Broj rada: 4.5
DOI: 10.65156/wws.sjdp.si.021

ISPITIVANJE KVALITETA ŽICE ZA MAG ZAVARIVANJE NELEGIRANIH KONSTRUKCIONIH ČELIKA

EVALUATION OF WIRE QUALITY FOR GMAW WELDING OF LOW-ALLOYED STRUCTURAL STEELS

Medžida Alihodžić[1]
doc. dr. Petar Tasić[1], ORCID broj: 0000-0002-3349-6116
prof. dr. Ismar Hajro[1], ORCID broj: 0000-0001-6148-895X

[1] Univerzitet u Sarajevu – Mašinski fakultet, Vilsonovo šetalište 9, Sarajevo, BiH

E-mail: tasic@mef.unsa.ba

Rezime: MAG postupak zavarivanja je široko rasprostranjen postupak spajanja niskolegiranih konstrukcionih čelika. Uspješnost njegove upotrebe ne zavisi samo od parametara zavarivanja, nego također i od kvaliteta dodatnog materijala, odnosno žice. Ovaj rad predstavlja rezultate eksperimentalnog istraživanja provedenog upotrebom žice istog prečnika i standardne oznake, ali od tri različita proizvođača. Kako bi se izbjegla bilo kakva pristranost, žice su označene jednostavno kao Žica 1, Žica 2 i Žica 3. Zavarene spojeve su napravila dva zavarivača, nezavisno jedan od drugog, koristeći iste setove parametara, s ciljem da se ostvare i različiti načini prenosa metala u luku. Tokom procesa zavarivanja zabilježene su karakteristike luka i nivo buke, dok su vizuelna kontrola i makro ispitivanje presjeka, skupa sa analizom prskanja, izvedeni kasnije. Dodatno, urađena je i hemijska analiza metala šava, dok su zavarivači dali svoje subjektivno mišljenje o ponašanju žice pri zavarivanju. Dobiveni rezultati su analizirani, a nalazi upućuju na to da ne postoji značajna razlika između žica, osim u količini prskanja i penetraciji.

Ključne reči: žica za zavarivanje, prskanje, nivo buke, makro ispitivanje presjeka, hemijski sastav, karakteristike luka

Abstract: Gas Metal Arc Welding is a widely used joining process for low-alloyed structural steels. Its performance depends not only on process parameters but also on the quality of the filler metal, i.e. wire. This paper presents results of experimental research made using wires with the same designation and diameter, made by three different manufacturers. To avoid any bias, wires are designated just as Wire 1, Wire 2 and Wire 3. Welds have been made independently by two welders using the same sets of parameters, in order to achieve different types of metal transfer. Arc characteristics and noise levels have been recorded during welding, while visual inspection and macro examination of welds, together with spatter evaluation, have been made afterwards. In addition, chemical analysis of weld metal has been made, and welders provided their subjective opinions regarding wire performance. The results have been analysed, and findings indicate that there is no significant difference among wires, except in spatter quantity and penetration.

Key words: welding wire, spatter, noise level, macro examination, chemical composition, arc characteristics

1. UVOD

Od industrijske revolucije pa sve do danas, zavarivanje čini jednu od najzastupljenijih tehnologija spajanja, a istraživanja su pokazala da se u razvijenim zemljama u proizvodnji čak dvije trećine zavara izrađuje MAG/MIG postupkom. [1] Najčešće se koristi u brodogradnji, energetici, izradi transportnih uređaja i sredstava, održavanju i popravci teških mašina, te za izradu čeličnih konstrukcija. Kod ovog postupka žica, koja predstavlja dodatni materijal, se kroz pištolj za zavarivanje kontinuirano dovodi na mjesto spoja, gdje se uspostavlja električni luk, ona topi i nastaje šav. Električni luk i kupka su zaštićeni gasom, te na osnovu tipa zaštitnog gasa postoji MAG (eng. *Metal Activ Gas*) i MIG (eng. *Metal Inert Gas*) postupak. [2]

