



ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE

WELDING & WELDED STRUCTURES

God. 64 Vol. 64	Br. 3 No. 3	97-144 97-144	Beograd Belgrade	Srbija Serbia	2019. 2019.
--------------------	----------------	------------------	---------------------	------------------	----------------

ČASOPIS DRUŠTVA ZA UNAPREĐIVANJE
ZAVARIVANJA U SRBIJI

SERBIAN WELDING SOCIETY
QUARTERLY REVIEW

IZLAZI TROMESEČNO

IZDAVAČ / PUBLISHER

**DUZS - Društvo za unapređivanje
zavarivanja u Srbiji**

Adresa: 11000 Beograd, Grčića Milenka 67

Za izdavača / For Publisher

Branislav Lukić, dipl.ing, predsednik DUZS

UREDNIŠTVO / EDITORIAL

Glavni i odgovorni urednik / Editor-in-Chief

Milica Antić, dipl.ing. EWE

duzs011@gmail.com, milicamantic@yahoo.com

Tehnički urednik / Technical Editor

Branislav Lukić, dipl.ing

Redakcijski odbor / Editorial Board

Dr Nenad Radović, dipl.ing.

Dr Radomir Jovičić, dipl.ing.

Dr Bore Jegdić, dipl.ing.

Miloš Pavlović, dipl.ing.

REDAKCIJA I MARKETING / EDITORIAL OFFICE AND MARKETING

Vesna Jović

Grčića Milenka 67, I sprat
11000 Beograd

Tel / Fax + 381 (11) 2420-652
(10-16h)

duzs@eunet.rs

www.duzs.org.rs



UREĐIVAČKI ODBOR / PUBLISHING COUNCIL

Dr Vencislav Grabulov, dipl.ing, (predsednik)

Prof. dr Miroslav Đurđanović, dipl.ing.

Prof.dr Vukić Lazić, dipl.ing.

Doc.dr Ismar Hajro, dipl.ing. (BiH)

Prof.dr Darko Bajić, dipl.ing. (Crna Gora)

Prof. dr Aleksa Blagojević, dipl.ing. (BiH, Republika Srpska)

Prof. dr Sveto Cvetkovski, dipl.ing. (Makedonija)

Doc. dr Tomaž Vuherer, dipl.ing. (Slovenija)

Prof. dr Ivan Samardžić, dipl.ing. (Hrvatska)

Dr Horia Dascau, dipl.ing. (Rumunija)

CIP - Каталогизacija u publikaciji
Nародна библиотека Србије, Београд
621.791

ZAVARIVANJE i zavarene konstrukcije :
časopis Društva za unapređivanje zavarivanja
u Srbiji = Welding & Welded Structures :
Serbian Welding Society quarterly review /
glavni i odgovorni urednik = editor-in-chief Milica Antić. –
Vol. 41, no. 1 (1996)- . - Beograd :
Društvo za unapređivanje zavarivanja u Srbiji,
1996-. (Beograd : VIS studio).-29 cm

Tromesečno.

ISSN 0354-7965 = Zavarivanje i zavarene konstrukcije
COBISS.SR-ID 105396743

CENE I NARUDŽBINA ZA 2019.

Cena pojedinačnog broja 825,00 dinara

Godišnja pretplata 2500,00 dinara

Tekući račun: 325-9500600002588-46

PRICE AND ORDER

Annual subscription: EUR 100

Account No. RS35325960160000041546

OTPVRS22 (VOJVOĐANSKA BANKA AD)

IBAN RS35325960160000041546

ŠTAMPA / PRINTED

“VIS STUDIO” d.o.o.

Aleksinačkih rudara 35, Beograd

Tiraž: 400 kom.

SADRŽAJ

CONTENTS



NAUKA•ISTRAŽIVANJE•RAZVOJ

SCIENCE•RESEARCH•DEVELOPMENT

101

**THE INFLUENCE OF THE TRANVERSE
INCLINATION OF THE MAG WELDING TORCH
ON THE GEOMETRY OF THE ROOT SEAM**

**UTICAJ POPREČNOG NAGIBA GORIONIKA ZA
ZAVARIVANJE MAG NA GEOMETRIJU
KORENOG ŠAVA**

D. Dobraš

NAUKA•ISTRAŽIVANJE•RAZVOJ

SCIENCE•RESEARCH•DEVELOPMENT

113

**PRIMJENA DUPLEKS ČELIKA ZA ADITIVNU
PROIZVODNJU ELEKTRIČNIM LUKOM I ŽICOM**

I. Jurić, I. Garašić, Z. Kožuh, J. Eržišnik, D. Udbinac

NAUKA•ISTRAŽIVANJE•RAZVOJ

SCIENCE•RESEARCH•DEVELOPMENT

123

**IMPORTANT FINDINGS IN WIRE + ARC
ADDITIVE MANUFACTURING**

**ZNAČAJNI NALAZI U ADIKTIVNOJ
PROIZVODNJI ŽICA ZA ELEKTROLUČNO
ZAVARIVANJE**

D. Klobcar, D. Bračun, M. Soković, M. Bušić, S. Baloš, and M. Pleterski

NAUKA•ISTRAŽIVANJE•RAZVOJ

SCIENCE•RESEARCH•DEVELOPMENT

133

**GMA ROOT WELDING OF PEARLITIC RAILS USING
MAGNETIC ARC DEFLECTION**

**GMA ZAVARIVANJE KORENA PERLITNIH ŠINA
KORIŠĆENJEM SKRETANJA MAGNETNOG LUKA**

L. Weingrill, M. Schwald, D. Frühstück, C. Faustmann, N. Enzinger

VESTI

NEWS

100

MEĐUNARODNO TAKMIČENJE ZAVARIVAČA „ARC CUP“ 2019 – LANGFANG-PEKING

120

72. GODIŠNJA SKUPŠTINA MEĐUNARODNOG INSTITUTA ZA ZAVARIVANJE I MEĐUNARODNA KONFERENCIJA, BRATISLAVA, SLOVAČKA, 07-13. jul 2019.

132

MEĐUNARODNO TAKMIČENJE ZAVARIVAČA „ARC CUP“ 2019 – LANGFANG-PEKING - nastavak

144

MARKETING

Poštovani čitaoci,

U ovom broju nastavljamo sa objavljivanjem radova sa Kongresa IIW iz Beograda i prošlogodišnje skupštine na Baliu.

Imaćete priliku da se informišete o događanjima na ovogodišnjoj skupštini IIW koja je održana u Bratislavi, Slovačka.

Naša mala ekipa takmičara uputila se i ove godine na put u Kinu, bez pompe, pripreme i uz već poslovično kratko vreme i nesebičnu pomoć našeg doajena gospodina Nikole Šormaza. A vratili su se...

O tome na stranicama ovog broja

***Glavni i odgovorni urednik
Milica Antić, dipl.ing, EWE***



MEĐUNARODNO TAKMIČENJE ZAVARIVAČA „ARC CUP“ 2019 – LANGFANG-PEKING

U periodu od 04-09.09.2019. održano je 7. međunarodno takmičenje zavarivača službenog naziva „FutureSkills Competition of 2019 Belt & Road and BRICS Skills Development & Tehnology Innovation Competition“.

Takmičenje je održano u Langfangu, gradu udaljenom cca 50km od Pekinga, u Gu'an pokrajini Hebei u organizaciji Beijing ARC Xinxing Science & Technology Co., Ltd., i uz CNPC International Welding Training Centre.

Ekipu koja je predstavljala našu zemlju na 7. međunarodnom takmičenju zavarivača činili su takmičari: Marko Vasilić 1998 god. (postupak 141) radnik preduzeća Marsonija montaža doo Podvinje-Slavonski Brod Dejan Tomić 2000 god. (postupak 111) učenik tehničke škole Kolubara iz Lazarevca, Marko Živković 2001 god. (postupak 135) učenik tehničke škole iz Obrenovca, Branislav Lukić-član upravnog odbora DUZS, vođa ekipe i sudija na takmičenju.

Ukupno je učestvovalo 300 takmičara iz 54 ekipa uključujući i ekipe iz 9 zemalja: Kine, Rusije, Indije, Indonezije, Bugarske, Rumunije, Vijetnama, Irana i **Srbije** itd., ekipe iz preduzeća u državnom vlasništvu Kine, kao i ekipe stručnih koledža iz Kine. Tokom samog takmičenja više od 800 gostiju iz zemlje i inostranstva su bili uključeni u razne aktivnosti vezane za samo takmičenje.

Takmičenje je organizovano u 6 kategorija: postupcima 311, 111, 135, 141, robotsko zavarivanje i zavarivanje gotovog proizvoda (sklop koji je trebalo završiti u kombinaciji postupaka 111, 141 i 136)

Osnova za izradu zavarenih spojeva: standard ISO 9606-1.

Uzorci koje je trebalo uraditi: cevi dimenzija Ø60x4 i ploče debljine 5mm za postupke 311 i 141, a za postupke 111 i 135 trebalo je zavariti cevi Ø133x10 odnosno ploče debljine 10mm.

