). Jedan od uvjeta za prijenos metala štrcajućim lukom je i primjena plinskih mješavina kod kojih je maksimalna koncentracija aktivnih plinova 18%, a često se primjenjuju i mješavine sa malim postocima drugih plinova radi utjecaja na geometriju zavarenog spoja (npr. kisik utječe na dubinu penetracije – penetracija je uža i dublja, dok upotreba CO_2 daje blažu i zaobljeniju penetraciju) [1, 2, 3, 4, 5].



Slika 2. Prijenos metala štrcajućim lukom: a) shematski prikaz prijenosa; b) shematski prikaz oscilograma, prema [2]

2.2. Prijenos metala pulsirajućim lukom

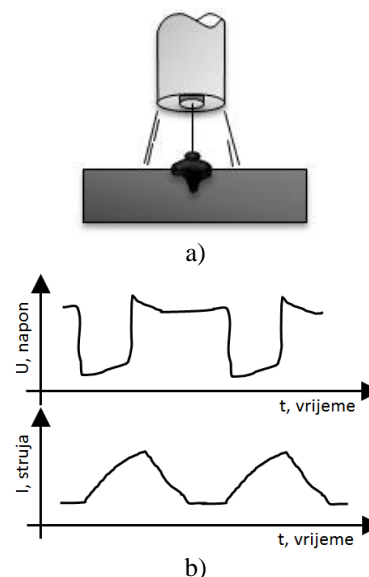
Prijenos metala pulsirajućim lukom (GMAW-P), slika 3, je oblik prijenosa metala štrcajućim lukom kod kojeg je iznos prosječne struje zavarivanja manji od minimalne vrijednosti struje koja omogućuje prijenos metala štrcajućim lukom. To je omogućeno promjenom iznosa struje zavarivanja između dvije vrijednosti – osnovne i maksimalne. Osnovna vrijednost struje zavarivanja je minimalna vrijednost koja je potrebna za održavanje električnog luka, dok je maksimalna vrijednost struje (struja impulsa) ona vrijednost koja omogućuje prijenos metala bez uspostave kratkog spoja (prijenos metala štrcajućim lukom), tj. struja zavarivanja koje je dovoljna da rastali dodatni materijal (žicu), a u idealnom slučaju, vremenski interval trajanja maksimalne struje je minimalno vrijeme potrebno za formiranje i odvajanje jedne kapljice rastaljenog materijala po impulsu [1, 2, 3, 4, 5].



Slika 3. Prijenos metala pulsirajućim lukom: a) shematski prikaz prijenosa; b) shematski prikaz oscilograma, prema [2]

2.3. Prijenos metala kratkim spojevima

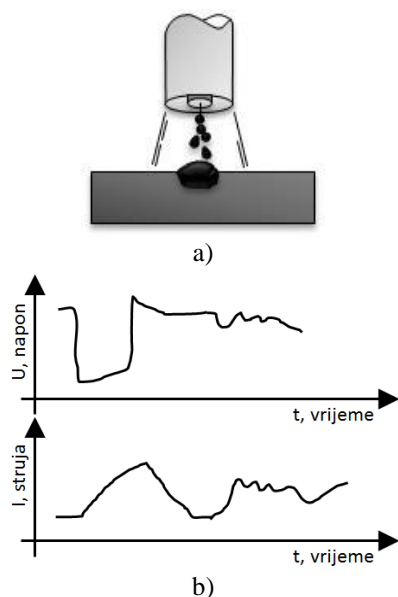
Prijenos metala kratkim spojevima (GMAW-S) jest postupak kod kojeg kontinuirano dovođena puna ili praškom punjena žica stvara metal zavara uslijed uspostave kontinuiranih kratkih spojeva (slika 4). Uzmu li se u obzir svi spomenuti konvencionalni procesi prijenosa metala kod elektrodočnih postupaka zavarivanja, ovo je način prijenosa metala sa najmanje unosa topline na mjesto zavara. Pojedinačno gledajući, svaki prijenos metala kod ovog procesa nastaje kada žica dođe u fizički kontakt sa osnovnim materijalom ili već nastalim metalom zavara (bilo u krutom ili rastaljenom stanju), a sam proces prijenosa najviše ovisi o promjeru žice (dodatnog materijala), vrsti zaštitnog plina te osnovnim parametrima zavarivanja, a događa se između 20 i 200 puta u sekundi [1, 2, 3, 4, 5].