Esencijalni parametri MAG zavarivanja su jačina struje, napon električnog luka i brzina zavarivanja, koji skupa utiču na unos toplote, visinu električnog luka i tip prenosa metala kroz električni luk. Ovo dalje utiče na oblik profila šava, penetraciju, ali i na prskanje istopljenog metala, odnosno parametre od kojih zavisi klasa kvaliteta zavara. Za različite prenose metala je različita i jačina struje zavarivanja, mada postoje i još neki uticajni faktori (na primjer zaštitni gas). [2,3] Kako bi se visina električnog luka održala konstantnom, brzina topljenja žice mora biti jednaka brzini dostavljanja žice. [4]

MAG postupak ima izuzetno veliku produktivnost, ali ona ipak zavisi od brzine zavarivanja, koja se bira na osnovu jačine struje i pozicije zavarivanja. Svaka promjena brzine zavarivanja utiče na profil zavarenog spoja, način prenosa toplote u materijalu, i, posljedično, na njegove mehaničke osobine. S povećanjem brzine zavarivanja, zavar postaje uži i penetracija manja, dok sa smanjenjem brzine zavarivanja zavar postaje širi i penetracija bolja. [3,5]

Jedan od faktora koji je od velike važnosti za produktivnost je i dodatni materijal, odnosno žica. Potrebno je da bude što je više moguće kompatibilna sa osnovnim materijalom, jer s njim stvara cjelinu od koje se zahtijevaju mehaničke osobine i kvalitet. Upotreba neodgovarajuće žice može proizvesti spojeve sklone pukotinama i koroziji. Proizvođači žica daju preporuke za koje osnovne materijale se one mogu koristiti, dok standardi propisuju garantovani hemijski sastav i minimalne mehaničke osobine žice i šava. [2,6] Razvoj žica je složen i skup, s obzirom da ne uključuje samo aspekt njihovog hemijskog sastava i mehaničkih osobina, već i načina njihove proizvodnje, transporta i skladištenja. Čak i male varijacije u hemijskom sastavu mogu imati odlučujući uticaj na ponašanje električnog luka. [5,6] Naravno, ovakve razlike imaju i svoju ekonomsku stranu, gdje se žice svrstavaju u *premium*, *economy* ili *entry* klasu, uz odgovarajuće, ponekad značajne, razlike u cijenama. Pravi problem zavarivačkoj kompaniji je procijeniti da li im se isplati nabavljati skupu *premium* žicu za neko poboljšanje ukupnog rezultata u odnosu na *economy* ili *entry* žicu. Sve one ispunjavaju zahtjeve standarda, imaju sve potrebne certifikate, no da li zaista postoji razlika u zavarivanju koja opravdava razliku u cijeni?

2. EKSPERIMENT

Kako bi se ispitao uticaj žice na proces zavarivanja i osobine zavarenog spoj, izvršena je izrada serije uzoraka upotrebom tri različite žice oznake G 42 C1 3Si1 prema EN ISO 14341, dostavljene od strane tri različita proizvođača. U pitanju su žice prečnika 1,2 mm, koje cijenom spadaju u *premium*, *economy* i *entry* klasu, a njihove oznake u ovom radu su (1), (2) i (3), respektivno. Predmet eksperimentalnog ispitivanja je bila kvantitativna i kvalitativna analiza koja se sastojala od hemijske analize metala šava, snimanja jačine struje i napona, akustičke analize, vizuelne kontrole i procjene prskanja, subjektivne ocjene žice od strane zavarivača, kao i ispitivanje makro presjeka zavarenog spoja.

