



Mislav Štefok^{1,a}, Zoran Kožuh¹, Maja Jurica¹, Ivica Garašić¹, Jadranka Eržišnik¹

UTJECAJ BALANSA POLARITETA AC MIG POSTUPKA NA GEOMETRIJSKE KARAKTERISTIKE NAVARA PRI PREVLAČENJU DUPEKS ČELIKOM

INFLUENCE OF POLARITY BALANCE DURING AC MIG CLADDING ON GEOMETRIC CHARACTERISTICS OF DUPLEX STEEL LAYER

Originalni naučni rad / Original scientific paper

Adresa autora / Author's address:

¹ Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Ul. Ivana Lučića 5, 10000, Zagreb, Hrvatska

email: ^a Mislav.Stefok@fsb.hr

Rad primljen / Paper received:

Avgust 2022.

Rad prihvaćen / Paper accepted:

Novembar 2022.

Ključne reči: AC MIG, navarivanje, balans polariteta, Dupleks 2205, stupanj miješanja

Keywords: AC MIG, cladding, balance polarity, Duplex 2205, dilution rate

Rezime

Modificirani prijenosi metala pri MAG zavarivanju donose niz prednosti u tehnološkom i operativnom smislu. Isto tako, iste je moguće primijeniti i za navarivanje pri čemu je nužno razumjeti utjecaj specifičnih parametara. U ovom radu, s ciljem ispitivanja utjecaja balansa polariteta AC MIG postupka na geometrijske značajke i makrostrukturu sloja pri navarivanju konstrukcijskog čelika kvalitete S355JR žicom dupleks čelika kvalitete 2205 izrađena su tri uzorka s različitim balansima struje. Provedena su ispitivanja geometrije navarenog sloja kao i stupnja miješanja te su prikazani rezultati koji ukazuju na značajne promjene geometrije ovisno o promjeni balansa polariteta.

Abstract

Modified metal transfers in MAG welding bring a number of advantages in terms of technology and operation. Likewise, it is possible to apply the same for cladding, where it is necessary to understand the influence of certain parameters. In this paper, the influence of the polarity balance of the AC MIG process on the geometrical characteristics and macrostructure during cladding of S355JR grade steel with 2205 duplex steel wire was investigated by producing three specimens with different current balances. Tests on the geometry of the welded layer as well as on the dilution rate were performed, and results indicating significant changes in geometry as a function of the change in polarity balance.

Rad je u izvornom obliku objavljen u Zborniku radova sa 32. Savetovanja sa međunarodnim učešćem „Zavarivanje 2022“ održanog na Tari, Srbija od 12. do 15. oktobra 2022. godine



1. Uvod

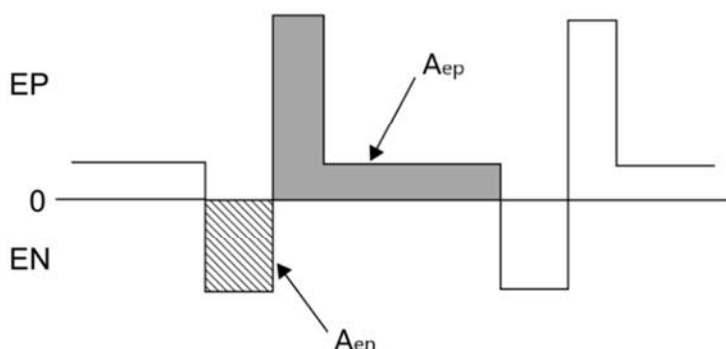
Upotreba i primjena dupleks čelika se svakodnevno intenzivira međutim još uvijek postoji dosta otvorenih pitanja u smislu primjene i ponašanja ove vrste čelika, posebno kada je u pitanju tehnologija zavarivanja i navarivanja. Osim što je cijena dupleks čelika niža od cijene austenitnih čelika slične otpornosti na koroziju, zbog nižeg sadržaja nikla i molibdena, proizvođači stalno unaprjeđuju i izrađuju nove dupleks legure čelika, kao što su lean dupleks čelici [1]. Dupleks čelici imaju izvrsna mehanička svojstva i otpornost na koroziju koju ne mogu postići ni austenitni ni feritni nehrđajući čelici. Iz tih razloga koriste se u najzahtjevnijim okruženjima, kao što su „offshore“ postrojenja, kemijska industrija i druge procesne industrije [2]. AC MIG (Alternating Current Metal Inert Gas) postupak zavarivanja je razvijen u Japanu za zavarivanje tankih limova (automobilska industrija, brodogradnja), ali u Europi nije bio dostupan sve do kasnih 1990-ih [3]. AC MIG je modificirana inačica MIG postupka čija su svojstva dobivena kombinacijom primjenom izmjenične struje za razliku od klasičnog MIG postupka gdje je žica na pozitivnom polu. Glavne prednosti AC MIG postupka zavarivanja nad konvencionalnim MIG zavarivanjem su veći depozit materijala uz manju penetraciju, sposobnost premošćivanja razmaka među pločama te smanjen unos topline [4]. Sve ove značajke mogu bitno utjecati na tehnologiju navarivanja dupleks žice na konstrukcijski čelik pri čemu su opcije upravljanja miješanjem i depozitom na puno višoj razini u odnosu na konvencionalni MAG postupak.