Slika 4. Prijenos metala kratkim spojevima: a) shematski prikaz prijenosa; b) shematski prikaz oscilograma, prema [2]

2.3. Prijenos metala mješovitim lukom

Prijenos metala mješovitim lukom, slika 5, najčešće se odvija uz upotrebu CO₂ kao zaštitnog plina ili plinskih mješavina sa velikim udjelom istog. To je prijenos metala kod kojeg dolazi do prijenosa metala štrcajućim lukom i kratkim spojevima, a izmjena i redosljed mehanizama prijenosa je slučajna pojava. Mehanizam prijenosa metala štrcajućim lukom u ovom slučaju najčešće je posljedica gravitacijskih sila. Osnovni nedostatak ovakvog prijenos je njegova neregularnost koja se najčešće odlikuje većim razlikama u promjeru odvojenih kapljica koje u konačnici definiraju geometriju zavarenog spoja. Također, prijenos kapljica nije aksijalan, a prskanje je znatno povećano [1, 2, 3, 4, 5].



Slika 5. Prijenos metala mješovitim lukom: a) shematski prikaz prijenosa; b) shematski prikaz oscilograma, prema [2]

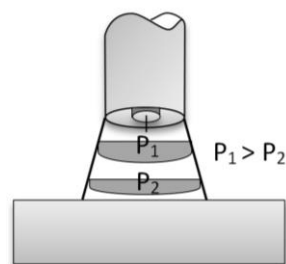
3. MAG forceArc POSTUPAK ZAVARIVANJA

Danas se u izradi čeličnih konstrukcija većih dimenzija, primjenom MIG/MAG postupka zavarivanja, najčešće koristi prijenos metala štrcajućim lukom. Kao što je spomenuto, ovaj proces zavarivanja odvija se kod većih struja zavarivanja u zaštitnoj atmosferi smjesa plinova sa velikom koncentracijom inertnog plina (min. 82% Ar). Kako navodi izvor [6], do kraja 1980, norma DIN 1910-4 sadržavala je definiciju prijenosa metala štrcajućim lukom kao prijenos metala u kojem ne postoji mogućnost nastanka kratkih spojeva. Takav prijenos metala zahtijevao je viši napon električnog luka (fizički duljim električnim lukom), što je rezultiralo nestabilnošću istog, pogodovanjem nastanka grešaka u zavarenom spoju te gubitku legiranih elemenata tijekom procesa zavarivanja. Već Hans Ulrich Promaska, u svojoj knjizi "MAG Schweißen" poziva na "kraći i zbijeni" prijenos metala štrcajućim lukom koji u konačnici nije isključivao mogućnost nastanka kratkih spojeva kod ovog načina prijenosa metala u procesu zavarivanja. Ipak, duljina održavanja kratkih spojeva je bila vrlo

mala, što je rezultiralo minimalnim rastom struje prilikom pada napona električnog luka, prskanje (gubitak dodatnog materijala) je ostalo neznajčno, a sam prijenos metala karakterističan po velikoj količini svijetla i zvuku koji se razvijaju tijekom procesa zavarivanja. Ovakav prijenos metala vrlo brzo je pronašao značajnu primjenu u praksi, a u konačnici je i rezultirao promjenom gore navedene definicije prijenosa metala štrcajućim lukom iz kraja 1980-ih [6, 7].