Za svaki postupak takmičar je imao zadatak da za određeno vreme (postupak 111-180min, postupci 135 i 141 – 160min i postupak 311 – 140min) zavari 3 uzorka i to cevi sučeono u položaju PC, ploče sučeono u položaju PF i ploče ugaono u položaju PE. Takmičari su bili podeljeni u 2 starosne kategorije: 18-25god i 25-35god.

Još jednom je postignut rezultat vredan pažnje.

U pojedinačnoj konkurenciji u kategoriji 18-25god osvojili smo treća mesta u postupcima 111-Tomić Dejan i 135-Živković Marko, koji je ujedno dobio i priznanje kao najmlađi takmičar.

Obojici čestitke na postignutom rezultatu, a svoj trojici čestitam i ovom prilikom zahvaljujem na načinu na koji su predstavljali našu zemlju.

Na neki način može se reći da sada imamo već kontinuitet u rezultatima sa različitih takmičenja (ovo je 5 bronzana medalja, što u pojedinačnoj, što u ekipnoj konkurenciji, sa 4 takmičenja na kojima smo učestvovali)

Još jednom moram ponoviti da postignuti rezultati ne reflektuju, na žalost, sistemski rad koji bi za rezultat trebalo da ima veći kvalitet mladih zavarivača odškolovanih u našim srednjim školama, već predstavlja isključivo rezultat entuzijazma pojedinaca, kako ljudi koji su učestvovali u ovim poslovima, tako i samih takmičara kojima je izuzetno važno bilo da ostvare što bolji rezultat na našim takmičenjima, a još važnije da se pokažu i ne obrukaju i na međunarodnom nivou.

Ekipno, postignuti su sledeći rezultati:

1.	Rusija	Zlatna medalja
2.	Rumunija	Srebrna medalja
3.	Indonezija	Bronzana medalja

Na kraju treba reći da smo na takmičenje uspeli da odemo zahvaljujući pre svega Nikoli Šormazu-članu UO DUZS i Javnom preduzeću Elektroprivreda Srbije. Nikoli koji je po ko zna koji put uložio maksimalne napore da obezbedimo sredstva za odlazak na takmičenje i kolegama iz JP EPS-a koji su prepoznali vrednost učestvovanja naših mladih zavarivača na ovakvim manifestacijama i koji nam je bio generalni sponzor za isto.

OD SRCA IM SE I OVOM PRILIKOM ZAHVALJUJEM.

Branislav Lukić dipl.ing.IWE
Nastavak na strani 132

D. Dobraš^{1,a}

The influence of the transverse inclination of the MAG welding torch on the geometry of the root seam

Uticaj poprečnog nagiba gorionika za zavarivanje MAG na geometriju korenog šava

Originalni naučni rad / Original scientific paper

Rad je u izvornom obliku objavljen u Zborniku sa 4. IIW Kongresa zavarivanja Jugoistočne Evrope „Safe Welded Construction by High Quality Welding“ održanog u Beogradu 10-13. Oktobra 2018

Rad primljen / Paper received:

Jul 2019.

Ključne reči: zavarivanje, MAG gorionik za zavarivanje, bočni nagib, šav

Abstract

When the welding torch is manually guiding, the influence on the quality of the welded joint has a welder or welding operator in automatic or robotized welding. In both cases, due to negligence, ignorance or other objective reasons, there may be deviations from symmetry or source of heat – welding torch or deviations of the axis groove. That is the cause of unevenly heating of the groove side, the asymmetry of the heat impact zone and the welding seam cross-sectional have different mechanical, structural and chemical properties. The asymmetry of the amount of heat input leads to problems in the formation of welding seam and the occurrence of welding errors.

Through the work, is analyzed the influence of the transverse inclination of the MAG welding torch on the geometry of the root seam, represented by the proportion of the melted material of the groove edges.

1. Introduction

When designing welding technology, such as welding position, burner position, electrical arc dynamics and electric arc control, seam parameters, input parameters and heat dissipation from welding zones are essential parameters to be chosen in optimum values so that a precisely defined welded joint meets the set requirements.

2. The position of the burner in relation to the straight joint and welding direction

The geometrical characteristics of the seam and the penetration are influenced by the welding torch position relative to the straight joint, and are determined by the following factors:

- welding direction,
- the angle of the longitudinal slope (angle of movement) is the angle that the part of the burner closes with the reference line perpendicular to the seam, (Fig. 1). It is also the corner of the burner tip relative to the welding direction. The influence of

Adresa autora / Author's address:

¹ University of Banja Luka, Faculty of Mechanical Engineering, Vojvode Stepe Stepanovića 71, 78 000 Banja Luka, Bosnia and Herzegovina

^a dragoslav.dobras@mf.unibl.org

Key words: welding, MAG welding torch, side slope, seam

Rezime

Kada se gorionik za zavarivanje ručno vodi, uticaj na kvalitet zavarenog spoja ima zavarivač ili zavarivač u automatskom ili robotizovanom zavarivanju. U oba slučaja, zbog nepažnje, neznanja ili drugih objektivnih razloga, može doći do odstupanja od simetrije ili izvora toplote za zavarivanje-gorionika ili odstupanja od ose žljeba. To je uzrok neravnomernog zagrevanja strane žljeba, asimetrije zone uticaja toplote i preseka šava koji imaju različita mehanička, strukturna i hemijska svojstva. Asimetričnost količine unesene toplote dovodi do problema u formiranju šava i do pojave grešaka u zavarivanju. Kroz rad se analizira uticaj poprečnog nagiba MAG gorionika za zavarivanje na geometriju korenog šava, predstavljen proporcijom rastopljenog metala ivica žljeba.

1. Uvod

Pri projektovanju tehnologije zavarivanja, parametri kao što su položaj zavarivanja, položaj gorionika, dinamika električnog luka i kontrola električnog luka, parametri šava, ulazni parametri i rasipanje toplote iz zona zavarivanja su bitni parametri koji se biraju u optimalnim vrednostima tako da precizno definisan zavareni spoj ispunjava postavljene zahteve.

2. Položaj gorionika u odnosu na ravnost spoja i smer zavarivanja

Na geometrijske karakteristike šava i uvarivanje utiče položaj gorionika za zavarivanje u odnosu na ravnost spoj, a određuju ih sledeći faktori:

- smer zavarivanja,
- ugao podužnog nagiba (ugao kretanja) je ugao koji deo gorionika zatvara sa referentnom linijom normalnom na šav (Sl. 1). To je takođe ugao vrha gorionika u odnosu na smer zavarivanja. Uticaj ovog ugla na geometrijske karakteristike šava prikazan je na slici 2.



this angle on the geometrical characteristics of the seam is shown in Figure 2.

- transversal inclination - angle of displacement between the burner and the reference line vertical to the seam of the seam, (Fig. 1). For this angle in the literature there is no specific data for the MAG welding process.

- poprečni nagib - ugao pomeranja između gorionika i referentne linije vertikalno na šav, (Sl. 1). Za ovaj ugao u literaturi ne postoje konkretni podaci za MAG postupak zavarivanja

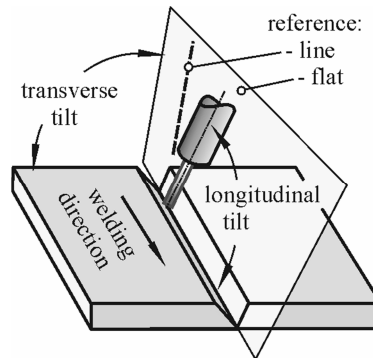


Figure 1. The slope of the burner in relation to the reference line and flat
Slika 1. Nagib gorionika u odnosu na referentnu liniju i rava

The gravity of the burner in the direction of welding can influence the geometrical characteristics of the weld. The forehand technique formed by the seam remains behind the burner, and the protective gas covers only the bath and base material that is heated in front of the burner tip, Figure 2a. Penetration is the smallest and the largest stitch width, with a low gloss and a nice face look. In the backhand technique of torch control, the formed seam remains in front of the burner tip so that the protective gas covers the bath and formed the seam, Figure 2c. This technique provides a convex and narrower seam, with greater overhang and penetration, more rugged face seams, more stable arc and less spreading of additional material. In this technique, the tendency for porosity to appear is lower than in the technique left.

Gravitacija gorionika u smeru zavarivanja može uticati na geometrijske karakteristike zavarenog spoja. Tehnika unapred znači da šav ostaje iza gorionika, a zaštitni gas pokriva samo kupku i osnovni materijal koji se zagreva ispred vrha gorionika, slika 2a. Uvarivanje je najmanje i najveća širina šava, malog sjaja i lepog izgleda lica. U tehnici unazad za kontrolu gorionika, formirani šav ostaje ispred vrha gorionika tako da zaštitni gas prekriva kupku i formirani šav, slika 2c. Ova tehnika obezbeđuje konveksni i uži šav, sa većim pregibom i uvarivanjem, hrapavijim licem šava, stabilnijim lukom i manjim razbrizgavanjem odatnog materijala. U ovoj tehnici, tendencija pojave poroznosti je niža nego kod tehnike u levo.