Osnovni materijal koji je korišten za izradu ispitnih uzoraka je čelik S235JR. Garantovani hemijski sastav ovog čelika je dat u tabeli 1, a garantovane mehaničke osobine u tabeli 2, oboje prema EN ISO 10025-2. [7]

Tabela 1: Garantovani hemijski sastav čelika S235JR prema EN ISO 10025-2 [7]

	C	Si	Mn	Cr	Cu	Al	P	S
S235JR	≤0,17	-	≤1,40	-	≤0,55	-	≤0,035	≤0,0345

Tabela 2: Garantovane mehaničke osobine čelika S235JR prema EN ISO 10025-2 [7]

	R_e (MPa)	R_m (MPa)	A (%)	KV (J) na 20 °C
S235JR	235	360-510	26	27

S235JR je nelegirani konstrukcioni čelik, koji prema EN ISO 15608 pripada grupi 1.1 jer mu je minimalni napon tečenja manji od 275 MPa. [8] Ovaj čelik se isporučuje u toplo valjanom stanju, i ima feritno-perlitnu mikrostrukturu koja mu obezbjeđuje dobru čvrstoću, zavarljivost, duktilnost i zadovoljavajuću žilavost. [9] Za izradu ispitnih uzoraka korištene su pločice dimenzija 100×120 mm, debljine 8 mm.

Uzorci za hemijsku analizu metala šava su pripremljeni tako što je na osnovni materijal dimenzija 80×80 mm navareno dva sloja žice, pri čemu je jedan sloj izveden tehnikom guranja, a drugi tehnikom vučenja kupke, ali bez promjene pravca (prema zahtjevu standarda). Jačina struje je bila 280 A, a brzina zavarivanja 23 cm/min. Dimenzije navara su bile 50×50 mm, koji je nakon izrade obrađen glodanjem i brušenjem kako bi bio spreman za analizu (slika 1).

Izrada svih ostalih uzoraka je izvršena u položenoj (PA) poziciji tehnikom guranja kupke, upotrebom digitalno kontrolisanog uređaja Fronius. Parametri zavarivanja (jačina struje i brzina) za kratki i sprej luk su utvrđeni na osnovu preporuka proizvođača dodatnog materijala i preliminarnih eksperimenata, i dati su u tabeli 3. Pri ovome su uspješno utvrđeni setovi parametara (jačina struje i brzina zavarivanja) takvi da je unos toplote bio isti za sve tri žice, za svako ispitivanje, što je olakšalo analizu i donošenje zaključaka.

Tabela 3: Parametri zavarivanja

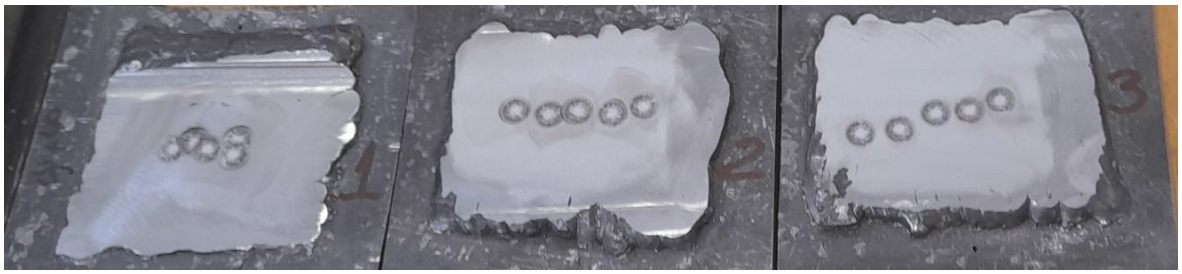
	Jačina struje I (A)		Napon luka U (V)		Brzina zavarivanja w (cm/min)		Unos toplote Q (kJ/mm)	
	Kratki luk	Sprej luk	Kratki luk	Sprej luk	Kratki luk	Sprej luk	Kratki luk	Sprej luk
Žica (1)	160	260	22,0	23,0	18,2	29,7	0,99	1,03
Žica (2)	160	260	22,0	23,0	18,6	28,5	0,97	1,07
Žica (3)	160	260	22,0	23,0	18,1	28,4	0,99	1,07

Kao zaštitni gas korišten je čisti CO_2 (oznaka C prema EN ISO 14175 [10]) sa protokom od 17 l/min, koji je utvrđen u skladu sa preporukama [5].