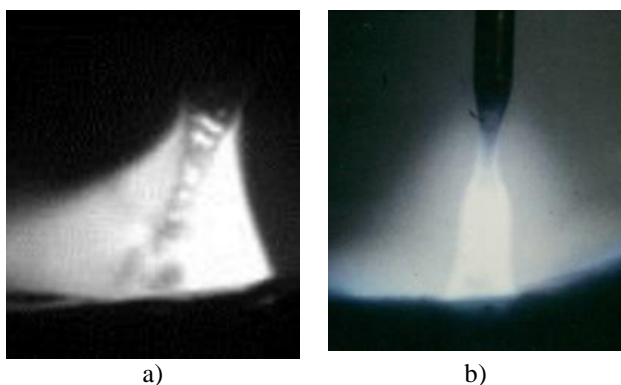
Ovakvo skraćivanje električnog luka, odnosno smanjenje napona električnog luka, bilo je poželjno u mnogim slučajevima zbog samih tehničkih razloga, ali je bilo neizvedivo jer je rezultiralo povećanjem vremena održavanja kratkog spoja, povećanjem struje električnog luka te gubitkom dodatnog materijala kroz prskanje. Ipak, razvojem inverterskih izvora struje za zavarivanje i digitalne kontrole parametara zavarivanja, omogućena je promjena parametara zavarivanja u vrlo kratkim vremenskim periodima. U navedenom primjeru to se prvenstveno odnosi na mogućnost smanjenja vrijednosti jakosti struje u trenutku pojave kratkog spoja, tj. ponovnoj uspostavi električnog luka sve do vraćanja vrijednosti napona na nominalnu vrijednost. Ovakva kontrola procesa smanjuje duljinu trajanja kratkog spoja pri prijenosu materijala, što rezultira malim gubitkom dodatnog materijala – prskanjem [6, 7].

ForceArc tehnologija temelji se na dodatnom skraćivanju električnog luka smanjenjem napona istog u odnosu na prijenos metala klasičnim štrcajućim lukom. Prijenos metala odvija se u obliku sitnih rastaljenih kapljica čija je brzina povećana zbog jačeg djelovanja plazme električnog luka. Teoretski, uz pretpostavku da je ukupna suma svih sila koje djeluju u električnom luku konstantna te da se električni luk stožasto širi prema radnom komadu, tada su vrijednosti pritiska plazme električnog luka i njegova duljina obrnuto proporcionalne, slika 6 [6, 7].



Slika 6. Shematski prikaz pritiska plazme električnog luka, prema [2]

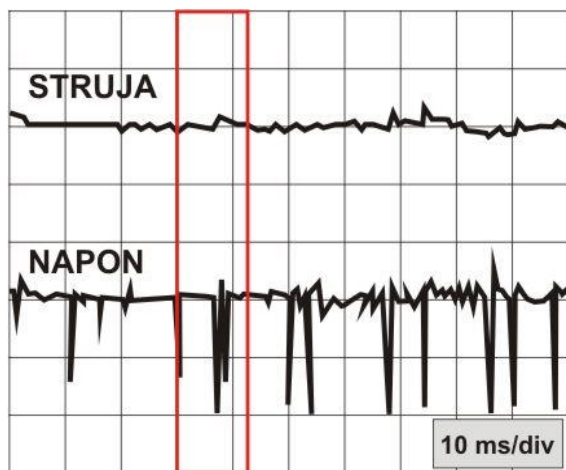
Naravno, u ovakvom procesu lako može doći do spajanja sitnih kapljica te nastajanja "lanca" rastaljenog materijala koji može uzrokovati i kratki spoj, tj. spoj osnovnog i dodatnog materijala, odnosno neželjenog prskanja, ukoliko ne postoji kontrola procesa kao što je navedeno u prethodnom ulomku, slika 7. Kod prijenosa metala kratkim spojem, u trenutku uspostave fizičkog kontakta između rastaljene kapljice i osnovnog materijala, dolazi do trenutnog pada napona zbog pada otpora te povećanja vrijednosti struje (struja kratkog spoja). [6, 7]