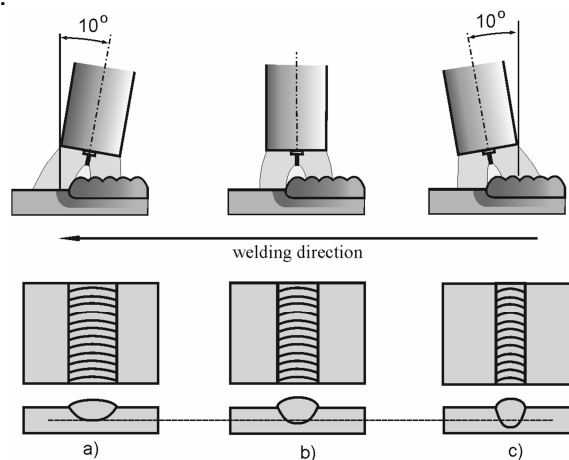


Figure 2. Impact of longitudinal inclination of the burner on the geometrical characteristics of the seam: a) forehand technique - electrode directed in front of the bath b) vertical - electrode is perpendicular to seam c) backhand technique - the electrode is directed to the bath

Slika 2. Uticaj uzdužnog nagiba plamenika na geometrijske karakteristike šava: a) tehnika unapred - elektroda usmerena ispred kupke b) vertikalna - elektroda je normalna na šav c) tehnika unazad - elektroda je usmerena na kupku



The maximum penetration depth is achieved in the horizontal position of welding backhand technique, at a longitudinal angle of about 25° from the vertical or.

The side inclination of the burner leads to: uneven heating of the groove side, sewing problems, welding errors and the unbalance of the heat impact zone (Fig. 3):

Maksimalna dubina prodiranja postiže se u vodoravnom položaju tehnikom zavarivanja unazad, pri podužnom uglu od oko 25° od vertikale. Bočni nagib gorionika dovodi do: neravnomernog zagrevanja stranice žljeba, problema sa slaganjem, grešaka u zavarivanju i neravnotežne zone uticaja toplote (Sl. 3):

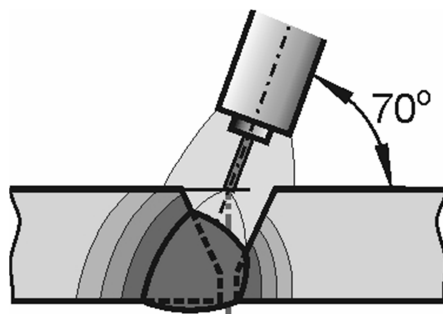


Figure 3. Asymmetry seam and HAZ for skewing axis groove and burners
Slika 3. Asimetrični šav i ZUT u za kosu osu žljeba i gorionika

a) In the lateral inclination of the burner, the electric arc is shifted to a greater extent on one of the side edges of the groove, whereby it is more melted than the other - less heated edge. In this way an asymmetric seam with different mechanical, structural and chemical properties per section is obtained.

b) Between the formed seam and the less heated side of the groove a sharp transition is formed which represents the voltage concentration, while this shape of the seam prevents the proper cleaning of the frame and makes it difficult to form the next passage in the multi-threaded welding.

c) At higher volumes of deposits, the melting excess of excess material may appear, which fades into the side of the groove which is less heated.

d) Due to the increased amount of heat on the side of the heated overflow it may be possible to appear in the joint.

A large number of influencing parameters in the MAG welding process, requires prior testing and selection of influencing parameters. The process was limited in terms of performing the experimental part of the work and sample numbers that would give the qualifying values needed to evaluate the set problem. Repeatability of the set welding parameters required that the experimental part of the work be performed automated or robotically.

All experimental samples were prepared by assembling two plates (length 300 mm, width 150 mm and thickness 8 mm). The panels are welded to the profiles assembled and tightened at both ends, and a gap between the plate is formed. In the center a "V" groove is formed. During the welding of the sample series probes, in the position of the

a) Kod bočnog nagiba gorionika, električni luk se pomera u većoj meri na jednu od bočnih ivica žljeba, pri čemu se topi više od druge - manje zagrejene ivice. Na ovaj način se dobija asimetrični šav različitih mehaničkih, strukturnih i hemijskih svojstava po preseku.

b) Između formiranog šava i manje zagrejene strane žljeba formira se oštar prelaz koji predstavlja koncentraciju napona, dok ovaj oblik šava sprečava pravilno čišćenje i otežava formiranje sledećeg prolaza kod višelojnih šavova.

c) Pri većim količinama depozita, može se pojaviti višak rastopljenog materijala koji upada na stranu žljeba koja je manje zagrejana.

d) Zbog povećane količine toplote sa strane pregrejanog dela, može se pojaviti preliv u spoju.

Veliki broj uticajnih parametara u MAG postupku zavarivanja, zahteva prethodno testiranje i izbor uticajnih parametara. Proces je bio ograničen u pogledu izvođenja eksperimentalnog dela rada i broja uzoraka koji bi dali kvalifikovane vrednosti potrebne za procenu postavljenog problema.

Ponovljivost zadatah parametara zavarivanja zahtevala je da se eksperimentalni deo rada izvodi automatizovano ili robotski

Svi eksperimentalni uzorci pripremljeni su postavljanjem dve ploče (dužine 300 mm, širine 150 mm i debljine 8 mm). Ploče su zavarene u profile postavljene i zategnute na oba kraja, a između ploče se formira zazor. U sredini je formiran "V" žljeb.



burner in favor of the axis of the groove, the problem was the value of the gap between the slab of the experimental samples

- at a gap greater than the diameter of the wire, regardless of the welding speed, there was excessive melting of the edges of the groove, after which the electric arc was poured and the electrode wire passed through the gap,
- in a small gap, the influence of the temperature introduced by the mobile heat source was so high that the temperature tensions caused the deformations that had accumulated the groove and further reduced the gap, so that it was not possible to fully recover the root.

The smallest number of errors was achieved with the value of the gap between the plates equal to the diameter of the electrode wire, so all the samples were prepared with this gap.

Through the experimental part of the work, besides the many variable and influencing parameters set as constant values, three variable parameters have been selected, which can be linearly altered from the bottom to the upper level. In the selected three-stage level, values have been changed:

- transversal inclination of the burner,
- longitudinal inclination of the burner,
- welding current strengths.

An experiment with three variable sizes in three levels, ie type 3^3 experiment, was formed.

The paper analyzes the obtained values of the geometrical characteristics of seams and holes, formed in the "V" rod at MAG welding of the root passage in the horizontal position (Fig. 4). An analysis of the errors and the homogeneity of the seam was made.

Tokom zavarivanja serije uzoraka, u položaju gorionika u osi šava, problem je bila vrednost zazaora između ploče eksperimentalnih uzoraka

- pri zazoru većem od prečnika žice, bez obzira na brzinu zavarivanja, došlo je do prekomernog topljenja ivica žljeba, nakon čega je električni luk bio slab i žica prolazi kroz zazor,
- pri malom zazoru, uticaj temperature koju je uneo mobilni izvor toplote bio je toliko visok da su temperaturna zatezanja izazivala deformacije koje su se nagomilale na žljebu i dodatno smanjile zazor tako da nije bilo moguće potpuno oporaviti koren.

Najmanji broj grešaka postignut je pri vrednosti zazora između ploča jednakog prečniku žice, tako da su svi uzorci pripremljeni sa ovim zazorom.

Kroz eksperimentalni deo rada, pored mnogih promenljivih i uticajnih parametara postavljenih kao konstantne vrednosti, odabrana su tri promenljiva parametra, koja se mogu linearno menjati od dna do gornjeg nivoa. U odabranom nivou od tri faze, vrednosti su promenjene:

- poprečni nagib gorionika,
- uzdužni nagib gorionika,
- jačine struje zavarivanja

Formiran je eksperiment sa tri promenljive veličine u tri nivoa, tj. eksperiment tipa 3^3 .

U radu su analizirane dobijene vrednosti geometrijskih karakteristika šavova i rupa, formiranih u šipki "V" pri MAG zavarivanju korenog prolaza u vodoravnom položaju (slika 4). Izvršena je analiza grešaka i homogenosti šava.