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Prvo je izvršena hemijska analiza metala navara prema EN 10351. Pripremljeni uzorci su prikazani na slici 1, dok su rezultati dati u tabeli 4. Radi poređenja, naveden je i garantovani hemijski sastav žice prema EN ISO 14341.

Kako se vidi, nema značajnih razlika u hemijskim sastavima navara za sve tri žice. Vidljivo je i da je sadržaj C, Mn i Si u metalu šava za sve tri žice manji od onog koji je propisan standardom, a mogući razlog je njihova uloga u procesu zavarivanja, odnosno dezoksidacija ili čišćenje, te su uklonjeni u vidu staklaste šljake koja je ostala po površini šava.

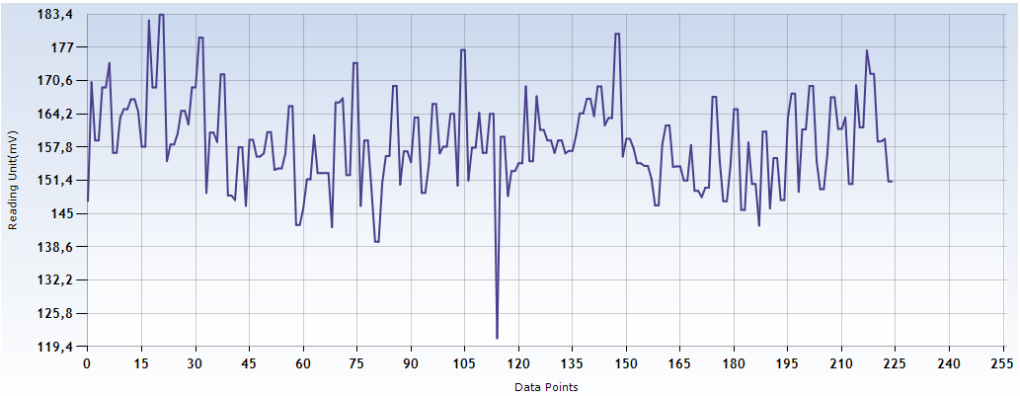


Slika 1: Uzorci navara žica (1), (2) i (3) nakon hemijske analize

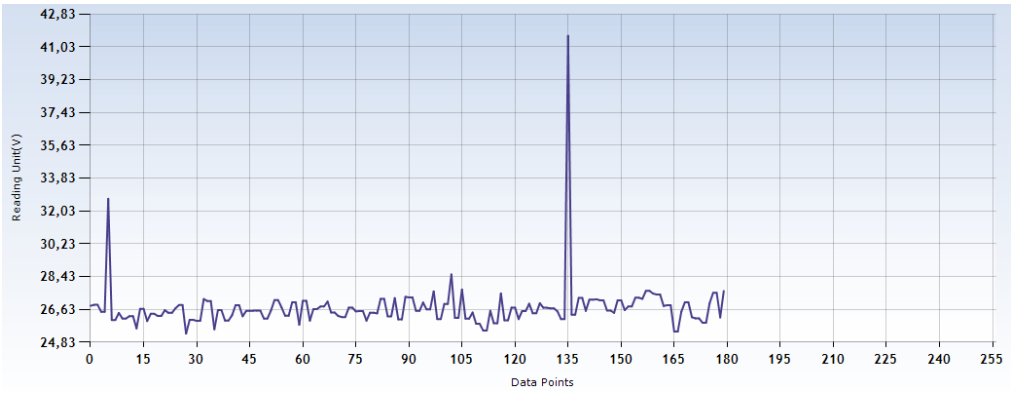
Tabela 4: Hemijski sastav navara i žice

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Cr	Ni	Ti+Zr
Žica (1)	0,04	0,49	0,94	0,003	0,001	0,084	0,001	0,03	0,01	0,011
Žica (2)	0,05	0,46	0,91	0,004	0,001	0,064	0,001	0,02	0,00	0,011
Žica (3)	0,05	0,54	0,98	0,003	0,001	0,052	0,000	0,02	0,00	0,011
Standard	0,06-0,14	0,70-1,00	1,30-1,60	≤0,025	≤0,025	≤0,35	≤0,02	≤0,15	≤0,15	≤0,15