2. Osvrt na značajke AC MIG postupka i dupleks čelika

2.1 AC MIG

Karakteristika AC MIG postupaka zavarivanja su varijabilne promjene polariteta (eng. VP GMAW) zbog čega se mijenjaju količine nataljenog dodatnog materijala te posljedično postiže drugačija distribucija topline na žicu i radni komad. Prednosti koje AC MIG postiže mijenjanjem pozitivnog i negativnog polariteta rezultiraju boljom kontrolom nad geometrijom oblika profila zavara i penetracijom te manjim deformacijama. Jasno je da to čini ovaj proces prihvatljivijim za zavarivanje materijala koji su osjetljivi na unos topline, kao što su to visokočvrsti čelici, aluminij ili nehrđajući čelici. Glavne značajke izmjenične struje su frekvencija i balans polariteta koji se mogu podešavati te je zato nužno kvantificirati njihov utjecaj na svojstva zavarenog spoja. Balans negativnog i pozitivnog polariteta je definiran faktorom EN (elektronegativni period) koji predstavlja omjer perioda u kojem je elektroda na minus polu (-) u odnosu na cijelu periodu AC ciklusa [5] prema izrazu (1) gdje je A_{en} površina negativnog polariteta AC ciklusa a A_{ep} površina pozitivnog polariteta cjelovitog AC ciklusa prema slici 1.

$$EN \text{ omjer} = \frac{A_{en}}{A_{ep} + A_{en}} \cdot 100\% \quad (1)$$



Slika 1. Prikaz faktora balansa polariteta EN [5]

Figure 1. Representation of EN polarity balance factor [5]

2.2. Dupleks čelici

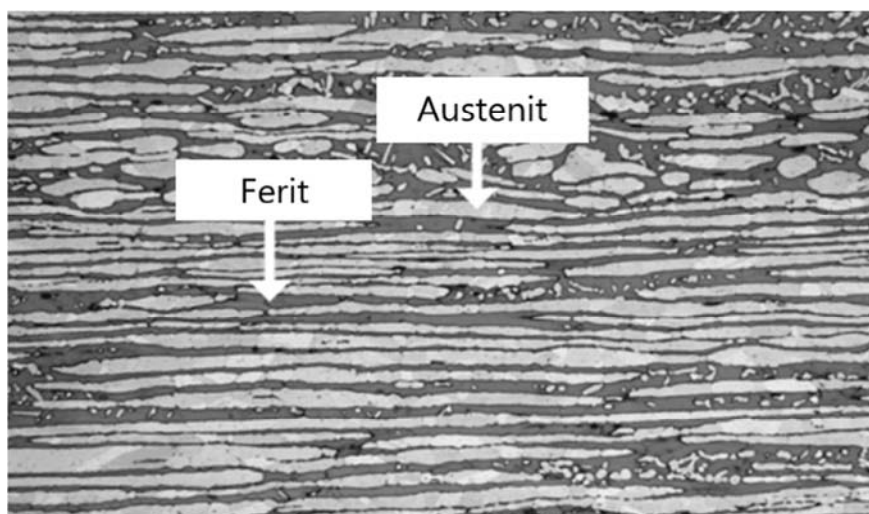
Dupleks čelici ili austenitno-feritni čelici su vrsta nehrđajućih čelika čija je struktura dvofazna, te sadrži oko 40 - 60% ferita, dok je ostatak austenit, slika 2. Karakteriziraju ih izrazito dobra mehanička i antikorozivna svojstva. Iznimno su otporni na

koroziju, posebice na lokalne vrste korozije kao što su rupičasta, interkristalna i napetosna korozija. Osim odličnih antikorozivnih svojstava, dupleks čelici imaju iznimna mehanička svojstva, gdje je primjerice vlačna čvrstoća dupleks čelika gotovo



dvostruko veća nego kod austenitnih i feritnih nehrđajućih čelika. To je iz razloga što je struktura

sitnozrnata, što je puno teže postići u materijalu sa samo jednom fazom [6].



