



# UTICAJ ZAŠTITNE ATMOSFERE I BRZINE DOVOĐENJA ŽICE NA STABILNOST MIG/MAG POSTUPKA ZAVARIVANJA

Olivera Popović<sup>1\*</sup>,  
Radica Prokić Cvetković<sup>1</sup>,  
Nenad Milošević<sup>1</sup>,  
Radomir Jovičić<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mašinski fakultet,  
Univerzitet u Beogradu,  
Beograd, Srbija

<sup>2</sup>Inovacioni centar,  
Univerzitet u Beogradu,  
Beograd, Srbija

## Rezime:

Stabilnost procesa zavarivanja ima značajan uticaj na postizanje propisanog nivoa kvaliteta zavarenog spoja. Povećanje stabilnosti utiče na smanjenje mogućnosti pojave nesavršenosti, odnosno grešaka u samom spoju. Stabilnost procesa zavarivanja se ogleda u stabilnosti električnog luka. Promene dužine luka tokom zavarivanja utiču na varijaciju parametara zavarivanja, tačnije na jačinu struje i napon. Na osnovu praćenja parametara zavarivanja u realnom vremenu može se izvršiti statistička analiza dobijenih rezultata. U radu je prikazan uticaj brzine dovođenja žice i vrste zaštitne atmosfere na stabilnost MIG/MAG postupka zavarivanja pri upotrebi metalne punjene elektrodne žice.

## Ključne reči:

stabilnost električnog luka, zaštitna atmosfera, brzina dovođenja žice, statistička analiza, koeficijent varijacije.

## 1. UVOD

Elektrolučno zavarivanje topljivom elektrodom žicom u zaštiti inertnog ili aktivnog gasa (MIG/MAG) postalo je veoma popularno u poslednje dve decenije, prvenstveno zbog svoje jednostavnosti kojom se postiže zadovoljavajući kvalitet zavarenog spoja. Za zaštitu metalnog kupatila kod ovog postupka zavarivanja koriste se gasovi. U početku su se koristili samo čisti, jednokomponentni gasovi, argon ili ugljen-dioksid. Međutim, poslednjih godina sve više su u upotrebi mešavine gasova zbog brojnih prednosti koje donose u odnosu na čiste (jednokomponentne) gasove. Za zavarivanje čeličnih delova, kao zaštita metalnog kupatila, trenutno se koriste kombinacije argona, ugljen-dioksida, uz mali dodatak kiseonika. Procentualni udeo ovih gasova u smeši zavisi od hemijskog sastava čelika. Na stabilnost procesa zavarivanja i mehaničke karakteristike zavarenog spoja utiču, pored vrste gasova u smeši, i njihov procentualni udeo kao i parametri pri kojima se izvodi zavarivanje [1, 2]. Za određene debljine delova koji se zavaruju i određene dužine zavarenih spojeva često se umesto punih, koriste elektrodne žice punjene metalnim prahom sa ciljem povećanja produktivnosti. Bez obzira na vrstu zavarivanja, radne uslove i propisanu tehnologiju, uvek se teži što stabilnijem procesu zavarivanja. Povećanje stabilnosti utiče na smanjenje mogućnosti nastanka

Odgovorno lice:

Olivera Popović

e-pošta:

opopovic@mas.bg.ac.rs



nesavršenosti u zavarenom spoju, što pokazuje da stabilnost procesa direktno utiče na dobijeni nivo kvaliteta zavarenog spoja. Cilj ovog rada je da definiše uticaj jačine struje (preko brzine dovođenja žice) i vrste zaštitne atmosfere na stabilnost MIG/MAG postupka zavarivanja pri upotrebi metalne punjene elektrodne žice.