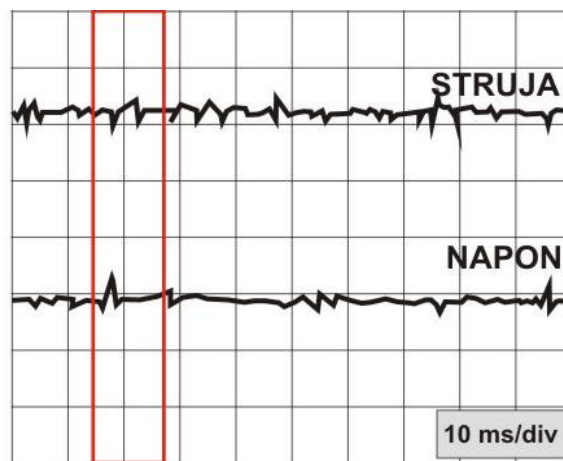
Slika 7. Snimka prijenosa metala: a) forceArc postupak; b) prijenos metala štrcajućim lukom [7]

S konvencionalnim izvorima struje za zavarivanje, ovo naglo povećanje vrijednosti struje nije moguće smanjiti u dovoljno kratkom vremenu zbog samog induktiviteta izvora, koji je posljedica velike mase transformatora, za razliku od inverterskih izvora gdje on može biti eliminiran, tj. rast i pad vrijednosti struje u vremenu ostvarivanja kratkog spoja i ponovne uspostave električnog luka može biti kontroliran u vrlo kratkom vremenu. Kod primjene forceArc postupka, kontrola procesa omogućena je kontinuiranim mjerenjem napona električnog luka te brzom regulacijom istog. EWM Group, proizvođač izvora struje za zavarivanje sa opcijom zavarivanja forceArc-om, ovakvu kontrolu procesa zavarivanja naziva još i visokodinamičkom regulacijom stvarnih vrijednosti parametara zavarivanja. Usporedna dinamička karakteristika izvora struje za zavarivanje konvencionalnim štrcajućim lukom i forceArc-om prikazana je slikom 8 [6, 7].

Osim toga, ovakva brza (dinamička) kontrola procesa zavarivanja dozvoljava zavarivanje s duljim slobodnim krajem žice (kod forceArc postupka i do 40 mm) što je osobito pogodno prilikom izvođenja spojeva zahtjevne geometrije (ograničenih prostorom, izvođenje korijenskih prolaza itd.), ali i kod izvođenja klasičnih spojeva uz ekonomičniju pripremu žljebova ili potpunu eliminaciju pripreme spojeva i prednamještanja zazora (kod tanjih pozicija, uz uvjet osiguranja dovoljne količine zaštitnog plina) [6, 7, 8].



a)



b)

Slika 8. Shematski prikaz dinamičke karakteristike izvora: a) konvencionalni štrcajući luk; b) forceArc, skicirano prema [6, 7]

4. MAKROSKOPSKA ANALIZA SPOJA ZAVARENOG forceArc POSTUPKOM

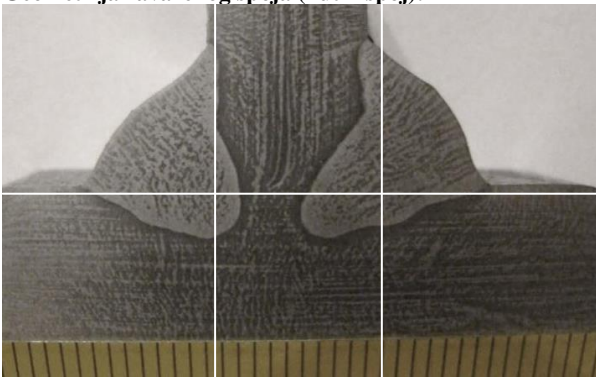
U svrhu makroskopske analize, izvršeno je usporedno navarivanje i zavarivanje konvencionalnim štrcajućim lukom i navarivanje i zavarivanje u ForceArc modu. Ispitivanje je izvršeno na uređaju EWM Phoenix 351 Puls. Osnovni parametri ispitivanja i analiza dani su tablicom 1, 2 i 3.