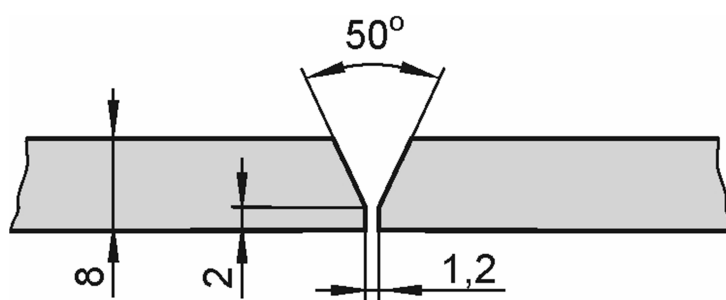


Figure 4. Preparation of the "V" groove
Slika 4. Priprema "V" žljeba

3. Experimental part of the work

In addition to the selected influencing parameters of welding that change through experimental operation, the welding parameters adopted as constant values are:

- basic material of quality S 235 JR thickness 8 mm,
- prepared "V" groove with a gap of 1.2 mm and a 2 mm root canopy,

3. Eksperimentalni deo rada

Pored odabranih uticajnih parametara zavarivanja koji se menjaju u eksperimentu, parametri zavarivanja koji su prihvaćeni kao konstantne vrednosti su:

- osnovni materijal kvaliteta S 235 JR debljine 8 mm,
- pripremljeni "V" žljeb sa zazorom od 1,2 mm i visinom od 2 mm,



- additional material - electrode wire, quality G 42 2 C G3Si1, diameter 1,2 mm,
- a protective gas composition of 82% Ar and 18% CO₂,
- a 12-liter turbine flow rate,
- welding speed - burner movement: 50 cm per minute,
- the top of the burner nozzle with the tip of the leader of the electrode wire,
- positioning of the burner tip at a distance of 6 mm from the upper surface of the experimental sample,
- the length of the free end of the electrode wire is 6 mm,
- device operation mode: no pulse current, with synchronous connection, with start and end current,
- wire electrodes at the plus (+) pole.

The variable parameters were changed in three levels:

- transverse inclination of the burner: 90°, 80° and 70° (Fig. 5)

- dodatni materijal - elektrodna žica, kvaliteta G 42 2 C G3Si1, prečnik 1,2 mm,
 - zaštitni sastav gasa od 82% Ar i 18% CO₂,
 - protok gasa u turbini od 12 litara,
 - brzina zavarivanja - kretanje gorionika: 50 cm u minuti,
 - vrh mlaznice gorionika sa vrhom vođice žice ,
 - postavljanje vrha gorionika na udaljenosti od 6 mm od gornje površine eksperimentalnog uzorka,
 - dužina slobodnog kraja žice je 6 mm,
 - režim rada uređaja: bez impulsne struje, sa sinhronom vezom, sa početnom i krajnjom strujom,
 - žičane elektrode na plus (+) polu
- Promenljivi parametri su promenjeni u tri nivoa:
- poprečni nagib gorionika: 90°, 80° i 70° (Sl. 5)

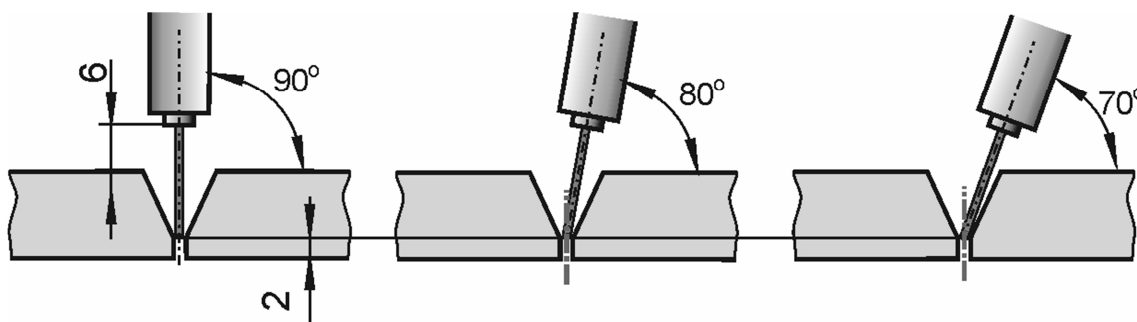


Figure 5. Levels transverse inclination of the burner
Slika 5. Nivoi poprečnog nagiba plamenika

- the longitudinal inclination of the burner; 100°, 90° and 80° (Fig. 6)

- uzdužni nagib gorionika; 100°, 90° i 80° (Sl. 6)

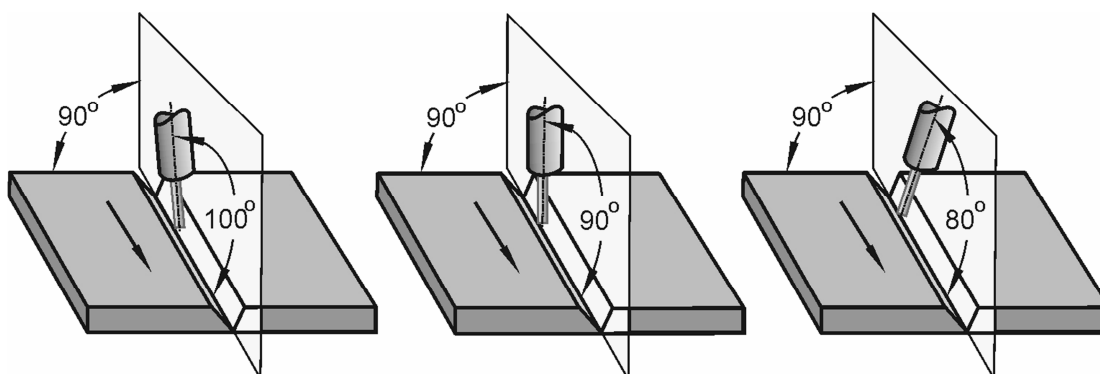


Figure 6. Levels longitudinal inclination of the burner
Slika 6. Nivoi uzdužnog nagiba plamenika

- welding current: 240 A, 230 A and 220 A.
- Based on the selected variable parameters, an experiment matrix was created (Table 1).

- struja zavarivanja: 240 A, 230 A i 220 A.
- Na osnovu izabranih parametara promenljivih, kreirana je eksperimentalna matrica (Tabela 1).



Sample mark	Variation level								
	1. parameter (°)			2. parameter (°)			3. parameter (A)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
K 111	90			100			240		
K 112	90			100				230	
K 113	90			100					220
K 121	90				90		240		
K 122	90				90			230	
K 123	90				90				220
K 131	90					80	240		
K 132	90					80		230	
K 133	90					80			220
K 211		80		100			240		
K 212		80		100				230	
K 213		80		100					220
K 221		80			90		240		
K 222		80			90			230	
K 223		80			90				220
K 231		80				80	240		
K 232		80				80		230	
K 233		80				80			220
K 311			70	100			240		
K 312			70	100				230	
K 313			70	100					220
K 321			70		90		240		
K 322			70		90			230	
K 323			70		90				220
K 331			70			80	240		
K 332			70			80		230	
K 333			70			80			220

Table 1. Sample marks, depending on the level of variable parameters
Tabela 1. Oznake uzoraka, zavisno od nivoa promenljivih parametara

Samples was welding on robot type AX-V4L, with control type AX-C manufacturers OTC - Daihen and power source type VPS 400 digits.

After welding, the crop made metallographic sample preparation for analysis of the geometry of the weld and the HAZ.

For each sample, a mesh was made over the cross-sectional screen (Figure 7), after which a characteristic surface was measured:

- the transverse side of the groove to which the electric arc is directed (left side - 1),
- HAZ on the side of the groove to which the electric arc (zl) is directed,
- Deposits (3),
- the transverse side of the groove to which the burner is inclined (right side - 2),
- HAZ on the side of the slit to which the burner is inclined (zd),
- indentation on the left edge (4l) and right (4d) fit groove.

Uzorci su zavarivani na robotu tipa AKS-V4L, sa kontrolnim tipom AKS-C proizvođača OTC - Daihen i izvorom snage VPS 400 .

Posle zavarivanja, isečen je metalografski uzorak za analizu geometrije zavora i ZUT

Za svaki uzorak napravljena je mreža preko ekrana poprečnog preseka (slika 7), nakon čega je izmerena karakteristična površina:

- poprečna strana žljeba na koji je usmeren električni luk (leva strana - 1),
- ZUT sa strane žljeba na koji je usmeren električni luk (zl),
- depoziti (3),
- poprečna strana žljeba do koje je gorionik nagnut (desna strana - 2),
- ZUT sa bočne strane na koji je gorionik nagnut (zd),
- žljeb na levoj ivici (4l) i žljeb na desnoj (4d) .

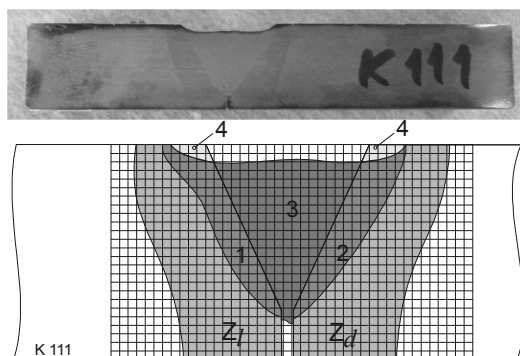


Figure 7. Surfaces obtained by covering seam borders
Slika 7. Površine dobijene prekrivanjem obruba šava

Measured values of individual surfaces are shown in Table 2 and used in mathematical analysis and modeling the impact of the selected variable parameters.