Nakon izvršenog snimanja jačine struje i napona u funkciji vremena dobijeni su dijagrami koji prikazuju te zavisnosti, odvojeno za kratki i sprej luk, i za sve tri žice. Na slikama 2 i 3 su dati ti dijagrami za kratki luk i žicu (1).



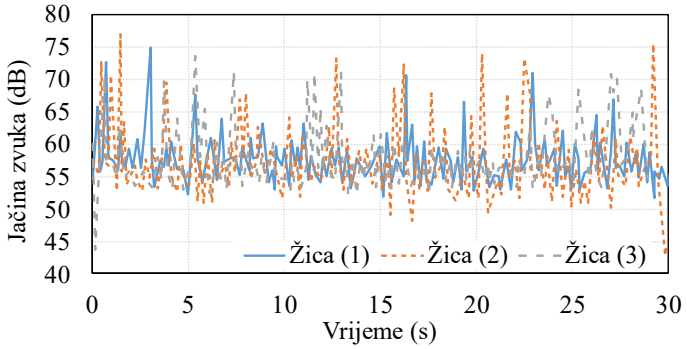
Slika 2: Dijagram zavisnosti jačine struje od vremena za kratki luk i žicu (1)



Slika 3: Dijagram zavisnosti napona od vremena za kratki luk i žicu (1)

Radi obima rada, ispušteni su dijagrami za ostale kombinacije vrste luka i žice, ali se ispostavilo da nema značajnog odstupanja jednog zapisa od drugog. Sve žice su u ovom segmentu pokazale slično ponašanje.

Sličan rezultat je pokazala i akustička analiza procesa zavarivanja, pri kojoj je mjeren intenzitet zvuka tokom trajanja električnog luka, i to minimalni, maksimalni i srednji (u dB). Na slici 4 je prikazan zvučni zapis kratkog luka za sve tri žice. Slični zapisi su dobijeni i za sprej luk, gdje je utvrđeno da postoji nešto veća buka, ali i dalje bez značajnih razlika između pojedinih žica.



Slika 4: Dijagram zavisnosti napona od vremena za kratki luk i sve tri žice

Općenito, analiza jačine struje, napona i zvuka za sve tri žice i oba tipa prenosa metala je pokazala veliko rasipanje rezultata, odnosno nisku vrijednost R^2 (maksimalno 6%), što zapravo govori o tome da ovakav pristup analizi možda i nije sasvim opravdan.

Rezultati ispitivanja subjektivnog mišljenja (ocjene) zavarivača o žicama su također pokazali veliko rasipanje rezultata. Iako su u pitanju samo dva zavarivača, oba su dugogodišnji profesionalci i njihovo mišljenje jeste bitno. Rezultati su dati u tabeli 5, gdje je 1 najniža, a 5 najviša ocjena..

Tabela 5: Subjektivne ocjene zavarivača za žice (1), (2) i (3) za kratki i sprej luk

	Žica (1)		Žica (2)		Žica (3)	
	Kratki luk	Sprej luk	Kratki luk	Sprej luk	Kratki luk	Sprej luk
Zavarivač 1	4,0	4,0	4,5	4,0	5,0	5,0
Zavarivač 2	4,5	4,5	4,0	4,5	4,0	4,0

Ukoliko mišljenje zavarivača jeste subjektivan pokazatelj kvaliteta žice (ponekad možda čak i pristrasan), prskanje kapljica metala prilikom zavarivanja nije. Stoga je izvršeno navarivanje pletenica dužine 100 mm u jednom prolazu, za sve tri žice i oba tipa prenosa metala, i izbrojane su prskotine koje imaju prečnik veći od 1,0 mm. Pri ovome su svi navari bili zadovoljavajućeg estetskog izgleda. Izgled navara za sve tri žice i kratki luk je dat na slici 5, a rezultati analize količine prskanja u tabeli 6. Ono što jeste zabilježeno, ali nije kvantificirano, je da je žica (3) proizvodila najviše dima.

