Broj rada: 5.8
DOI: 10.65156/wws.sjdp.si.030

UTJECAJ PARAMETARA TWIN PROCESA ZAVARIVANJA NA KVALITETU ZAVARENIH SPOJEVA

INFLUENCE OF TWIN WELDING PROCESS PARAMETERS ON THE QUALITY OF WELDED JOINTS

dipl.ing.stroj. Mario Jagnjić[1], mag.ing.mech. Krešo Didić[1], Josip Pavić[2], prof.dr.sc Marko Dunđer[3], dr. Tomislav Šolić[3], mag.ing.mech. Iva Deanović[4], dipl.ing.stroj. Josip Mijić[3], dr. Dejan Marić[3]

[1] Đuro Đaković Specijalna vozla d.d., Ulica 108. brigade ZNG 42, Slavonski Brod, Hrvatska
[2] Đuro Đaković Kompenzatori d.o.o.., Ulica 108. brigade ZNG 62, Slavonski Brod, Hrvatska
[3] Sveučilište u Slavonskom Brodu, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Ulica 108. brigade ZNG 36, Slavonski Brod, Hrvatska
[4] Zagreb University of Applied Sciences- TZV, Vrbik 8, 10000 Zagreb, Croatia

E-mail: mario.jagnjic@duro-dakovic.com, dmaric@unisb.hr

Abstract: This paper describes the application of the robotic TWIN welding process as one of the high-performance arc welding processes. Unlike conventional methods, the TWIN system uses two separate wires that are electrically insulated and powered by separate power sources. This configuration allows for the formation of a single weld pool with precise control over the interaction between the electric arcs. The main contributions of implementing this system are reflected in: a significant increase in productivity, achieving higher welding speeds, achieving deeper penetration, and reducing thermal deformations. The practical part of the paper demonstrates the successful implementation of the system at the company Đuro Đaković Specijalna vozila. The basic parameters are described in detail, and a systematic analysis of their impact on joint integrity was conducted. The quality of the performed welds was evaluated through: geometric analysis (checking weld dimensions and shape), hardness testing (analysis of microstructure and mechanical properties in the heat-affected zone - HAZ), and non-destructive testing (NDT) application of ultrasonic testing for the detection of internal imperfections.

Keywords: TWIN, welding parameters, quality

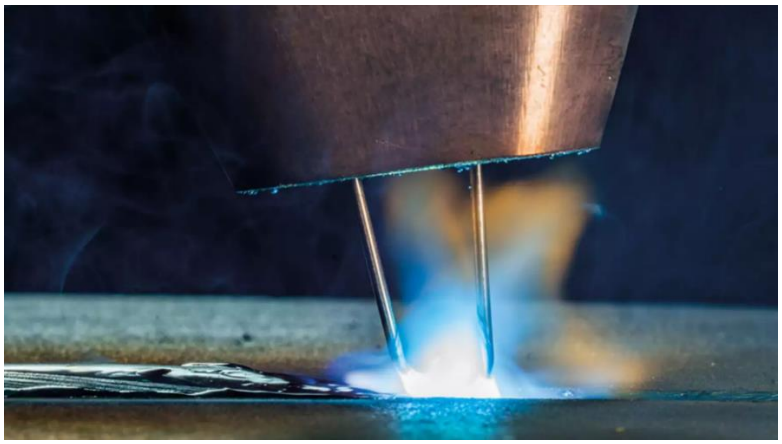
Abstract: U radu je opisana primjena robotiziranoga TWIN procesa zavarivanja kao jednog od visokoučinskih elektrolučnih procesa zavarivanja. Za razliku od konvencionalnih metoda, TWIN sustav koristi dvije odvojene žičane, električki su izolirane i napajane iz zasebnih izvora struje. Ovakva konfiguracija omogućuje formiranje jedinstvene taline uz preciznu kontrolu međusobnog djelovanja električnih lukova kako bi se izbjegao negativan utjecaj. Glavni doprinosi primjene ovog sustava očituju se u: značajnom povećanju produktivnosti, postizanju većih brzina zavarivanja, ostvarivanju dublje penetracije, smanjenju toplinskih deformacija. Praktični dio rada prikazuje uspješnu implementaciju TWIN sustava u tvrtki Đuro Đaković Specijalna vozila kao jednoga od lidera u primjeni novih tehnologija u procesima zavarivanja. Detaljno su opisani osnovni parametri te je provedena sustavna analiza njihovog utjecaja na kvalitetu zavarenih spojeva . Kvaliteta izvedenih zavara evaluirana je kroz: geometrijsku analizu: provjeru dimenzija i oblika zavara, ispitivanje tvrdoće: analizu mikrostrukture i mehaničkih svojstava u zoni utjecaja topline (ZUT), nerazorno ispitivanje (NDT): primjenu ultrazvučne kontrole za detekciju unutarnjih nesavršenosti zavarenih spojeva.