Slika 2. Dvofazna mikrostruktura dupleks nehrđajućeg čelika [7]

Figure 2. Two-phase microstructure of duplex stainless steel [7]

Dupleks čelike se može podijeliti u nekoliko skupina prema kemijskom sastavu, a oznaka PREN (engl. Pitting Resistance Equivalent Number) označava djelotvornu sumu koja se koristi za procjenu otpornosti na rupičastu koroziju, a računa se prema izrazu (2) :

$$\text{PREN} = \% \text{Cr} + 3,3 \times (\% \text{Mo}) + 30 \times (\% \text{N}) \quad (2)$$

Podjela dupleks čelika se može provesti kako slijedi:

1. Dupleks čelici prve generacije – ne sadrže dušik - azot,
2. Dupleks čelici druge generacije – sadrže između 0,1 % i 0,25 % dušika - azota,
3. Dupleks čelici treće generacije – $\text{PREN} \leq 40$,
4. Superdupleks čelici - $40 \leq \text{PREN} \leq 45$,
5. Hiper-dupleks čelici - $\text{PREN} \geq 45$.

Dupleks čelici se smatraju dobro zavarljivim nehrđajućim čelicima. Međutim, za razliku od osnovnih konstrukcijskih čelika zahtijevaju detaljnije poznavanje pojava koje se javljaju tokom zavarivanja, te mehaničkih i korozivskih svojstava nakon zavarivanja. Zavarljivost dupleks čelika uveliko ovisi od unosa topline kao i od parametrima zavarivanja koje je potrebno pažljivo odrediti kako ne bi došlo do feritizacije strukture. Feritizacija strukture je povećani udio feritne strukture (više od 80 %) te je nepoželjna pojava jer dovodi do stvaranja krhkih struktura i smanjenja korozivske postojanosti. Zbog toga se koriste dodatni materijali

predviđeni za zavarivanje dupleks čelika s dodatkom dušika u zaštitnom plinu, čime je moguće postići pozitivan utjecaj na stvaranje austenitne strukture [6].

3. Eksperimentalni rad

U eksperimentalnom dijelu provedeno je AC MIG navarivanje na konstrukcijskom čeliku S355JR (grupa 1.2 prema normi HRI CEN ISO/TR 15608:2018) debljine 10 mm i dimenzije 120x70 mm, s dodatnim materijalom odnosno žicom dupleks čelika debljine ϕ 1,2mm kvalitete 2205 (grupa 9.1 prema normi HRI CEN ISO/TR 15608:2018). Korištena je plinska mješavina argon s dodatkom 2,5% CO₂ Inoxline C2 (grupa M12 po normi EN ISO 14175:2008). Kemijski sastav i mehanička svojstva žice su prikazana u tablicama 1. i 2. Kako bi se kvantificirao utjecaj faktora polariteta EN provedeno je navarivanje s više različitih razina prema dozvoljenom rasponu sinergijskih krivulja izvora struje za zavarivanje. Ostali parametri su držani konstantnim tako što je korišten automatski uređaj za zavarivanje koji je održavao nagib pištolja, brzinu zavarivanja i udaljenost sapnice od radnog komada za sve uzorke, a na izvoru struje su podešeni stalni parametri jakosti struje, napona električnog luka, dinamičke karakteristike kao i protok plina, tablica 3. Izrađena su tri uzorka s različitim EN omjerima s ciljem utvrđivanja EN omjera na geometriju navara kao i stupnja miješanja, tablica 4.

**Tabela 1.** Kemijski sastav žice duplex 2205 [8]**Table 1.** Chemical composition of duplex 2205 wire [8]

Kemijski sastav, element	maseni udio, %
C	≤ 0,020
P	≤ 0,020
Si	0,50
Mn	1,60
S	≤ 0,015
Cr	23,00
Ni	9,00
Mo	3,20
N	0,16

Table 3. Adjusted welding parameters**Tabela 3.** Podešeni parametri navarivanja

Parametar	Oznaka	Vrijednost
Struja	<i>I</i>	160 A
Protok plina	<i>Q</i>	18 l/min
Napon	<i>U</i>	25 V
Brzina zavarivanja	<i>v_z</i>	25 cm/min
Nagib pištolja	<i>/</i>	90°, neutralna tehnika
Slobodni kraj žice	<i>L</i>	15 mm
Brzina dodavanja žice	<i>v_z</i>	8,3 m/min
Dodatni materijal	<i>/</i>	DUPLEKS 2205
Osnovni materijal	<i>/</i>	S355JR
Zaštitni plin	<i>/</i>	Ar + 2,5% CO ₂