Izmerene vrednosti pojedinih površina prikazane su u Tabeli 2 i koriste se u matematičkoj analizi i modeliranju uticaja odabranih promenljivih parametara.

Sample mark	4l	Zl	1	3	2	Zd	4d
	Surface (mm ²)						
K111	0,61	20,88	6,76	16,50	7,17	21,39	0,65
K112	0,42	21,01	6,50	14,22	6,37	20,50	0,55
K113	0	17,67	4,96	14,39	4,08	18,13	0
K121	0	20,48	12,38	19,80	13,88	21,07	0
K122	0	20,73	9,64	15,41	12,16	22,18	0,18
K123	0	20,46	6,46	14,22	5,40	20,49	0
K131	0,39	27,97	7,96	17,35	5,61	23,40	0,25
K132	0	21,29	7,77	13,34	6,20	20,26	0
K133	0	17,21	4,27	12,87	3,10	16,95	0
K211	0	21,43	11,05	16,87	12,38	16,27	0
K212	0	21,33	8,76	14,91	8,13	16,26	0
K213	0	18,18	3,75	14,59	6,15	19,08	0
K221	0	21,20	4,12	17,07	7,17	20,82	0
K222	0	19,79	7,35	14,78	10,23	18,51	0
K223	0	18,99	4,26	14,88	5,87	16,10	0
K231	0,23	23,49	7,66	19,03	6,95	19,07	0,20
K232	0	21,57	5,20	15,51	7,84	20,64	0
K233	0	13,48	5,30	12,11	8,46	15,10	0
K311	0	19,85	10,09	16,75	9,32	19,43	0
K312	0	19,56	3,64	17,33	8,70	20,35	0,26
K313	0	16,97	3,74	14,44	6,26	18,77	0
K321	0,15	23,63	5,13	18,78	7,13	22,28	0,10
K322	0	18,97	6,14	13,36	9,83	17,75	0
K323	0	13,76	1,87	14,85	6,58	19,70	0,33
K331	0,43	24,14	5,30	14,92	7,13	20,62	0,39
K332	0	22,61	4,51	16,78	8,33	21,40	0
K333	0	17,98	5,48	13,76	7,19	17,81	0

Table 2. Measured surface values
Tabela 2. Izmerene površinske vrednosti

4. Mathematical analysis of experiments

Through the previous planning of the experiment, model 3³ was selected, ie three independently variable factors at three levels.

However, by analyzing the results of the visual inspection as well as the interruption of intervals between the previously selected variables of

4. Matematički model emksperienata

Kroz prethodno planiranje eksperimenta, odabran je model 3³, odnosno tri nezavisno promenljiva faktora na tri nivoa.

Međutim, analizom rezultata vizuelnog pregleda kao i prekida intervala između prethodno izabranih varijabli nezavisno promenljivih varijabli, utvrđeno



independently variable variables, it has been found that the analysis on model 2³ or three independent variable factors on two levels is sufficient to obtain the solution with the required accuracy.

In this sense, from the previously planned three levels, a mathematical analysis will eliminate the middle level at all three influencing parameters.

Table 3 shows the samples used for mathematical analysis.

je da je analiza na modelu 2³ ili tri nezavisna promenljiva faktora na dva nivoa dovoljna da se dobije rešenje sa potrebnom tačnošću.

U tom smislu, iz prethodno planiranih tri nivoa, matematička analiza će eliminisati srednji nivo na sva tri uticajna parametra.

Tabela 3 prikazuje uzorke korišćene za matematičku analizu.

Number of samples	Sample mark	Variation level					
		1. parameter		2. parameter		3. parameter	
		1	2	1	2	1	2
1	K 111	90		100		240	
2	K 113	90		100			220
3	K 131	90			80	240	
4	K 133	90			80		220
5	K 311		70	100		240	
6	K 313		70	100			220
7	K 331		70		80	240	
8	K 333		70		80		220

Table 3. Experimental samples used in mathematical processing of results
Tabela 3. Eksperimentalni uzorci korišćeni u matematičkoj obradi rezultata

Output sizes represent the function of the response, also called the regression equation:

$$Y = f(x_1, x_2, x_3) \tag{1}$$

where: x₁ - transverse inclination of the burner, x₂ - longitudinal burner inclination and x₃ - welding current strength.

For simpler writing of the experimental conditions, for the further mathematical processing of experimental results, the encoded factor level values are used: minus one (- 1) for the first level and plus one (+ 1) for the second level. With this interception interval marking system, all three influencing factors having a continuous domain of definition have been translated into the interval, Table 4.

Izlazne veličine predstavljaju funkciju odgovora, koja se naziva i regresijska jednačina:

$$Y = f(x_1, x_2, x_3) \tag{1}$$

gde je: x₁ - poprečni nagib gorionika, x₂ - uzdužni nagib gorionika i x₃ - jačina struje zavarivanja.

Radi jednostavnijeg pisanja eksperimentalnih uslova, za dalju matematičku obradu eksperimentalnih rezultata koriste se kodirane vrednosti nivoa faktora: minus jedan (-1) za prvi nivo i plus jedan (+1) za drugi nivo. Pomoću ovog sistema obeležavanja intervala presretanja, sva tri faktora koji utiču na kontinuirani domen definicije prevedeni su u interval, Tabela 4.

Number experiment	Encoded values			
	influencing factors			dependent variable
	x ₁	x ₂	x ₃	Y
1	- 1	- 1	- 1	Y ₁
2	- 1	- 1	+ 1	Y ₂
3	- 1	+ 1	- 1	Y ₃
4	- 1	+ 1	+ 1	Y ₄
5	+ 1	- 1	- 1	Y ₅
6	+ 1	- 1	+ 1	Y ₆
7	+ 1	+ 1	- 1	Y ₇
8	+ 1	+ 1	+ 1	Y ₈

Table 4. Mathematics model matrix
Tabela 4. Matrica matematičkog modela



Adequacy of the model is verified by experiment results. For the analysis of the mutual effect of individual factors, a three-factor experiment uses a regression model of the following form:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{123}X_1X_2X_3 \quad (2)$$

To define this regression model, it is necessary to determine the numerical values of the unknown coefficients b_0 , b_1 , b_2 , b_3 , b_{12} , b_{13} , b_{23} and b_{123} .

Coefficients of regression equations are determined on the basis of the test results of the selected experimental samples.

For regression analysis requires two repetitions, but for obtaining the mean value of the results from measurements of a selected surface with two series of metallographic specimens cut from welded plates.

To assess the quality of the weld, as relevant taken the attitude the size of penetration on the left and right side of the joint, and are repeated in a series of samples measured only these values (Table 5).

Adekvatnost modela se potvrđuje rezultatima eksperimenta. Za analizu međusobnog dejstva pojedinih faktora, trofaktorni eksperiment koristi regresijski model sledećeg oblika:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{123}X_1X_2X_3 \quad (2)$$

Da bi se definisao ovaj regresijski model, potrebno je odrediti numeričke vrednosti nepoznatih koeficijenata b_0 , b_1 , b_2 , b_3 , b_{12} , b_{13} , b_{23} i b_{123} .

Koeficijenti regresijske jednačine određuju se na osnovu rezultata ispitivanja odabranih eksperimentalnih uzoraka.

Za regresijsku analizu potrebna su dva ponavljanja, ali za dobijanje srednje vrednosti rezultata merenja odabrane površine sa dve serije metalografskih uzoraka isečenih iz zavarenih ploča.

Da bi se procenio kvalitet zavara, kao relevantan je zauzet stav o veličini prodiranja na levoj i desnoj strani spoja, i ponavljaju se u nizu uzoraka merenih samo ovim vrednostima (Tabela 5).

Sample mark	Surface (mm ²)					
	1			2		
	1 ₁	1 ₂	1 ₃	2 ₁	2 ₂	2 ₃
K111	6,758	6,614	6,464	7,168	7,015	6,843
K113	4,956	4,830	4,721	4,076	3,958	3,894
K131	7,956	7,767	7,593	5,612	5,452	5,354
K133	4,270	4,129	4,088	3,103	3,006	3,008
K311	10,086	9,831	9,579	9,318	9,120	8,917
K313	3,738	3,618	3,611	6,257	6,143	6,016
K331	5,304	5,161	5,081	7,127	7,015	6,795
K333	5,478	5,382	5,266	7,188	7,025	6,834

Table 5. The surface penetration values for all three measurements

Tabela 5. Vrednosti površinskog uvarivanja za sva tri merenja

Values of proportional surface relationships for all three measurements of characteristic surfaces:

$$\begin{aligned} Y_i^I &= 1_1 : 2_1 \cdot 100 (\%), \\ Y_i^{II} &= 1_2 : 2_2 \cdot 100 (\%), \\ Y_i^{III} &= 1_3 : 2_3 \cdot 100 (\%), \end{aligned} \quad (3)$$

and their mean value (\bar{Y}_i) for the selected series of experimental samples are shown in Table 6.