Tablica 1: Specifikacija osnovnog i dodatnog materijala te osnovnih parametara zavarivanja korištenih pri izradi uzoraka

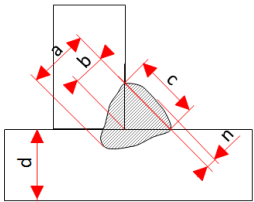
| | |
|---|----------------------------|
| Osnovni materijal: | |
| EN S355J2G3 d = 10,00 mm | |
| Dodatni materijal: | |
| EN ISO 14341-A : G 4 Si 1 Esab AristoRod 12.63 d=1.0mm | |
| Zaštitni plin: | |
| EN ISO 14175 : M21 Ferroline C18 , 82%Ar + 18% CO2 | |
| Protok zaštitnog plina: | |
| $q = 13 \text{ l/min}$ | |
| Način zavarivanja: | |
| ručno/nagib gorionika 45° | |
| Vrsta spoja/položaj: | |
| dvostruki kutni spoj/PB; navarivanje/PA | |
| Priprema spoja: | |
| bez pripreme/bez zazora | |
| Parametri zavarivanja: | |
| Štrcajući luk | forceArc |
| $I = 300 \text{ A}$ | $I = 320 \text{ A}$ |
| $U = 35 \text{ V}$ | $U = 33 \text{ V}$ |
| $v_z = 16,5 \text{ m/min}$ | $v_z = 18 \text{ m/min}$ |
| $v_z = 360 \text{ mm/min}$ | $v_z = 360 \text{ mm/min}$ |
| Efektivni toplinski input (uz stupanj korisnog djelovanja izvora struje za zavarivanje $\eta = 0,8$): | |
| $E_f = 1400 \text{ J/mm}$ | $E_f = 1219 \text{ J/mm}$ |

Tablica 2: Analiza spojeva zavarenih konvencionalnim štrcajućim lukom i forceArc-om – kutni spoj

Geometrija zavarenog spoja (kutni spoj):



Makro izbrusak specificiranog spoja; nagriženo: nital 5%

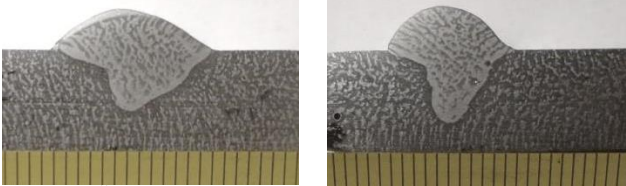


a – nominalna debljina zavara [mm]
 b – stvarna debljina zavara [mm]
 c – širina zavara [mm]
 n – nadvišenje [mm]
 d – debljina materijala [mm]

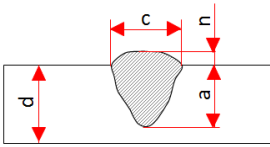
| Štrcajući luk | forceArc |
|---------------|--------------|
| a = 8,72 mm | a = 12,11 mm |
| b = 6,23 mm | b = 6,74 mm |
| c = 12,11 mm | c = 11,88 mm |
| n = 1,24 mm | n = 1,86 mm |
| d = 10,00 mm | d = 10,00 mm |

Tablica 3: Analiza spojeva zavarenih konvencionalnim štrcajućim lukom i forceArc-om – navar

Geometrija zavarenog spoja (navar):