Tablica 2. Mehanička i fizikalna svojstva žice duplex 2205 [8]**Table 2.** Mechanical and physical properties of duplex 2205 wire [8]

Mehanička svojstva pri 20°	
Granica razvlačenja <i>R_{p0,2}</i> , MPa	600 (20°C); 420 (300°C)
Vlačna čvrstoća <i>R_m</i> , MPa	750 (20°C); 600 (300°C)
Istezanje <i>A</i> , %	25 (20°C); 20 (300°C)
Udarni rad loma, J	130 (20°C); 50 (-196°C)
Tvrdoća, HV10	240 HV10

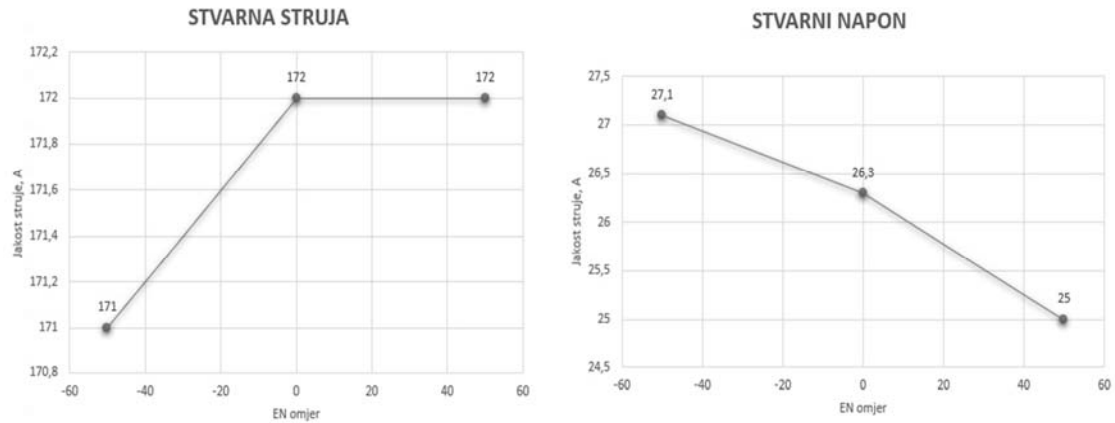
Tablica 4. Vrijednosti balansa polariteta EN prema sinergijskoj krivulji izvora struje**Table 4.** EN polarity balance values according to the synergy curve of the current source

Oznaka uzorka	EN omjer
2	-50
1	0
3	50

Tijekom navarivanja određeni parametri su se mijenjali ovisno o postavki EN omjera. Stvarni parametri jakosti struje i napona u ovisnosti o EN omjeru prikazani su na slici 3. Iz slike se može uočiti kako se s povećanjem EN omjera povećava iznos struje dok se stvarni napon smanjuje što se može pripisati stalnoj promjeni polariteta te nestabilnosti u ionizaciji i stabilnosti električnog luka

Ovisnost promjene brzine dodavanja žice izmjerena je u ovisnosti o promjeni EN omjera.

Zapisane su vrijednosti brzine dodavanja žice za EN omjere u inkrementima od 5 jedinica kako bi se dobio precizan uvid u taj odnos. Ovisnost brzine dodavanja žice o EN omjeru prikazano je na slici 4. Brzina žice raste s porastom EN omjera jer je stopa taljenja žice veća zbog duljeg trajanja negativnog dijela polariteta koji koncentrira veći iznos topline na elektrodi, ali i zbog nešto veće prosječne struje pri većim EN omjerima, te se može zaključiti kako se i povećanjem EN omjera povećava i količina rastaljenog materijala.