## 2. STABILNOST PROCESA ZAVARIVANJA

Stabilnost procesa zavarivanja ogleda se u stabilnosti električnog luka. Promene dužine luka tokom zavarivanja utiču na varijaciju parametara zavarivanja, tačnije na jačinu struje i napon. Tokom zavarivanja, male promene ovih parametara su neizbežne i dešavaju se veoma brzo, od nekoliko stotina puta do nekoliko hiljada puta u minutu. Ove varijacije predstavljaju dinamičku karakteristiku električnog luka, a rezultat su uticaja jednog ili više sledećih faktora: načina vođenja električnog luka; topljenja dodatnog materijala i tipa prenosa dodatnog materijala kroz električni luk; razlike u termo i elektroprovodljivosti osnovnog materijala, dodatnog materijala i električnog luka; promene u protoku ili ometanom protoku zaštitne mešavine gasova. Stabilan proces zavarivanja odlikuje se mirnim prenosom dodatnog materijala kroz električni luk, relativno konstantnom dužinom luka i odsustvom razbrizgavanja. Nestabilan proces se pak odlikuje velikim oscilacijama jačine struje i napona zavarivanja, kao i neujednačenim prenosom dodatnog materijala kroz električni luk. Kao rezultat dobija se rasipanje vrednosti. Kapljice dodatnog materijala očvršćavaju na površini osnovnog materijala i na površini već očvršlog metala šava, što vizuelno potvrđuje nestabilnost procesa zavarivanja [3]. U slučaju kada do toga dođe neophodna je korekcija parametara zavarivanja. Najjednostavniji metod za određivanje stabilnosti procesa zavarivanja zavisi od analize signala dobijenih pomoću sistema za praćenje parametara zavarivanja u toku samog zavarivanja [4]. Ovi sistemi se zasnivaju na merenju određenih fizičkih veličina u realnom vremenu, tokom procesa zavarivanja. Veličine koje se najčešće mere su jačina struje i napon zavarivanja. Statistički obrađeni rezultati ovih signala mogu biti iskorišćeni za ocenu stabilnosti procesa zavarivanja.

## 3. EKSPERIMENTALNI REZULTATI I DISKUSIJA

U ovom eksperimentu su korišćene ploče od mikrolegiranog čelika P461NL1, 14 mm debljine. Hemijski sastav osnovnog materijala prikazan je u Tabeli 1.

C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Ni
0.153	0.38	1.40	0.015	0.0021	0.031	0.037	0.63
Mo	Cu	V	Nb	Ti	B	N	Fe
0.004	0.061	0.099	0.038	0.004	0.0003	0.0052	Ostatak

Tabela 1. Hemijski sastav osnovnog materijala

Zavarivanje je izvedeno MIG/MAG postupkom sa dodatnim materijalom u obliku elektrodne žice punjene metalnim prahom, oznake Filtub 12 M i prečnika Ø 1,2 mm proizvođača „Jesenice” Slovenija. Filtub 12 M je niskolegirana elektrodna žica pogodna za zavarivanje niskolegiranih i finoizranih čelika [5]. Zavarene spojeve izvedene ovom elektrodnom žicom karakteriše glatka površina metala šava i visoke mehaničke karakteristike na niskim temperaturama. Hemijski sastav dodatnog materijala je prikazan u Tabeli 2.

Proizvođač dodatnog materijala predlaže upotrebu u kombinaciji sa zaštitnim gasom u obliku mešavine Ar + 15 % <math>CO\_2 \leq 25\%</math> [5]. U ovom eksperimentu punjena elektrodna žica je korišćena u kombinaciji sa dve mešavine. Kao prva mešavina korišćena je gasna mešavina 82 % Ar + 18 %  $CO_2$  (M21, prema SRPS EN ISO 14175), a kao druga 93 % Ar + 6 %  $CO_2$  + 1 %  $O_2$  (M24, prema SRPS EN ISO 14175) [6]. Korišćene su dve brzine dodavanja žice i za obe zaštitne atmosfere su iznosile 3 m/min i 7,5 m/min. Pre samog zavarivanja izvršeno je predgrevanje osnovnog materijala na temperaturu od 150 °C. Ukupno su zavarena četiri uzorka. Radi lakšeg pregleda, korišćene promenljive u vidu mešavine gasa i brzine dodavanja žice su date u Tabeli 3 za svaki uzorak posebno. Za zavarivanje i praćenje parametara zavarivanja u realnom vremenu korišćeni su uređaji: strujni izvor „Fast MIG Pulse 350”, uređaj za dovođenje žice „Fast MIG MXF 65”, uređaj za praćenje parametara zavarivanja u realnom vremenu „Fast DLI 20” proizvođača „Kemppi” i računar sa instaliranim softverskim paketom „Pro Weld Data”. Prilikom zavarivanja svakog uzorka merena je jačina struje u trajanju od 100 sekundi.