Makro izbrusak specificiranog spoja; nagriženo: nital 5%



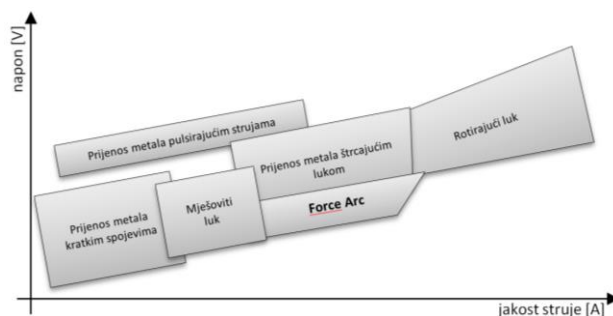
a – penetracija navara [mm]
 c – širina zavara [mm]
 n – nadvišenje [mm]
 d – debljina materijala [mm]

| Štrcajući luk | forceArc |
|---------------|--------------|
| a = 5,62 mm | a = 7,86 mm |
| c = 12,89 mm | c = 11,17 mm |
| n = 4,58 mm | n = 5,04 mm |
| d = 10,00 mm | d = 10,00 mm |

5. PREDNOSTI PRIMJENE MAG forceArc POSTUPKA ZAVARIVANJA

ForceArc, tj. prijenos metala "skraćenim" štrcajućim lukom, bez obzira na jednostavnost modifikacije konvencionalnog prijenosa metala, daje značajne prednosti korištenja, prvenstveno u vidu kvalitete

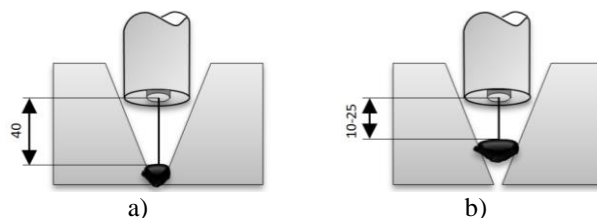
zavarenog spoja, ali i ekonomičnosti postupka i jednostavnosti primjene. Pri tome, postupak zavarivanja i dalje spada u prijenos metala visoke energije, slika 9.



Slika 9. Shematski prikaz prijenosa metala kod MIG/MAG zavarivanja obzirom na primijenjene parametre zavarivanja – energetske razine, prema [7]

Osnovne prednosti forceArc postupka zavarivanja su:

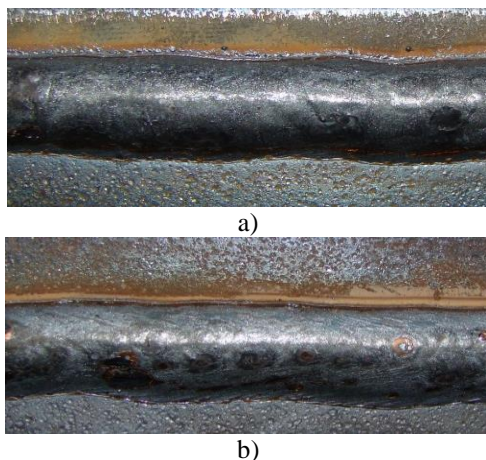
- Odlična fuzija i značajno povećanje penetracije spoja – duljina električnog luka kod konvencionalnog štrcajućeg luka koja omogućava rad bez prekomjernog prskanja, istovremeno otvara mogućnost puhanja luka (zbog njegove veće dužine). Eliminacija puhanja luka skraćivanjem luka izaziva pojavu kratkih spojeva i neželjeno prskanje. Dinamičko upravljanje parametrima kod forceArc-a omogućava skraćivanje luka bez pojave kratkih spojeva i prskanja. Znatno povećanje penetracije dozvoljava izvođenje zavarivanja tanjih pozicija bez pripreme uz garantirani provar. Također, u ovakvim slučajevima najčešće nije potrebno definirati i prednamješteni zazor između pozicija [6, 7, 8].
- Stabilnost luka i lako izvođenje neautomatiziranog zavarivanja – skraćivanje luka daje luku stabilnost i koncentriranost, što je direktna posljedica povećanog pritiska plazme električnog luka. Time se izbjegava "mekanost" konvencionalnog štrcajućeg luka, osobito u geometrijski zahtjevnim pozicijama zavarivanja. Također, dinamička regulacija parametara zavarivanja uz preciznu regulaciju slobodnog kraja žice omogućava rad sa slobodnim krajem žice duljina i do 40 mm, što je osobito važno u izvođenju korijenskih prolaza, bez pojave puhanja luka i naljepljivanja, slika 10 [6, 7, 8].