Key words: TWIN, paremetri zavarivanja, kvaliteta zavarenog spoja

1. UVOD

Suvremena industrijska proizvodnja zavarenih konstrukcija postavlja sve veće zahtjeve u pogledu produktivnosti, ponovljivosti procesa i kvalitete zavarenih spojeva. Posebno kod automatiziranih i robotiziranih postupaka zavarivanja povećanje brzine zavarivanja i količine nataljenog materijala mora biti ostvareno bez

narušavanja geometrije zavara i zahtijevanih svojstava zavarenog spoja. Zbog toga određivanje optimalne kombinacije procesnih parametara predstavlja jedan od ključnih zadataka pri razvoju i primjeni visokoproduktivnih postupaka zavarivanja [1].
Jedan od takvih postupaka je tandem, odnosno TWIN MIG/MAG zavarivanje, kod kojega dvije žice (dva dodatna meterijala) i dva električna luka djeluju na zajedničku talinu zavara. Za razliku od konvencionalnog MIG/MAG postupka s jednom žicom, primjena dviju odvojeno upravljanih žica omogućuje povećanje brzine zavarivanja i količine nataljenog materijala te dodatne mogućnosti upravljanja oblikovanjem zavara. Međutim, povećanjem broja neovisno podesivih parametara povećava se i složenost određivanja optimalnih parametara TWIN zavarivanje predstavlja visokoproduktivnu izvedbu MIG/MAG postupka kod koje se koriste dvije odvojeno upravljane žice (dodatni materijal) smještene u zajedničkom gorioniku. Svaka žica ima vlastiti električni luk, dok oba luka djeluju na zajedničku talinu zavara. Takva konfiguracija omogućuje veću količinu nataljenog materijala i veće brzine zavarivanja u odnosu na konvencionalni MIG/MAG postupak s jednom žicom (dodatnim materijalom). Prema tehničkim podacima za TPS/i TWIN sustav, ovisno o konfiguraciji i uvjetima primjene, moguće je postići brzine taljenja do približno 25 kg/h i brzine zavarivanja do približno 4 m/min [2- 4].
Primjena dviju zasebno upravljanih dodatnih materijala istodobno povećava broj procesnih parametara koji mogu utjecati na stabilnost procesa i konačnu geometriju zavara. Zbog toga je pri određivanju odgovarajućih parametara TWIN zavarivanja potrebno promatrati ne samo pojedinačni utjecaj pojedinog parametra nego i njihovo međusobno djelovanje, što predstavlja osnovu za primjenu matematičko-statističkih metoda u ovom radu.



Slika 1. *TWIN zavarivanje s dvije žice i zajedničkom zavarivačkom kupkom [5]*

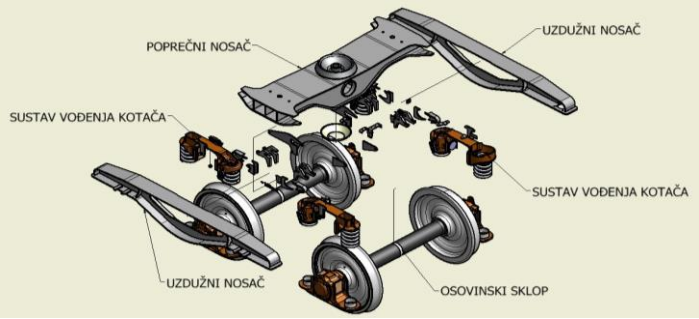
U TPS/i TWIN sustavu moguće je koristiti funkcije za sinkronizaciju impulsnog rada, kao što su Pulse Sync, Pulse Frequency Ratio i Pulse Phase Shift. Njima se usklađuje rad dvaju lukova kako bi se smanjio njihov nepovoljan međusobni utjecaj i omogućio stabilan prijenos dodatnog materijala u zajedničku talinu. [4] Ovakav sustav zavarivanja u tvrtci Đuro Đaković Specijalna vozial primjenjuje se uspješno pri procesu zavarivanja pozicija okretnoga postolja prikaznih na slici 2.