Slika 3. Ovisnost jakosti struje i napona o EN omjeru

Figure 3. Dependence of current and voltage of the EN ratio

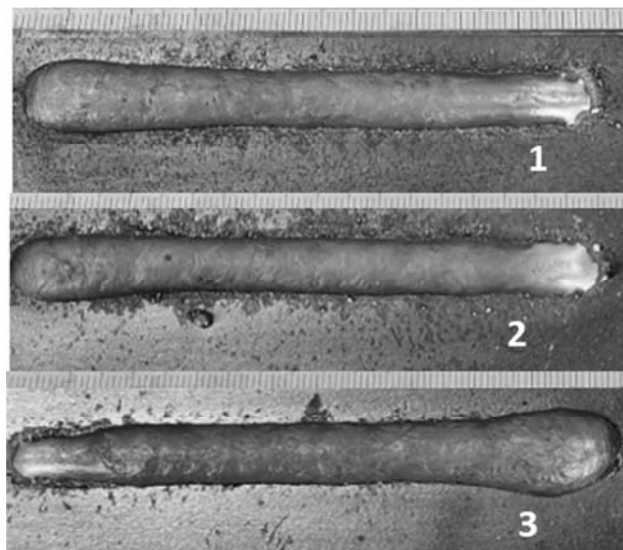


Slika 4. Ovisnost brzine dodavanja žice o EN omjeru

Figure 4. Dependence of wire feeding speed of EN ratio

4. Rezultati i diskusija

Vizualnom kontrolom navara prema zahtjevima HRN EN ISO 17637 nisu uočene površinske pogreške, no može se uočiti kako dolazi do povećanja intenziteta rasprskavanje kapljica s povećanjem EN omjera, slika 5.



Slika 5. Rezultati navarivanja uzoraka (uzorak 1 EN 0, uzorak 2 EN -50 i uzorak 3 EN +50)

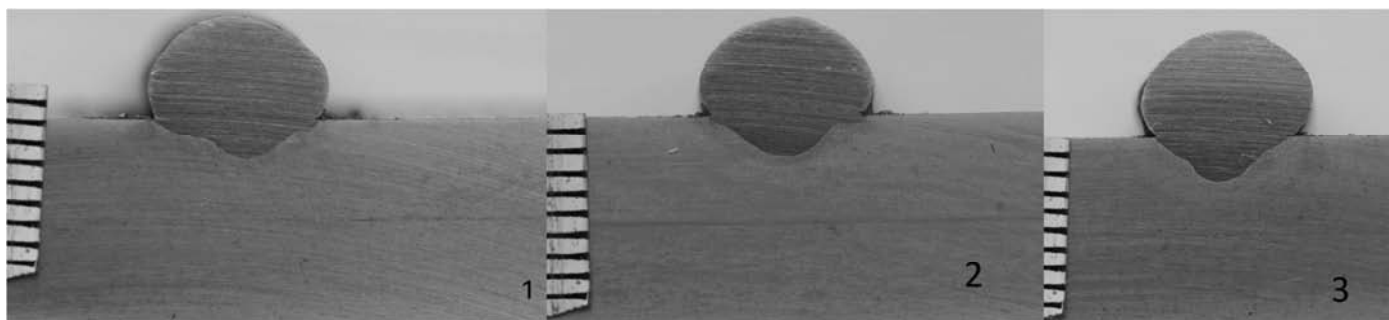
Figure 5. Results of welding samples (sample 1 EN 0, sample 2 EN -50 and sample 3 EN +50)



4.1 Makroanaliza uzoraka

Za brušenje uzoraka su korišteni brusni papiri granulacija navedenim redoslijedom: P100, P150, P240 i P320. Poliranje je izvedeno na stroju Minitech 233 s brzinom rotacije od 300 o/min uz

korištenje vode koja služi za hlađenje i uklanjanje odvojenih čestica. Za poliranje su korišteni brusni papiri granulacija P320, P600, P1000, P2400 i P4000. Slika 6 prikazuje uzorke nakon nagrizanja.



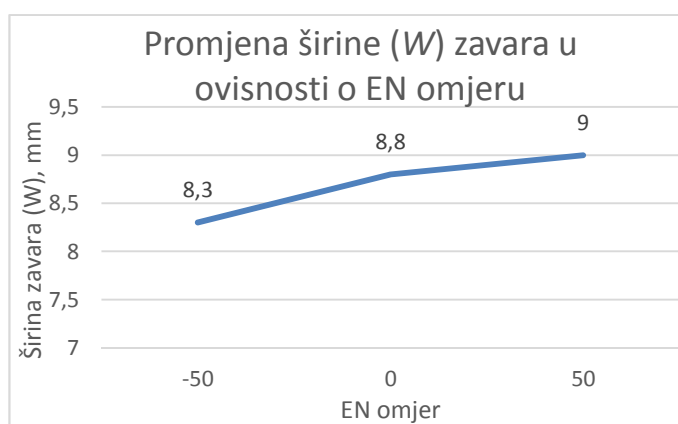
Slika 6. Makroizbrusci nakon poliranja i nagrizanja (uzorak 1 EN 0, uzorak 2 EN -50 i uzorak 3 EN +50)

Figure 6. Macrosamples after polishing and etching (sample 1 EN 0, sample 2 EN -50 and sample 3 EN +50)