Vrednosti proporcionalnih odnosa površine za sva tri merenja karakterističnih površina

$$\begin{aligned} Y_i^I &= 1_1 : 2_1 \cdot 100 (\%), \\ Y_i^{II} &= 1_2 : 2_2 \cdot 100 (\%), \\ Y_i^{III} &= 1_3 : 2_3 \cdot 100 (\%), \end{aligned} \quad (3)$$

i njihova srednja vrednost (\bar{Y}_i) za odabrani niz eksperimentalnih uzoraka prikazani su u tabeli 6.

Sample mark	Proporcionalni odnos površina			
	Y_i^I	Y_i^{II}	Y_i^{III}	\bar{Y}_i
K111	94,38	94,28	94,46	94,37
K113	121,59	122,03	121,24	121,62
K131	141,77	142,46	141,82	142,02
K133	137,61	137,36	135,91	136,96
K311	108,24	107,80	107,42	107,82
K313	59,74	58,90	60,02	59,55
K331	74,42	73,57	74,78	74,26
K333	76,21	76,61	77,06	76,63

Table 6. Percentage ratio of surface

Tabela 6. Procentualni odnos površine



In practice, there is always a difference between the measured value at a given point and the value obtained by the regression equation. Therefore, the implicit form of regression (2) will be:

$$Y_i - b_0 - b_1x_{1i} - b_2x_{2i} - b_3x_{3i} - b_{12}x_{1i}x_{2i} - b_{13}x_{1i}x_{3i} - b_{23}x_{2i}x_{3i} - b_{123}x_{1i}x_{2i}x_{3i} = \xi_i \quad (4)$$

where the size ξ_i represents the difference between the measured value Y_i at i -point and the one obtained by the regression equation. Regression equation coefficients should be such that these differences are minimized, that is:

$$\sum_{i=1}^8 (Y_i - b_0 - b_1x_{1i} - b_2x_{2i} - b_3x_{3i} - b_{12}x_{1i}x_{2i} - b_{13}x_{1i}x_{3i} - b_{23}x_{2i}x_{3i} - b_{123}x_{1i}x_{2i}x_{3i})^2 = 0 \quad (5)$$

A minimum of some functions, if any, is obtained from the condition that the partial runs at all unknown coefficients are at the same time equal to zero:

$$\frac{\partial U}{\partial b_0} = 0; \quad \frac{\partial U}{\partial b_1} = 0; \quad \dots, \quad \frac{\partial U}{\partial b_{123}} = 0 \quad (6)$$

The values needed to calculate regression coefficients are given in Table 7.

U praksi uvek postoji razlika između izmerene vrednosti u datoj tački i vrednosti dobijene regresijskom jednačinom. Stoga će implicitni oblik regresije (2) biti:

$$Y_i - b_0 - b_1x_{1i} - b_2x_{2i} - b_3x_{3i} - b_{12}x_{1i}x_{2i} - b_{13}x_{1i}x_{3i} - b_{23}x_{2i}x_{3i} - b_{123}x_{1i}x_{2i}x_{3i} = \xi_i \quad (4)$$

pri čemu veličina ξ_i predstavlja razliku između izmerene vrednosti Y_i u i -tački i one dobijene jednačinom regresije. Koeficijenti regresijske jednačine bi trebalo da budu takvi da su te razlike svedene na minimum, odnosno:

$$\sum_{i=1}^8 (Y_i - b_0 - b_1x_{1i} - b_2x_{2i} - b_3x_{3i} - b_{12}x_{1i}x_{2i} - b_{13}x_{1i}x_{3i} - b_{23}x_{2i}x_{3i} - b_{123}x_{1i}x_{2i}x_{3i})^2 = 0 \quad (5)$$

Minimum nekih funkcija, ako ih ima, dobijen je iz uslova da su delimični prolazi kod svih nepoznatih koeficijenata, istovremeno jednaki nuli

$$\frac{\partial U}{\partial b_0} = 0; \quad \frac{\partial U}{\partial b_1} = 0; \quad \dots, \quad \frac{\partial U}{\partial b_{123}} = 0 \quad (6)$$

Vrednosti potrebne za izračunavanje koeficijenata regresije date su u Tabeli 7.

Sample mark	\bar{Y}_i	$\bar{Y}_i x_{1i}$	$\bar{Y}_i x_{2i}$	$\bar{Y}_i x_{3i}$
K111	94,37	-94,37	-94,37	-94,37
K113	121,62	-121,62	-121,62	121,62
K131	142,02	-142,02	142,02	-142,02
K133	136,96	-136,96	136,96	136,96
K311	107,82	107,82	-107,82	-107,82
K313	59,55	59,55	-59,55	59,55
K331	74,26	74,26	74,26	-74,26
K333	76,63	76,63	76,63	76,63
Σ	813,23	-176,71	46,51	-23,71
Sample mark	$\bar{Y}_i x_{1i}x_{2i}$	$\bar{Y}_i x_{1i}x_{3i}$	$\bar{Y}_i x_{2i}x_{3i}$	$\bar{Y}_i x_{1i}x_{2i}x_{3i}$
K111	94,37	94,37	94,37	-94,37
K113	121,62	-121,62	-121,62	121,62
K131	-142,02	142,02	-142,02	142,02
K133	-136,96	-136,96	136,96	-136,96
K311	-107,82	-107,82	107,82	107,82
K313	-59,55	59,55	-59,55	-59,55
K331	74,26	-74,26	-74,26	-74,26
K333	76,63	76,63	76,63	76,63
Σ	-79,47	-68,09	18,33	82,95

Table 7. Values needed to calculate regression coefficients

Tabela 7. Vrednosti potrebne za izračunavanje koeficijenata regresije

After entering values from Table 7 into equations for calculating unknown regression factors:

$$\begin{aligned} b_0 &= \left(\sum_{i=1}^8 Y_i \right) / 8 & b_1 &= \left(\sum_{i=1}^8 Y_i x_{1i} \right) / 8 \\ b_2 &= \left(\sum_{i=1}^8 Y_i x_{2i} \right) / 8 & b_3 &= \left(\sum_{i=1}^8 Y_i x_{3i} \right) / 8 \\ b_{12} &= \left(\sum_{i=1}^8 Y_i x_{1i}x_{2i} \right) / 8 & b_{13} &= \left(\sum_{i=1}^8 Y_i x_{1i}x_{3i} \right) / 8 \\ b_{23} &= \left(\sum_{i=1}^8 Y_i x_{2i}x_{3i} \right) / 8 & b_{123} &= \left(\sum_{i=1}^8 Y_i x_{1i}x_{2i}x_{3i} \right) / 8 \end{aligned} \quad (7)$$

Nakon unosa vrednosti iz Tabele 7 u jednačine za izračunavanje nepoznatih regresijskih faktora:

$$\begin{aligned} b_0 &= \left(\sum_{i=1}^8 Y_i \right) / 8 & b_1 &= \left(\sum_{i=1}^8 Y_i x_{1i} \right) / 8 \\ b_2 &= \left(\sum_{i=1}^8 Y_i x_{2i} \right) / 8 & b_3 &= \left(\sum_{i=1}^8 Y_i x_{3i} \right) / 8 \\ b_{12} &= \left(\sum_{i=1}^8 Y_i x_{1i}x_{2i} \right) / 8 & b_{13} &= \left(\sum_{i=1}^8 Y_i x_{1i}x_{3i} \right) / 8 \\ b_{23} &= \left(\sum_{i=1}^8 Y_i x_{2i}x_{3i} \right) / 8 & b_{123} &= \left(\sum_{i=1}^8 Y_i x_{1i}x_{2i}x_{3i} \right) / 8 \end{aligned} \quad (7)$$



their values are obtained:

$$b_0 = + 101,65; b_1 = - 22,09; b_2 = + 5,81; b_3 = - 2,96; b_{12} = - 9,93; b_{13} = - 8,51; b_{23} = + 2,29; b_{123} = + 10,37$$

on the basis of which a regression model (8) is obtained in coded coordinates:

$$Y_i = 101,65 - 22,09x_1 + 5,81x_2 - 2,96x_3 - 9,93x_1x_2 - 8,51x_1x_3 + 2,29x_2x_3 + 10,37x_1x_2x_3 \quad (8)$$

After checking the significance of the regression coefficients and the adequacy of the model, it can be seen that all coefficients significant and adequate model.

Returning to the natural coordinates, we obtain the equations of the functional dependence of the transverse inclination of the burner (P) in function of the longitudinal inclination of the burner and the power of the current:

- longitudinal inclination of burners 100° and current strength 240 A:

$$Y = 100,09 + 0,67 P \quad (9)$$

- longitudinal inclination of burners 100° and current strength 220 A:

$$Y = 89,59 - 3,10 P \quad (10)$$

- longitudinal inclination of burners 80° and current strength 240 A:

$$Y = 107,13 - 3,39 P \quad (11)$$

- longitudinal inclination of burners 80° and current strength 220 A:

$$Y = 105,79 - 3,02 P \quad (12)$$

The date functions can be drawn in the diagram shown in Figure 8.

njihove dobijene vrednosti su:

$$b_0 = + 101,65; b_1 = - 22,09; b_2 = + 5,81; b_3 = - 2,96; b_{12} = - 9,93; b_{13} = - 8,51; b_{23} = + 2,29; b_{123} = + 10,37$$

na osnovu kojeg se dobije regresijski model (8) u kodiranim koordinatama

$$Y_i = 101,65 - 22,09x_1 + 5,81x_2 - 2,96x_3 - 9,93x_1x_2 - 8,51x_1x_3 + 2,29x_2x_3 + 10,37x_1x_2x_3 \quad (8)$$

Posle provere značaja regresijskih koeficijenata i adekvatnosti modela, može se videti da su svi koeficijenti značajni a model adekvatan.