C	Si	Mn	Fe
0,05	0,55	1,40	Ostatak

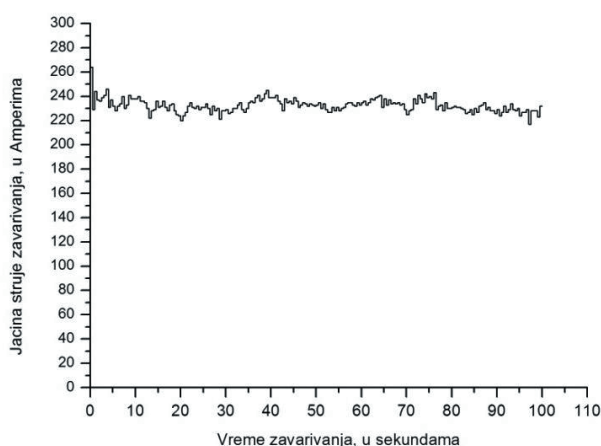
Tabela 2. Hemijski sastav dodatnog materijala



	Brzina žice	Gas
Uzorak 1	3 m/min	82 % Ar + 18 % CO <sub>2</sub>
Uzorak 2	7.5 m/min	82 % Ar + 18 % CO <sub>2</sub>
Uzorak 3	3 m/min	93 % Ar + 6 % CO <sub>2</sub> + 1 % O <sub>2</sub>
Uzorak 4	7.5 m/min	93 % Ar + 6 % CO <sub>2</sub> + 1 % O <sub>2</sub>

Tabela 3. Sastav zaštitne atmosfere i brzina dovođenja žice za zavarene uzorke

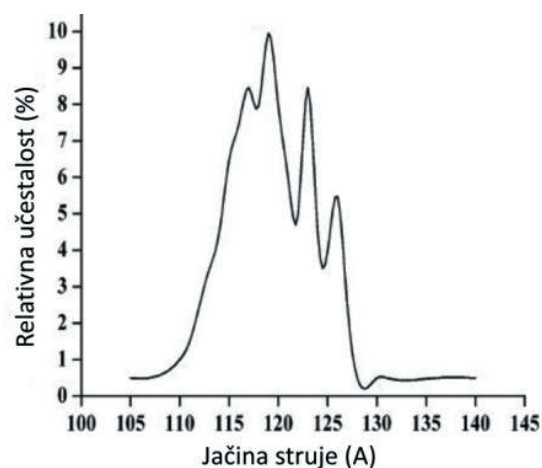
Na osnovu merenja sprovedenih tokom zavarivanja dobijeni su signali koji predstavljaju promenu jačine struje u vremenskom domenu. Na Slici 1 prikazan je jedan od dobijenih signala.



Slika 1. Promena jačine struje u toku zavarivanja

Radi jednostavnosti interpretacije rezultata za analizu dobijenih signala primenjene su metode deskriptivne statistike. Za svaki od četiri signala formirana je raspodela jačine struje.

Na Slici 2 prikazana je raspodela jačine struje za jedan od analiziranih signala. Jačina struje sa najvećom relativnom frekvencijom ponavljanja u okviru raspodele predstavlja onu jačinu struje koja se najveći broj puta ponavlja u toku trajanja određenog signala. Ova vrednost u statistici se naziva modus i predstavlja meru centralne tendencije, odnosno vrednost oko koje se grupišu ostale vrednosti.



Slika 2. Raspodela jačine struje za uzorak 1

Radi kvantifikacije i međusobnog poređenja stabilnosti procesa zavarivanja, pri radu sa različitim parametrima, kako je prikazano u Tabeli 3, određeni su koeficijenti varijacije jačine struje u odnosu na vrednosti modusa jačine struje za svaku od četiri raspodele. Koeficijent varijacije predstavlja meru varijabiliteta, odnosno prosečan stepen odstupanja podataka iz raspodele u odnosu na izabranu meru centralne tendencije. Stoga se ovako definisan koeficijent varijacije može interpretirati kao relativna mera stabilnosti procesa zavarivanja. Vrednosti koeficijenta varijacije jačine struje izračunate su kao količnik prosečnog apsolutnog odstupanja jačine struje od vrednosti modusa jačine struje i same vrednosti odgovarajućeg modusa jačine struje, izraženo u procentima:

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^N |I_i - I_{\text{mod}}|}{N}$$

$$CV = \frac{\delta}{I_{\text{mod}}} \cdot 100$$

gde su:

$\delta$  – prosečno apsolutno odstupanje jačine struje od vrednosti modusa jačine struje

$I_i$  – izmerena vrednost jačine struje

$I_{\text{mod}}$  – vrednost modusa jačine struje

$N$  – ukupan broj merenja,

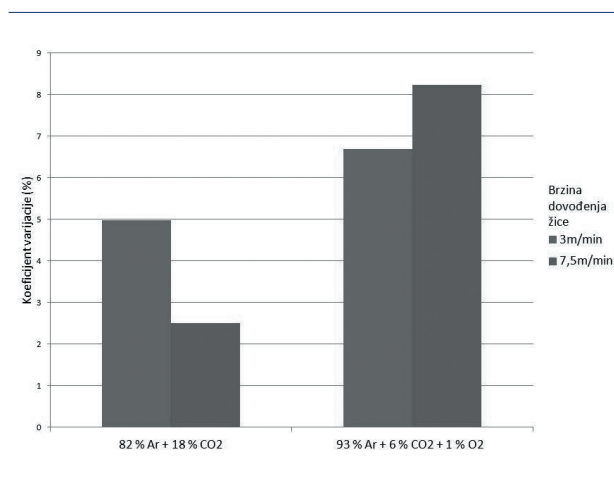
$CV$  – koeficijent varijacije jačine struje u procentima

Statistička analiza ovih vrednosti prikazana je u Tabeli 4.

Struja zavarivanja	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 4
Režim rada (A)	119	228	125	244
Srednji režim (A)	119	232	120	237
Izmerena srednja vrednost (A)	119.463	232.697	118.970	232.682
Standardna devijacija (A)	4.759	5.829	7.967	19.166
Koeficijent varijacije (%)	4.984	2.505	6.696	8.237

Tabela 4. Rezultati statističke analize dobijenih vrednosti

Na Slici 3 prikazano je poređenje koeficijenata varijacije za sve četiri raspodele jačine struje dobijenih merenjem u realnom vremenu tokom zavarivanja.



Slika 3. Poređenje koeficijenata varijacije jačine struje

Na osnovu rezultata prikazanih na Slici 3, može se zaključiti da stabilnost procesa MIG/MAG zavarivanja zavisi od parametara, kao što su vrsta zaštitnog gasa i brzina dovođenja žice (jačina struje zavarivanja).

Pojava rasprskavanja zavisi najviše od jačine struje. Pri nižim vrednostima jačine struje (približno  $I < 180$  A) prenos dodatnog materijala kroz električni luk odvija se u kratkom spoju. Što je veći intenzitet jačine struje u kratkom spoju, to je intenzivnije delovanje radialne komponente elektromagnetne sile (pinch efekat) usled čega je i raskidanje kratkog spoja eksplozivnije. Međutim, pri brzini dodavanja elektrodne žice od 7,4 m/min u zaštitnoj atmosferi 82% Ar + 18% CO<sub>2</sub> (uzorak 2), primetna su značajno manja odstupanja jačine struje u odnosu na vrednost modusa. Ovo se može objasniti tako što sa povećanjem jačine struje dolazi do promene

u načinu prenosa dodatnog materijala kroz električni luk. Umesto prenosa u kratkom spoju, koji je karakterističan za manje vrednosti jačine struje, pri većim vrednostima jačine struje (približno  $180 < I < 360$  A) javlja se mešoviti prenos. Mešoviti prenos podrazumeva da se dodatni materijal kroz električni luk delimično prenosi u kratkom spoju, a delimično krupnim kapima bez kratkog spoja. Usled toga dolazi do smanjenja udela prenosa dodatnog materijala u kratkom spoju, čime se značajno stabilizuje proces zavarivanja jer se smanjuje mogućnost pojave rasprskavanja dodatnog materijala. Osim toga, do stabilizacije procesa zavarivanja dolazi usled smanjenja oscilacija jačine struje, što je karakteristično za slučajeve kapljičastog prenosa dodatnog materijala bez kratkog spoja kroz električni luk.

S obzirom na geometriju i strukturu punjenih elektrodnih žica, kod njih se i pri manjim vrednostima jačine struje može dostići relativno visoka vrednost gustine struje neophodne za njihovo topljenje. Iz tog razloga punjene elektrodne žice se lakše tope, a mešoviti prenos dodatnog materijala kroz električni luk može se ostvariti i pri nižim vrednostima jačine struje.