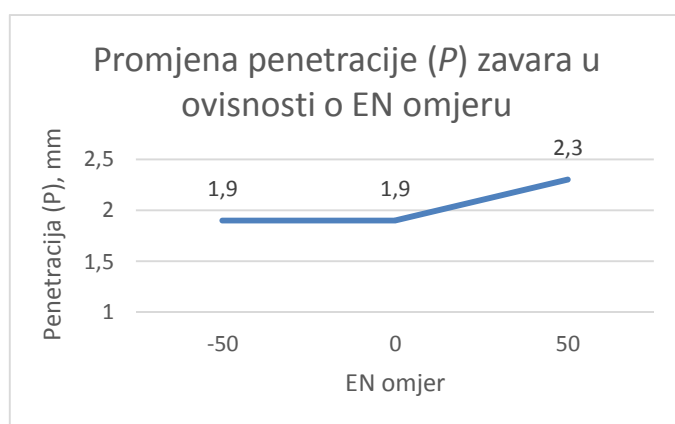
Izlazni parametri makrostrukture, čiji su omjeri analizirani su širina zavara (W), nadvišenje zavara (R) i penetracija (P). Navedeni izlazni parametri računati su mjerenjem duljina linija u programu ImageJ. Poželjna geometrija navara treba biti sa što manjom penetracijom, najvećom širinom zavara te pravilnog nadvišenja zavara. Na dobivenim uzorcima se odmah uočava veliko nadvišenje zavara tj. njegov nepoželjan oblik, a posebno za potrebe navarivanja. To posebno može predstavljati problem kod slaganja i formiranja

navarenog sloja jer je moguće dobiti neprotaljene zone i djelomično naljepljivanje.

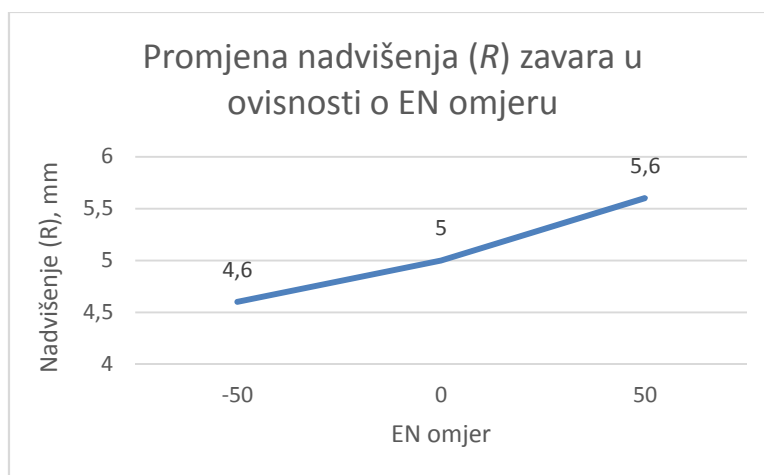
Ipak, kada bi se gledao utjecaj EN omjera na poželjnu geometriju zavara, neki parametri daju bolje rezultate od drugih. Najpoželjniji rezultat bi bio da omjer W/R i W/P budu što veći, odnosno da zavar ima najveću širinu (W), uz najmanju penetraciju (P) i nadvišenje (R). Na slikama 7., 8. i 9. mogu se uočiti generalni trendovi rasta penetracije (W), nadvišenja (P) i širine (R) zavara u ovisnosti o EN omjeru.



Slika 7. Utjecaj EN omjera na širinu zavara (W)
Figure 7. Impact of EN ratio on weld width (W)



Slika 8. Utjecaj EN omjera na penetraciju zavara (P)
Figure 8. Impact of EN ratio on weld penetration (P)