Slika 2. *Okretno postolje u sklopu teretnog vagona [6]*

Osnovni elementi okretnog postolja su osovinski sklop, sustav vođenja kotača, uzdužni nosač i poprečni nosač što je i vidljivo na slici 3 Elementi koji su ovim radom obuhvaćeni a zahtjevaju najveću pozornost prilikom

zavarivanja ali i kontrolnih aktivnosti su uzdužni nosači i sam poprečni nosač. Ovi sklopovi izrađeni su od čelika S355J2+N.



Slika 3 *Osnovni sklopovi okretnog postolja* [6]

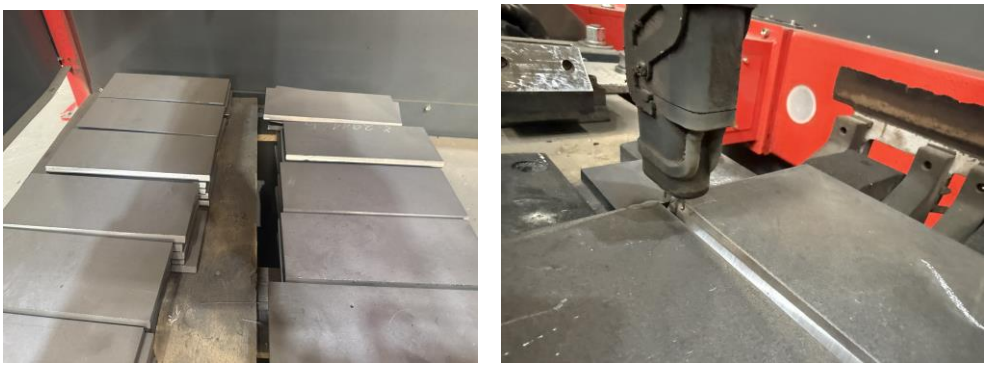
2. EKSPERIMENT

Za izradu eksperimentalnih uzoraka korišten je konstrukcijski čelik S355J2+N, debljine 12 mm. Iz osnovnog materijala izrezani su uzorci dimenzija 125 × 300 mm, nakon čega je provedena priprema rubova za zavarivanje. Kut pripreme iznosio je 25° prikazani uzorci na Slici 4a).
Parametri koji su korišteni pri izradi eksperimentanog dijela prikazani su u tablici 1, pri čemu se vršio sam jedan prolaz.

Tablica 1 *Parametri zavarivanja TWIN proceso zavarivanja*

Uzorak	Brzina zavarivanja	Nos	Vrsta struje žica 1	Vrsta struje žica 2
	cm/min	mm		
1	65	4	Klasični	Pulsni
2	65	4	Pulsni	Pulsni
3	65	4	Pulsni	Klasični
4	65	4	Klasični	Klasični

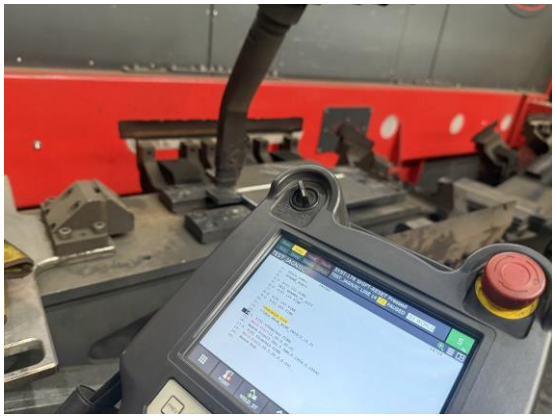
Nakon pripreme uzorci su pozicionirani u robotskoj ćeliji te zavareni TWIN postupkom prema unaprijed određenim kombinacijama procesnih parametara kako je vidljivo na slici 4b). Nakon zavarivanja iz svakog uzorka izrezan je poprečni presjek zavarenog spoja te su izrađeni metalografski izbrusci. Na pripremljenim presjecima izmjerene su širina zavara, dubina penetracije i nadvišenje, a dodatno je na svakom uzorku provedeno šest mjerenja tvrdoće metodom HV10.