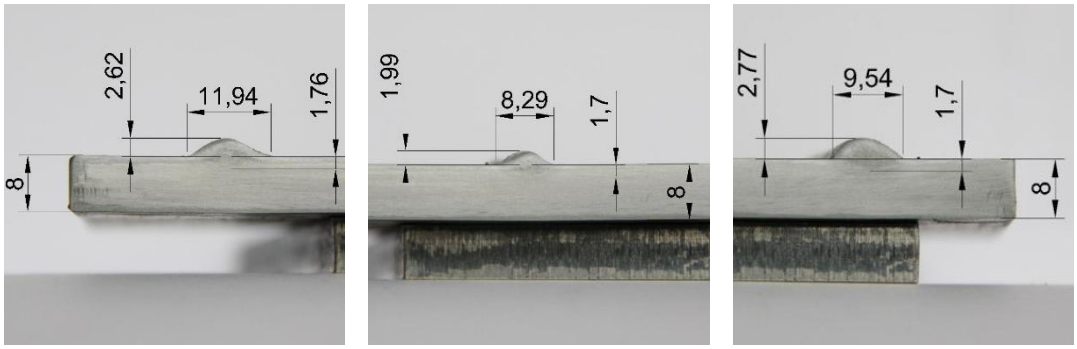
Tabela 6: Broj prskotina

	Kratki luk	Sprej luk
Žica (1)	13	9
Žica (2)	31	13
Žica (3)	21	20

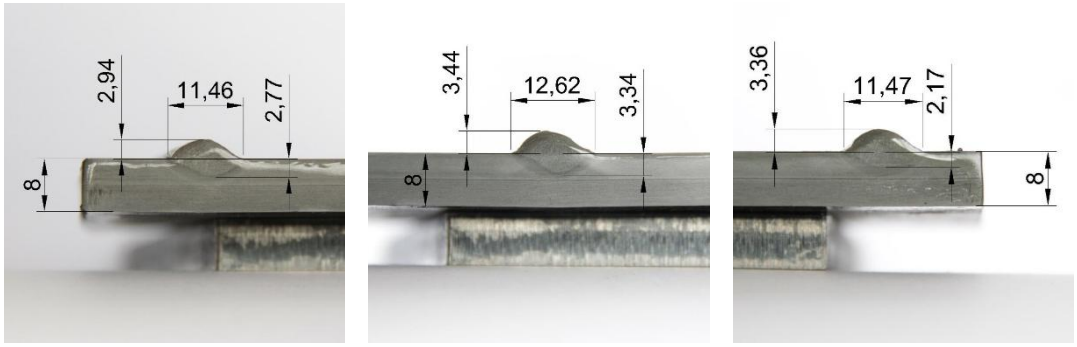


Slika 5: Izgled navarenog uzorka i prskotina za kratki luk za žice (1), (2) i (3)

Zadnje, ali ne i manje važno, analizirani su i makro presjeci navarenih spojeva, a kako bi se izmjerile njihove geometrijske karakteristike, prvenstveno penetracija i širina. Priprema makro presjeka je izvršena prema standardu ISO 17639, odnosno brušenje i poliranje nakon sječenja, te nagrizanje nitalom. Rezultati mjerenja za sve tri žice su dati na slici 6 za kratki luk i slici 7 za sprej luk, s tim da su makro presjeci pripremljeni za uzorke samo jednog zavarivača. Kako se može vidjeti, opet postoje određena odstupanja, i ona su više izražena kod sprej prenosa, posebno za penetraciju.