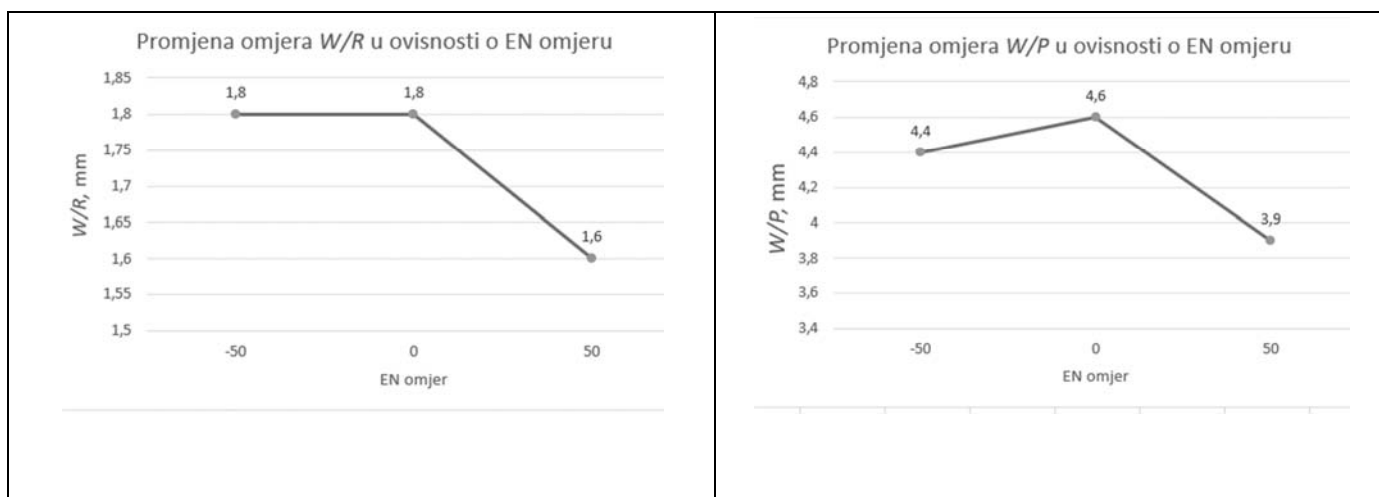


Slika 9. Utjecaj EN omjera na nadvišenje zavara (R)

Figure 9. Impact of EN ratio on weld overhang (R)

Dijagram koji pokazuje ovisnost faktora W/R i W/P o EN omjeru prikazan je na slici 10. Tako najpoželjnije rezultate za faktore W/R daju uzorci s EN -50 i EN 0, dok najbolji rezultat za W/P daje

uzorak navaren EN omjerom od 0 u kojem elektroda provede jednako vrijeme i na pozitivnom i negativnom polu.



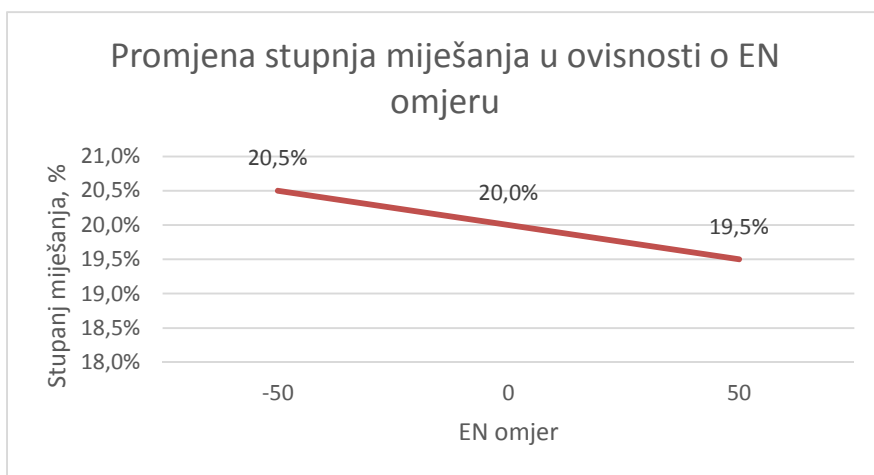
Slika 10. Utjecaj EN omjera na faktore W/R i W/P

Figure 10. Impact of EN ratio on W/R and W/P factors

4.2 Analiza stupnja miješanja

Kako ne bi došlo do prevelike kontaminacije metala navara iz područja osnovnog materijala što rezultira većim rizikom od nastanka krhkih mikrostruktura i pukotina, prijelazna zona treba biti što manja odnosno stupanj miješanja treba biti što manji. Ovo je osobito bitno kod zavarivanja materijala s visokim antikorozivnim svojstvima i ugljičnih feritno-perlitnih čelika [9].

Na slici 11 su grafički prikazani rezultati stupnjeva miješanja u ovisnosti o EN omjeru. Uspoređujući rezultate s dijagrama sa slike 11., pokazano je kako stupanj miješanja blago pada povećanjem balansa polariteta, a najbolji rezultat s najmanjim stupnjem miješanja je dobiven kod uzorka s EN od +50.



Slika 11. Ovisnost promjene stupnja miješanja i EN omjera

Figure 11. Dependence of the change in mixing degree and EN ratio

5. Zaključak

Ispitan je utjecaj balansa polariteta AC MIG postupka zavarivanja s ciljem određivanja najpovoljnije geometrije navara. Navarivan je dupleks 2205 nehrđajući čelik na konstrukcijski čelik S355JR. Dobiveni rezultati se mogu rezimirati kako slijedi:

- Brzina žice raste s porastom EN omjera jer je brzina taljenja žice veća te se može zaključiti kako se i povećanjem EN omjera povećava i količina rastaljenog materijala.
- Prilikom analize geometrije navara najpoželjniji rezultat je da omjer W/R i W/P budu što veći, odnosno da zavar ima najveću širinu (W), uz najmanju penetraciju (P) i nadvišenje (R), što je dobiveno kod uzorka gdje je EN omjer iznosio 0.
- Prilikom analize stupnja miješanja zaključeno je kako stupanj miješanja ima tendenciju pada pri povećanju EN omjera, te je dobiveno kako uzorak s EN omjerom 50 ima najmanji stupanj miješanja, odnosno rezultat koji je najpovoljniji.