Osim jačine struje, na stabilnost procesa zavarivanja utiče i zaštitna atmosfera. Sa smanjenjem udela ugljen-dioksida u zaštitnoj smeši smanjuje se veličina kapljica i mogućnost prenosa u kratkom spoju. Međutim, ispitivanje je pokazalo da bez obzira na niži udeo ugljen-dioksida, zaštitna atmosfera 93 % Ar + 6 % CO<sub>2</sub> + 1 % O<sub>2</sub> ne pogoduje za rad sa punjenom elektrodnom žicom (uzorci 3 i 4) jer je stabilnost električnog luka u tom slučaju značajno manja, bez obzira na vrednost jačine struje, odnosno brzinu dovođenja žice. Razlog za ovako značajno smanjenje stabilnosti procesa zavarivanja mogao bi se nalaziti u hemijskom sastavu punjenja elektrodne žice, koje proizvođači dodatnih materijala ne navode u svojim katalozima. Ovim se potvrđuje



preporuka proizvođača da je uz konkretan dodatni materijal neophodno upotrebljavati adekvatno preporučenu smešu zaštitnih gasova ( $15\% < \text{CO}_2 \leq 25\%$ ).

#### 4. ZAKLJUČAK

Na osnovu sprovedenih ispitivanja i dobijenih rezultata, moguće je izvesti sledeće zaključke:

- ◆ Stabilnost procesa MIG/MAG zavarivanja zavisi od parametara, kao što su vrsta zaštitnog gasa i brzina dovođenja žice (jačina struje zavarivanja). Na osnovu međusobnog poređenja koeficijenta varijacije jačine struje zavarivanja, moguće je upoređivati stabilnost procesa zavarivanja i u slučajevima kada se koriste različiti parametri.
- ◆ Upotreba preporučene zaštitne atmosfere ( $82\% \text{Ar} + 18\% \text{CO}_2$ ) pozitivno utiče na varijabilnost struje zavarivanja, kao i povećanje jačine struje, odnosno brzine dovođenja žice (sa povećanjem brzine dovođenja žice, smanjuje se koeficijent varijacije),
- ◆ Zaštitna atmosfera  $93\% \text{Ar} + 6\% \text{CO}_2 + 1\% \text{O}_2$  nije pogodna za zavarivanje u kombinaciji sa korišćenom metalnom punjenom elektrodnom žicom, bez obzira na vrednosti jačine struje, odnosno brzine dovođenja žice. Ova mešavina negativno utiče na stabilnost luka, najverovatnije zbog hemijskog neslaganja pomenute gasne mešavine sa elementima koji se nalaze u sastavu metalnog praha unutar elektrodne žice, a koje proizvođač nije naveo u svom katalogu. Ovim se potvrđuje preporuka proizvođača da je uz konkretan dodatni materijal neophodno upotrebljavati adekvatno preporučenu smešu zaštitnih gasova.

#### ZAHVALNOST

Ovaj rad je proistekao iz rezultata istraživanja na projektu Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije TR 35024.

#### LITERATURA

- [1] Klarić, Š., Samardžić, I., Kladrić, I., MAG welding process-analysis of welding parameter influence on joint geometry, 12<sup>th</sup> International Research/Expert Conference, "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology", TMT 2008, Istanbul, Turkey, 26-30 August 2008., pp.185-188
- [2] Zrilić, B., Pantelić, N., Jovičić, R., Jovičić, D., (2012) Inovacije u tehnologiji zavarivačkog luka, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, Vol.57, No.4, (2012), str.163-167
- [3] Suban M., Tušek J.: Methods for the determination of arc stability, Journal of Materials Processing Technology 143-144, 2003., pp. 430-437
- [4] Lukić, U., Prokić Cvetković, R., Popović, O., Jovičić, R., Burzić, M., Zrilić, B., Mogućnosti savremenih uređaja za zavarivanje MAG/MIG postupkom, International Scientific Conference of IT and Business-Related Research, Synthesis 2015, April 16-17, Belgrade, Serbia, pp. 238-241, ISBN: 978-86-7912-595-8
- [5] Catalog of filler materials for welding, Elektrode Jesenice, Jesenice, 2008
- [6] SRPS EN ISO 14175, Potrošni materijali za zavarivanje - Gasovi i gasne mešavine za zavarivanje topljenjem i srodne postupke, 2009