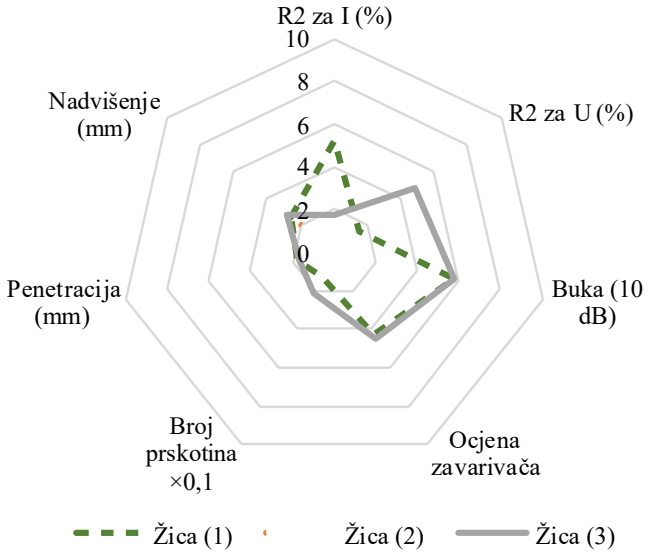


Slika 6: Dimenzije navara za kratki luk za žice (1), (2) i (3)

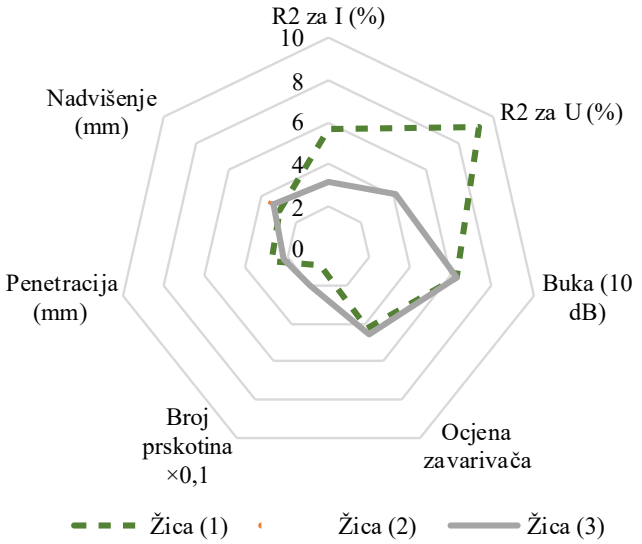


Slika 7: Dimenzije navara za sprej luk za žice (1), (2) i (3)

U slučajevima kakav je ovaj, gdje postoji više različitih i neuporedivih kriterija po kojima se vrši ocjenjivanje, a rasipanje rezultata je značajno, nije jednostavno donijeti odluku o tome koja žica ima najbolji rezultat. Stoga su svi rezultati ubačeni na jedan dijagram, na kojem je svaki posmatrani kriterij dobio svoju osu. Na taj način se može jednostavno i brzo vizualno odrediti najbolja žica. Dijagrami su dati na slici 8 (kratki luk) i slici 9 (sprej luk).



Slika 8: Pregled analiziranih kriterija za sve tri žice i kratki luk (skalirano)



Slika 9: Pregled analiziranih kriterija za sve tri žice i kratki luk (skalirano)

4. ZAKLJUČAK

Danas se MAG postupak koristi za izradu široke palete proizvoda u brojnim granama industrije, te je vrlo bitno i dalje raditi na njegovom razvoju i proučavanju, kako bi se postizali što kvalitetniji zavareni spojevi. Jedan od parametara koji utiče na kvalitet zavarenog spoja, vrijeme zavarivanja i cijenu zavarenog proizvoda je dodatni materijal odnosno žica. U ovom radu je izvršeno kvalitativno i kvantitativno poređenje tri žice istog prečnika i iste klase kvaliteta, a koje spadaju u tri različita cjenovna segmenta. Cilj je ispitati da li se isplati platiti više žicu koja ima iste certifikate kao i jeftinija.