Slika 10. Duljina slobodnog kraja žice: a) forceArc postupak; b) prijenos metala štrcajućim lukom [7]

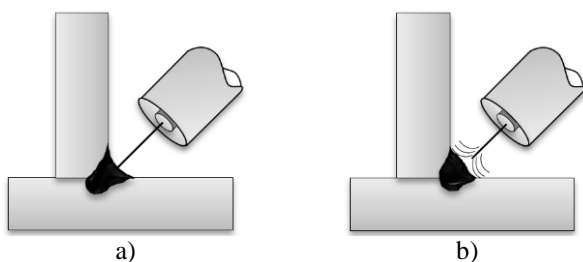
- Smanjena zona utjecaja topline i općenito manji unos topline u osnovni materijal – konstantnost parametara zavarivanja daje smanjeni i ravnomjeran unos topline što se direktno odražava na količinu deformacija i zaostalih napetosti u konstrukciji. Nadalje, smanjuje se sagorijevanje legiranih

elemenata osnovnog i dodatnog materijala, a ova se pojava povoljno odražava i na izgled zavarenog spoja koji je u usporedbi sa konvencionalnim štrcajućim lukom ravnomjerniji i glađi, slika 11 [6, 7, 8].



Slika 11. Izgled zavarenog spoja (zavarivanje prema parametrima iz Tablice 1, 2, 3 - navar: a) forceArc postupak; b) prijenos metala štrcajućim lukom

- Smanjenja mogućnost od nastanka pora i zajedu – povećani pritisak plazme električnog luka olakšava manipulaciju kod manualnog zavarivanja (dopuštena su veća odstupanja kuta nagiba gorionika), bez negativnih posljedica na geometriju zavarenog spoja što se posebno čini korisnim kod korijenskih prolaza. Skraćivanje električnog luka smanjuje mogućnost nastanka zajedu na najmanju moguću mjeru, slika 12. Povećani pritisak plazme električnog luka povoljno utječe i na geometriju zavarenog spoja, tj. približava je idealnom konkavnom obliku (npr. kod kutnih spojeva) [6, 7, 8].



Slika 12. Utjecaj duljine i plazme električnog luka na mogućnost nastanka zajedu i pora u zavarenom spoju: a) forceArc postupak; b) prijenos metala štrcajućim lukom [7]

- Ekonomska isplativost - temelji se na povećanoj brzini zavarivanja (kod automatiziranog i neautomatiziranog zavarivanja). Također, koncentriranost luka, dinamička kontrola parametara zavarivanja i slobodnog kraja žive daje mogućnost izvođenja zavarivanja u žljebovima, čiji je kut otvora manji od konvencionalnih čija je posljedica manji broj prolaza, te uštede u osnovnom i dodatnom materijalu, količini zaštitnih plinova i vremenu zavarivanja bez posljedica na kvalitetu zavarenog spoja. [6, 7, 8]