Vraćajući se prirodnim koordinatama, dobijamo jednačine funkcionalne zavisnosti poprečnog nagiba plamenika (P) u funkciji uzdužnog nagiba plamenika i jačine struje:

- uzdužni nagib gorionika 100° i jačina struje 240 A:

- uzdužni nagib gorionika 100° i jačina struje 220 A:

- uzdužni nagib gorionika 80° i jačina struje 240 A:

- uzdužni nagib gorionika 80° i jačina struje 220 A:

Funkcije se mogu nacrtati na dijagramu prikazanom na slici 8.

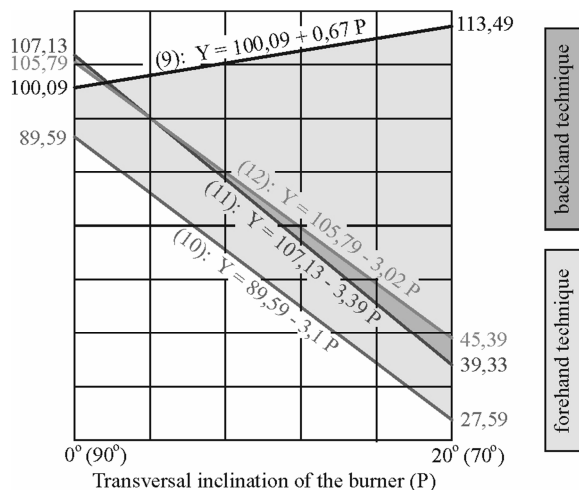


Figure 8. The function graph is defined by the continuity of the surface interval

Slika 8. Grafikon funkcije definisan je kontinuitetom površinskog intervala

5. Conclusion

Taking into account that the levels for all three variables included continuous areas of change, that is, the start and end limits of varying intervals of certain influencing factors, for the values that can be varied within the variation interval, the output size will have the value between two directions on

5. Zaključak

Uzimajući u obzir da nivoi za sve tri promenljive uključuju neprekidna područja promene, odnosno početne i krajnje granice različitih intervala određenih uticajnih faktora, za vrednosti koje mogu varirati u intervalu varijacije, veličina izlaza će imati vrednost između dva smera na grafikonu.



the graph.

This means that the two directions, with the same technique of welding, a different current, limiting the area of the chart inside the can for any value of current in the interval of variation (for a given value of lateral inclination of the burner) to determine the functional relation of the dependent parameter - the relationship molten gutter.

The width of the interval defines the influence of the influence on the current. If the influence of the variation interval of the current current is higher then the width of the interval is higher. Worth and vice versa.

The increase in the interval indicates that the rise in the lateral inclination value increases and the percentage of the prewired base material of the groove side increases.

The percentage ratio of the overlapped webs of the spine determines the geometrical characteristics of the shape of the seam and the HAZ, the size and layout of the crystal structure and their mechanical characteristics.

Due to the greater penetration and symmetry seam, regardless of the value of the lateral inclination of the torch, the roots passage recommended application backhand techniques.

When working forehand technique, it is desirable that the part of the burner be in the straight vertical perpendicular to the seam - a fast lateral inclination.

References

Literatura

- [1] Dobraš D., The doctoral dissertation, " Investigation of the influence of transverse inclination of burners in modern welding methods MAG" was defended in 2012 at the Faculty of Mechanical Engineering of the University of Banja Luka

To znači da dva pravca, istom tehnikom zavarivanja, različitim jačinama struje, ograničavaju područje grafikona unutar karte za bilo koju vrednost struje u intervalu varijacije (za datu vrednost bočnog nagiba gorionika) za određivanje funkcionalnog odnosa zavisnog parametra - odnos rastopljenog žljeba.

Širina intervala definiše uticaj na struju. Ako je uticaj intervala varijacije trenutne struje veći, tada je širina intervala veća. Vredi i obrnuto.

Povećanje intervala ukazuje da se povećava vrednost bočnog nagiba i povećava procenat prethodno vezanog osnovnog materijala na strani žljeba.

Procentualni odnos preklopljenih mreža određuje geometrijske karakteristike oblika šava i ZUT, veličinu i raspored kristalne strukture i njihove mehaničke karakteristike.

Zbog većeg uvarivanja i simetričnog šava, bez obzira na vrednost bočnog nagiba pištolja, za koreni prolaz je preporučljiva tehnika nanošenja unazad.

Kada se radi tehnikom unapred, poželjno je da deo gorionika bude u vertikali normalno na šav - brz bočni nagib.



I. Jurić^{1,a}, I. Garašić¹, Z. Kožuh¹, J. Eržišnik¹, D. Udbinac¹

Primjena dupleks čelika za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom

Originalni naučni rad / Original scientific paper

Rad je u izvornom obliku objavljen u Zborniku sa 4. IIW Kongresa zavarivanja Jugoistočne Evrope „Safe Welded Construction by High Quality Welding“ održanog u Beogradu 10-13. Oktobra 2018

Adresa autora / Author's address:

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

^aivan.juric@fsb.hr

Rad primljen / Paper received:

Jul 2019.

Ključne reči: aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom, WAAM, MAG zavarivanje, dupleks

Key words: wire arc additive manufacturing, WAAM, MAG welding, duplex

Sažetak

Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom novi je koncept proizvodnje zasnovan na izradi metalnih komponenti dodavanjem materijala sloj po sloj. U usporedbi s konvencionalnim proizvodnim tehnologijama, aditivna proizvodnja omogućuje značajne uštede u materijalu, što je naročito izraženo kod skupih materijala kao što su dupleks nehrđajući čelici. Izrada uzoraka aditivnom proizvodnjom električnim lukom i žicom izvršena je uporabom konvencionalnog MAG postupka zavarivanja. Stabilnost procesa je bila glavni kriterij za određivanje optimalnih parametara zavarivanja. Kako bi se ispitao utjecaj zaštitnog plina, uzroci od dupleks čelika izrađeni su uz upotrebu četiri različite plinske mješavine. Na uzorcima je ispitana kvaliteta površine, homogenost i postignuta mikrostruktura izrađene komponente.

1. Uvod

U današnjem vremenu sveprisutne globalizacije gdje je izražena velika dostupnost informacija, znanja, roba i usluga, ali i prisutna izuzetno velika konkurencija, povećanje kvalitete proizvoda, fleksibilnost pri razvoju i proizvodnji te racionalizacija troškova nužni su uvjeti za opstanak na tržištu. Uz sve navedeno, važno je spomenuti konstantno povećanje potrošnje visokokvalitetnih materijala čija proizvodnja zahtjeva velike količine energije i značajna financijska sredstva. Navedene činjenice dovode do zaključka da je razvoj novih proizvodnih tehnologija neophodan. Kao jedan od rezultata tog razvoja pojavljuje se novi koncept proizvodnje, aditivna proizvodnja.

Aditivna proizvodnja proizvodni je postupak koji se bazira na nanošenju čestica materijala sloj po sloj. Postupak omogućuje pretvorbu ideje u gotov proizvod u kratkom vremenu uz uštedu materijala i eliminaciju međukoraka poput izrade posebnih alata ili kalupa, zamjene alata itd.

Povijesno gledajući, suvremeni postupci aditivne proizvodnje prošli su nekoliko faza s obzirom na njihovu primjenu. U početku primjene ti su se

postupci uglavnom koristili za brzu izradu prototipova. Pojam „brzo“ treba shvatiti uvjetno jer je za proizvodnju potrebno od nekoliko minuta do nekoliko dana. Međutim, uspoređujući s klasičnom proizvodnjom, ukupno trajanje proizvodnog ciklusa kod aditivne proizvodnje je kraće. Proizvodi načinjeni tim postupcima uglavnom su se rabili za unapređivanje procesa razvoja proizvoda [1].

Kako je vrijeme ključ uspjeha na tržištu, iznimno je važno što ranije plasirati proizvod na tržište. Ranijim izlaskom na tržište ostvaruje se prednost nad konkurencijom u smislu definiranja cijene proizvoda. Također, raniji izlazak na tržište nudi bolje marketinške prilike i brži povrat sredstava uloženi u razvoj. Budući da aditivna proizvodnja skraćuje vrijeme od ideje do plasiranja gotovog proizvoda na tržište, nameće se kao vrlo perspektivan proizvodni postupak u budućnosti. Činjenica da u moderno doba, uz smanjenje vremena izrade, životni vijek proizvoda opada, nameće zaključak da je potrebno dodatno razvijati fleksibilne proizvodne sustave.