Rezultati hemijske analize su pokazali da sve tri žice daju skoro isti sastav metala šava, bez značajnih odstupanja.

Analiza karakteristika električnog luka, odnosno mjerenje jačine struje, napona i buke, je pokazala da nema uvjerljivog zaključka o najboljoj žici, budući da su rasipanja rezultata velika. Najmanje rasipanje rezultata općenito ima žica (1), osim kada je u pitanju jačina zvuka, gdje je to žica (3). Na osnovu ovoga se može zaključiti da najbolje ponašanje i najstabilniji električni luk ima žica (1).

Izvršeno je ocjenjivanje žica od strane zavarivača, gdje je Zavarivač 1 najbolje ocijenio žicu (3), dok je ista najlošije ocjenjena od zavarivača 2. Zavarivač 2 je najbolje ocijenio žicu (1). Žica (2) ima mješovite ocjene. Očigledno je da postoji značajno odstupanje u subjektivnom dojmu zavarivača; što je konačno bio i jedan od ključnih razloga za istraživanje.

Kratki luk za sve žice daje manju količinu prskanja u odnosnu na sprej luk, ali se pri ispitivanju geometrije navara pokazalo da daje i manju penetraciju. Manja penetracija je dobra ukoliko su u pitanju tanki limovi, međutim za deblje limove potrebno je primjeniti sprej ili mješoviti luk.

Sve tri žice za kratki luk pokazuju skoro iste vrijednosti penetracije. Kada je u pitanju nadvišenje, žice (1) i (3) daju slične vrijednost, dok je za žicu (2) nadvišenje znatno niže. Najveću širinu šava ima žica (1), dok žica (2) ima najmanju. Slična i neuvjerljiva situacija je i pri sprej luku, gdje žice (1) i (3) imaju skoro istu širinu šava, a žica (2) najveću penetraciju Žica (2) i (3) daju približno istu vrijednost nadvišenja, dok žica (1) ima nešto niže nadvišenje.

Nakon svega izloženog u *ovom* radu, može se zaključiti da nema neke određene ključne prednosti niti jedne žice u odnosu na druge, odnosno da nema ubjedljivo najbolje žice između ove tri. S obzirom na to, opravdano je u razmatranje uzeti samo cijenu žica kao kriterij za izbor. Naravno, mnogo bi bolje bilo da se istraživanje proširi na veći broj uzoraka, zavarivača i mjerenja, kako bi se smanjilo rasipanje i eventualno dobio ubjedljiviji rezultat.

ZAHVALA

Autori rada se zahvaljuju Ministarstvu za nauku, visoko obrazovanje i mlade Kantona Sarajevo, koje je u okviru projekta „Istraživanje savremenih modifikacija elektrolučnih postupaka zavarivanja“ (broj 27-02-35-33087-30/24) omogućilo nabavku opreme koja je korištena prilikom istraživanja u okviru ovog rada. Izražavamo veliku zahvalnosti i Institutu za zavarivanje Tuzla na pruženoj tehničkoj pomoći i učešću u eksperimentalnom dijelu istraživanja za ovaj rad.

LITERATURA

[1] Bera, T., The History of Development of Gas Metal Arc Welding Process, Indian Science Cruiser, 2020.
[2] Salama, A., Evaluation of Wires and Testing Methodology for MAG Welding, Chalmers University of Tehnology, Gothenburng, 2012.
[3] Bilandžija, J., Pregled i razvoj dodatnih materijala za MAG zavarivanje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2015.
[4] Pašić, O., Zavarivanje, Svjetlost, Sarajevo, 1998.
[5] The Welding Engineer’s Current Knowledge, GSI-SLV, DVS Media, 2015.
[6] ASM Handbook Vol. 6: Welding, Brazing and Soldering, ASM International, 2004.
[7] EN ISO 10025-2
[8] EN ISO/TR 15608
[9] Hajro, I., Zavarivanje željeznih legura, Mašinski fakultet, Sarajevo, 2019.
[10] EN ISO 14175