6. ZAKLJUČAK

U zadnjih petnaestak godina vidljiv je značajan napredak u svim postupcima zavarivanja, a posebno u postupcima zavarivanja taljivom elektrodom u zaštiti inertnih i aktivnih plinova i smjesa. Prvenstveno je to rezultat visokih zahtjeva industrije (kvaliteta zavarenih spojeva, optimizacija troškova proizvodnje, specifični tehnički zahtjevi, razvoj na području inženjerstva materijala, zahtjevi u smislu povećanja produktivnosti, proizvodnosti i ekonomičnosti itd.), povećane konkurencije na području razvoja i proizvodnje opreme i uređaja za zavarivanje, ali i razvoja ostalih pratećih tehničkih grana, prvenstveno vezanih uz razvoj i modifikaciju izvora struje za zavarivanje. [1, 9]. Pri tome, najčešće se radi o većim ili manjim modifikacijama osnovnih načina prijenosa metala (prijenos metala kratkim spojevima ili prijenos metala štrcajućim lukom) što je omogućeno specifičnom regulacijom parametara zavarivanja. Jedan od primjera je i forceArc postupak, tvrtke EWM Group. Kod ovog postupka vidljivo je da se i vrlo malim modifikacijama (u osnovi to je skraćivanje konvencionalnog štrcajućeg luka) mogu dobiti značajna poboljšanja u smislu kvalitete zavarenog spoja i ekonomičnosti postupka zavarivanja. Ipak, opravdanost izbora ovakvog postupka zavarivanja temelji se na pravilnoj primjeni istog, tj. ozbiljnijoj analizi tehničkih zahtjeva konstrukcija, koja bi opravdala ulaganje u ovakve izvore struje za zavarivanje. To je svakako u industriji zahtjevnijih čeličnih konstrukcija, mostogradnji, proizvodnji željezničkih vozila, offshore industriji itd. Postupak je primjenjiv kod zavarivanja ugljičnih čelika, legiranih i visokolegiranih čelika, ali i aluminija i aluminijskih legura debljina većih od 5 mm. Pri tome se kao dodatni materijal najčešće koriste pune žice promjera 1.0 do 1.2 mm, odnosno 1.2 do 1.6 mm kod zavarivanja aluminija i aluminijskih legura. Pošto se ovaj postupak zavarivanja temelji na prijenosu metala štrcajućim lukom, kao zaštitni plinovi koriste se isključivo inertni plinovi, ili smjese plinova sa minimalnom koncentracijom inertnog plina od 82% (češće 90%).

7. LITERATURA

- [1] Lincoln Electric Company: GMAW Welding, Cleveland, Ohio, 2006.
- [2] Kralj, S., Andrić, Š.: Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka, Sveučilište u Zagrebu, fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1992.
- [3] Lukačević, Z.: Zavarivanje, Sveučilište Josip Juraj Strossmayer, Strojarski fakultet u Slavanskom Brodu, Slavonski Brod, 1998.
- [4] Kou, S.: Welding Metallurgy, John Wiley & Sons Inc., 2003.
- [5] Priručnik za zavarivanje – Elektroda Zagreb, Zagreb, 1987.
- [6] Budig, B.: EWM ForceArc - Brochure, Mündersbach, Germany

- [7] EWM ForceArc presentation, http://www.ewm-sales.co.uk/downloads/wm045401_gb_ewm_forcearc-produnktinformation_12.pdf (Dostupno: 05.05.2013.)
- [8] TWI Test House – ForceArc, (Dostupno:22.04.2013.)
- [9] Garašić, I., Kralj, S., Kožuh, Z.: Suvremeni postupci zavarivanja, Zavarivanje, 53 (2011), 3/4, 61-67

Kontakt autora:**Marko Horvat, dipl. ing.**

Sveučilište Sjever
Sveučilišni centar Varaždin
104. brigade 3
42000 Varaždin
e-mail: marko.horvat@unin.hr

Veljko Kondić, mag. ing. mech.

Sveučilište Sjever
Sveučilišni centar Varaždin
104. brigade 3
42000 Varaždin
e-mail: veljko.kondic@unin.hr

Dražen Brezovečki, CIWT

Bajkmont d.o.o.
Svetomatejska 12
10360 Sesvete