Za optimalnu primjenu AC MIG postupka pri navarivanju važno je ustanoviti utjecaj balansa EN polariteta kao bi se postigli što bolji rezultati u industrijskoj primjeni i povećalo razumijevanje ponašanja ovakve modificirane metode prijenosa metala. U daljnjem radu potrebno je uzeti u obzir i druge plinske mješavine te provesti kemijsku analizu metala navara.

5. Conclusion

The influence of the polarity balance of the AC MIG welding procedure was examined with the aim of determining the most favourable welding - cladding geometry. Duplex 2205 stainless steel is cladded to S355JR structural steel. The results obtained can be summarized as follows:

- The speed of the wire increases with the increase in the EN ratio because the melting speed of the wire is higher, and it can be concluded that the amount of melted material also increases with an increase in the EN ratio.
- When analyzing the weld geometry, the most desirable result is that the W/R and W/P ratios are as large as possible, i.e. that the weld has the largest width (W), with the smallest penetration (P) and exceed (R), which was obtained with the sample where the EN ratio was 0.
- During the analysis of the degree of mixing, it was concluded that the degree of mixing tends to decrease when the EN ratio increases, and it was obtained that the sample with an EN ratio of 50 has the lowest degree of mixing, that is, the most favourable result.

For the optimal application of the AC MIG procedure during welding, it is important to establish the influence of the EN polarity balance in order to achieve the best possible results in industrial application and to increase the understanding of the behaviour of this modified method of metal transfer. In further work, it is necessary to take into account other gas mixtures and carry out a chemical analysis of the cladded metal.



Literatura / References

- [1] G. R. Mohammed, M. Ishak, S. N. Aqida, and H. A. Abdulhadi (2017) :“Effects of heat input on microstructure, corrosion and mechanical characteristics of welded austenitic and duplex stainless steels: A review,” Metals (Basel), vol. 7, no. 2, p. 39
- [2] S. S. M. Tavaresa, .C.Scandian, J .M .Pardala, T .S. Luz, F. J. da Silva (2020): Failure analysis of duplex stainless steel weld used in flexible pipes in off shore oil production, Engineering Failure Analysis, vol 17, 1500-1506
- [3] J. E. Talkington, (1998) Variable polarity gas metal arc welding. The Ohio State University
- [4] A. Ikram and H. Chung, (2017): “The effect of EN ratio and current on microstructural and mechanical properties of weld joined by AC-GMAW on square groove butt joints,” Applied Sciences, vol. 7, no. 3, p. 261,.
- [5] L. O. Vilarinho, A. S. Nascimento, D. B. Fernandes, and C. A. M. Mota, (2009): “Methodology for parameter calculation of VP-GMAW: A straightforward procedure is presented for the calculation of welding parameters to reach both arc and metal transfer stability,” Welding Journal, vol. 88, no. 4
- [6] V. Hosseini, (2016):“Influence of multiple welding cycles on microstructure and corrosion resistance of a super duplex stainless steel,” University West,.
- [7] I. Juraga, I. Stojanović, and B. Ljubenkov, (2014): “Experimental research of the duplex stainless steel welds in shipbuilding,” Brodogradnja: Teorija i praksa brodogradnje i pomorske tehnike, vol. 65, no. 2, pp. 73–85
- [8] Migal.CO: Stainless steel welding wire: <https://migal.co/en/products/stainless-steel-welding-wire/4462-2209-ml-2293-nl>, dostupno 30. rujan, 2022
- [9] B. Mateša, I. Samardžić, and M. Dunder, (2011), “Zavarljivost raznovrsnih čelika i primjena Schaeffler-ovog dijagrama“ SBZ 2011 Slavonski Brod, 26. – 28. listopada 2011. p. 233-243

Članstvo u strukovnoj asocijaciji DUZS

je referenca za Vaš profesionalni status

Članarina za 2023. godinu je 3500,00 dinara

Uplatom članarine stičete pravo na beneficirane cene
pretplate časopisa (strana MARKETING)

Tekući račun DUZS: 325-9500600002588-46

Informacije



+ 381 (11) 2420-652 (10-16 h)



duzs011@gmail.com

www.duzs.org.rs