a) b)

Slika 4. *Eksperimentalni dio: a)Pripremljeni uzorci od čelika S355J2+N prije zavarivanja b) process zavarivanja*

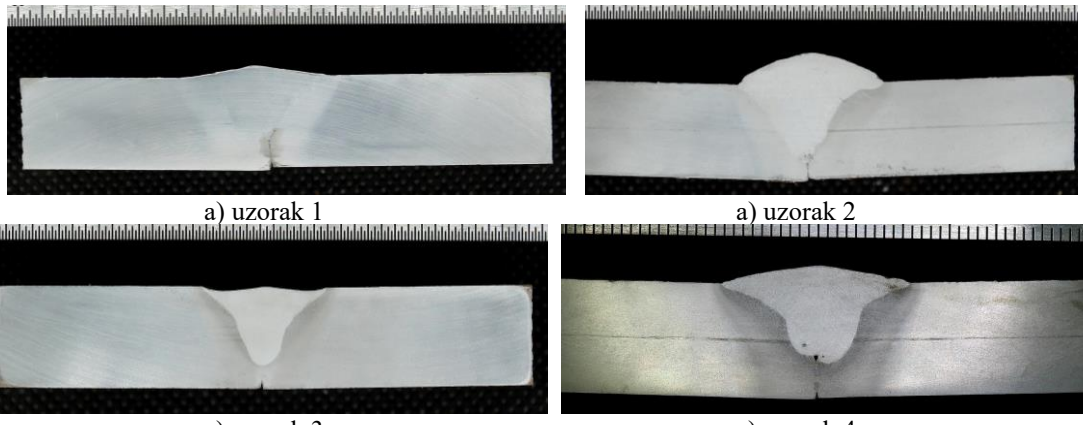
Primjena robotskog zavarivanja imala je važnu ulogu u osiguravanju ponovljivosti eksperimenta. Putanja gorionika, položaj gorionika i brzina zavarivanja mogli su se reproducirati za svaki pokus, čime se smanjuje utjecaj operatera na dobivene rezultate Slika 5.
TWIN sustav koristi dvije zasebno upravljane žice koje djeluju na zajedničku talinu zavara. U ovom eksperimentu posebno je iskorištena mogućnost kombiniranja klasičnog i pulsnog načina rada prve i druge žice. Time su dobivene različite kombinacije načina prijenosa energije i dodatnog materiala.



Slika 5. *Pozicioniranje TWIN gorionika iznad pripremljenog zavarenog spoja i upravljanje tijekom izvođenja eksperimenta*

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Nakon završetka zavarivanja svaki je zavareni uzorak pripremljen za analizu penetracije. Iz zavarenog spoja izrezan je poprečni presjek kako bi se mogao analizirati oblik zavara kroz debljinu osnovnog materijala.
Izrezani presjeci zatim su obrađeni postupkom metalografske pripreme. Površine uzoraka postupno su brušene i polirane kako bi se uklonile nepravilnosti nastale rezanjem i dobila dovoljno ravna površina za analizu zavarenog spoja.
Na slici 6 prikzani su makro uzorci nakon izvršene pripreme, pri čemu su izvršena mjerenja osnovnih gemotrijskih karakteristika zavarenih spojeva te mjerenje tvrdoće što je prikazano u tablici 2.

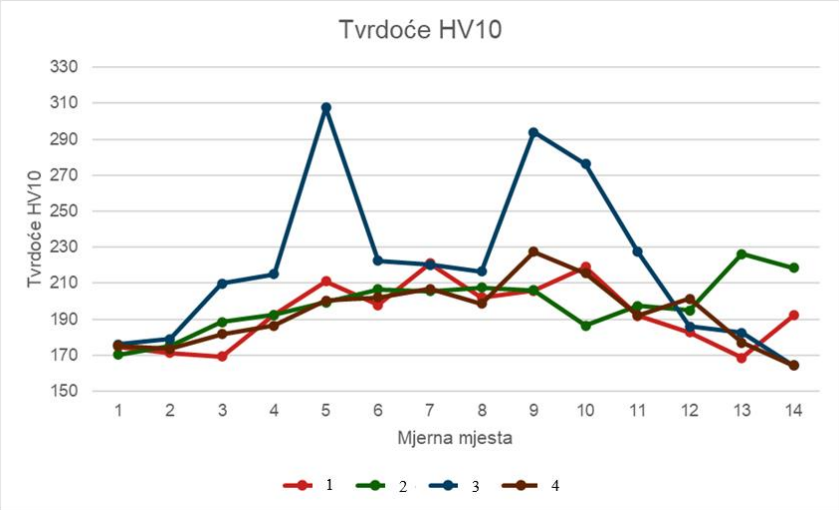


a) uzorak 1 a) uzorak 2

a) uzorak 3 a) uzorak 4

Slika 6. *Makro uzorci*

Tvrdoće su izmjerene vickersovom metodom na uređaju THV-30S a rezultati su prikazani na dijagramu sa slike 7. Sve izmjerene vrijednosti tvrdoća nalaze se unutar područja prihvatljivosti.



Slika 7. *Dijagram izmjerenih tvrdoća na uzorcima*

Geometrijske karakteristike su prikazane u tablici 2.

Tablica 1 *Rezultati geometrijskih karakteristika zavarenih spojeva*

Uzorak	Širina zavara / mm	Dubina penetracije / mm	Nadvišenje / mm
1	18,792	10,341	1,551
2	18,57	13,835	3,867
3	15	9,238	-0,12
4	20,116	10,236	1,994

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu provedeno je ispitivanje utjecaja različitih parametara TWIN postupka zavarivanja na gemetrijska svojstva zavarenog spoja te tvrdoću. Eksperimentalno istraživanje provedeno je na čeliku S355J2+N debljine 12 mm, pri čemu su izvedena ukupno 4 pokusa itvedena TWIN procesom zavarivanja.
Tijekom pokusa mijenjala se vrsta struje prve žice i vrsta struje druge žice dok su ostali parametri zadržavani konstantnim. Na obje žice korišten je klasični ili pulsni način rada. Nakon zavarivanja uzorci su izrezani i pripremljeni za mjerenje, a dobiveni rezultati korišteni su za daljnju analizu.
Posebno su uspoređene različite kombinacije klasičnog i pulsnog načina rada obje žice. Rezultati su pokazali da se promjenom načina rada žica značajno mijenja područje u kojem je moguće postići potrebnu zadovoljavajuću geometriju zavarenoga spoja I tvrdoće unutar zavarenoga spoja. Kao povoljna kombinacija za daljnju optimizaciju pokazao se pulsni način rada na obje žice.
Robotizirani TWIN sustav zavarivanja našao je uspješnu primjenu u tvrtci Đuro Đaković Specijalan vozila d.d. te se kao takav već uspješno primjenjuje pri zavarivanju pozicija okretnog postolja.

LITERATURA

[1] A. Ghosh, S. Hloch. *Prediction and Optimization of Yield Parameters for Submerged Arc Welding Process*", Technical Gazette / Tehnički vjesnik, Vol. 20, No. 2 (2013), str. 213–216.
[2] Fronius International GmbH, *TPS/i TWIN System Welding Know-how*, Version 2024.
[3] Fronius International GmbH, *TPS/i TWIN Push System, Operating Instructions*, 2024
[4] Fronius International GmbH. (2025). *Operating Instructions: TPS/i Robotics welding system TWIN Push / TWIN Push/Pull / TWIN CMT*. 42,0426,0277,EA.

[5] Fronius International GmbH, *Tandem welding has never been so easy*. https://www.fronius.com/en-us/usa/welding-technology/product-information/tpsi-twin-systeme-tandem-welding
[6] Mijat Samardžić, Mario Jagnjić, Dejan Marić, Božo Despotović, Marko Dunđer, Ivan Samardžić. *Zavarivanje Okretnih Postolja Primjenom Visokoučinskog Postupka Zavarivanja*. 2. Međunarodno naučno-stručno savjetovanje ZAVARIVANJE SPAJA „ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE 2023.“ Sarajevo, 25., 26. i 27.10.2023. godine