Područje primjene aditivne proizvodnje vrlo je široko, od proizvoda široke namjene preko automobilske i zrakoplovne industrije do arhitekture. U automobilskoj i zrakoplovnoj industriji aditivni postupci omogućuju izradu metalnih dijelova složene geometrije. Ti su dijelovi često manje mase i boljih karakteristika nego dijelovi proizvedeni klasičnim proizvodnim postupcima. Sa stajališta uštede energije i smanjenja emisije štetnih plinova svako olakšanje konstrukcije je poželjno s obzirom da broj automobila i zrakoplova neprestano raste. Aditivna je proizvodnja efikasan način izrade dijelova od skupih materijala poput titana i nikla i njihovih legura koji se primjenjuju u zrakoplovnoj industriji. Mogućnost potpune automatizacije procesa aditivne proizvodnje iz



modela što omogućuju CAD/CAM sustavi, čime se smanjuje vrijeme proizvodnje i ljudski rad, još je jedna od prednosti AM pred klasičnim postupcima. Iako program za CNC stroj može biti automatski generiran iz CAD modela, za dijelove složene geometrije potrebno je nekoliko prihvata obratka čime se povećava vrijeme rukovanja, broj stezanja obratka i proces umjeravanja nakon prihvata [2].

Uz navedene prednosti, aditivna proizvodnja ima i neke nedostatke. Glavni nedostatak je kvaliteta površine koja uglavnom zahtjeva dodatnu obradu. Nadalje, dodavanje materijala sloj po sloj može uzrokovati anizotropiju mehaničkih svojstava komponente. Kod nekih postupaka aditivne proizvodnje metala izražen su problem vrlo velika zaostala naprezanja koja značajno smanjuju nosivost komponente.

Danas su mnoga istraživanja usmjerena na proizvodnju metalnih komponenti kompleksne geometrije i to s materijalima poput titana i nikla kod kojih se klasičnim metodama ne može ekonomično proizvesti geometrijski zahtjevan proizvod [2]. Kao izvori energije za aditivnu proizvodnju metalnih materijala koriste se električni luk (TIG, MIG/MAG i plazma) i zraka (laserska i elektronska), a dodatni materijal mogu biti žica i prašak.

Postupci koji koriste prašak kao dodatni materijal razvijeniji su od postupaka koji koriste žicu. Razlog tome je taj što prašak omogućava proizvodnju dijelova s vrlo visokom geometrijskom točnošću. Debljina slojeva kreće se između 20 μm i 100 μm , a tolerancije dijelova proizvedenih ovim postupkom iznose $\pm 0,05$ mm. Glavni nedostatak postupaka koji koriste prašak za dodatni materijal je iznimno niska proizvodnost, tj. prosječni depozit materijala iznosi oko 0,6 kg/h što ograničava proizvodnju za male dijelove [3].

Proizvodnost aditivnog postupka sa žicom puno je veća od proizvodnosti postupaka koji koriste prašak kao dodatni materijal. Također, korištenje žice kao dodatnog materijala je ekološki prihvatljivije i operateri nisu izloženi prašku koji ima potencijalno negativan utjecaj na zdravlje. Količina depozita kreće se čak do 20 kg/h za čelike što ovaj postupak čini pogodnim za proizvodnju dijelova većih dimenzija. Žica kao dodatni materijal je višestruko jeftinija i dostupnija od praška što je značajna prednost u odnosu na postupke koji koriste prašak [3].

2. Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom

Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom (engl. *Wire Arc Additive Manufacturing - WAAM*),

novi je postupak aditivne proizvodnje koja omogućava proizvodnju metalnih proizvoda navarivanjem slojeva. Postupak se prvi puta spominje 1926. godine kada Baker počinje koristiti elektrolučno zavarivanje za izradu 3D modela taloženjem rastaljenog materijala sloj na sloj [4]. Postupak omogućuje proizvodnju proizvoda blizu konačne dimenzije (engl. *near net shape*) i BTF (engl. *Buy-to-Fly*) omjer od 1,2, što rezultira značajnom uštedom materijala [2]. BTF je omjer mase sirovca i gotovog proizvoda. Poželjno je da on bude što bliži jedinici. Navedene karakteristike čine postupak pogodnim za proizvodnju komponenti većih dimenzija načinjenih od skupih materijala.

WAAM postupak koristi standardnu opremu za robotizirano zavarivanje: izvor struje, dodavač žice, pištolj za zavarivanje, robotsku ruku, kontrolnu jedinicu za upravljanje robotom itd. Pojedini materijali zahtijevaju dodatnu zaštitu u vidu korištenja zaštitne inertne atmosfere. U tom slučaju potrebno je posegnuti za dodatnom opremom poput zavarivačkog šatora ili opreme za lokalnu zaštitu zavara [5].

Kao i svaki proizvodni postupak, WAAM ima svoje prednosti i nedostatke.

Prednosti [2]:

- ekonomična izrada komponenti od skupih materijala
- mogućnost automatizacije
- proizvodnja komponenti složene geometrije
- velika količina depozita
- niži troškovi proizvodnje u usporedbi s procesima baziranim na prašku
- potencijalno nema ograničenja u veličini izradaka
- mogućnost strojne obrade tijekom procesa
- mogućnost stvaranja funkcionalno profiliranog materijala
- otvorena struktura sustava omogućuje primjenu bilo kojeg proizvođača izvora struje i manipulatora.

Nedostaci [2,6]:

- pojava zaostalih naprezanja i deformacija zbog visokog unosa topline
- neujednačena geometrija zavara uzduž sloja
- poroznost
- potrebna naknadna obrada odvajanjem čestica
- nedostatak iskustva u primjeni tehnologije
- teško praćenje parametara zavarivanja
- potreba za visokoobrazovanom radnom snagom (programiranje robota, CNC strojeva)
- pojedini materijali zahtijevaju zaštitnu inertnu atmosferu, pa je potrebno koristiti zaštitni šator ili lokalni uređaj za zaštitu.



Zaostala naprezanja i deformacije podloge rezultat su velikih unosa topline i najveća su u smjeru nanošenja materijala. One utječu na tolerancije izratka i uzrokuju greške. Ukoliko struktura ne može podnijeti deformiranje, doći će do loma ili će nastati zaostala naprezanja. Postoji nekoliko metoda kojima se reduciraju utjecaji zaostalih naprezanja i pojava deformacija. Prva metoda je simetrično slaganje. Kod ove metode se postavlja ravnina simetrije u skladu s volumenom izratka. Taloženje materijal treba biti ravnomjerno i odvija se naizmjenično sa svake strane u odnosu na ravninu simetrije, tako da dok se na jedan dio nanosi novi sloj, drugi dio se hladi. Nedostatak ove metode je potreba za dodatnom obradom. Druga metoda je back to back slaganje. Ova metoda omogućava dobro upravljanje unosima topline. Koristi se kod izrade simetričnih dijelova. Prije razdvajanja dijelova cijeli izradak toplinski se obrađuje radi smanjenja zaostalih naprezanja. Sljedeća se metoda temelji na optimiranju orijentacije dijelova. Dijelovi se pozicioniraju na način da se dobiju što kraći slojevi taloženja, jer su manje deformacije i zaostala naprezanja kod kraćih prolaza. Konačno, metoda visokotlačnog valjanja koristi se za postizanje optimalne mikrostrukture i uklanjanje zaostalih naprezanja, ali ima nedostatak što je primjenjiva samo na jednostavnijim izratcima [6]. Površina izratka sastoji se od velikog broja prolaza jedan do drugoga sa ili bez preklapanja. Oblik prijelaza je nepravilan, tj. valovit. Ta valovitost se mora ukloniti naknadnim procesima obrade kako bi se eliminirale površinske nepravilnosti.

3. Nehrđajući dupleks čelici

Zbog relativno visoke čvrstoće dupleks čelici optimalan su izbor za konstrukcije izložene koroziji pri čemu dolazi do izražaja njihova karakteristika izvanredne kombinacije korozijske postojanosti i mehaničkih svojstava. Navedena svojstva omogućuju smanjenje nosivih presjeka i smanjenje ukupne mase proizvoda. U blažem korozivnom okruženju mogu biti dovoljno dobra zamjena za puno skuplje niklove legure. U odnosu na austenitne čelike, dupleks čelici imaju puno višu

granicu razvlačenja. Također, viša im je i tvrdoća, a samim time i otpornost na abrazijsko trošenje [7]. Većina novijih dupleks čelika ima dobru žilavost i duktilnost. Zbog velikog udjela feritne faze, pri sniženju temperature naglo prelaze iz žilavog u krhko područje, slično kao feritni nehrđajući čelici. Donja temperatura primjene je ograničena na -40 °C. Gornja temperatura primjene dupleks čelika je oko 315 °C, zbog brojnih mikrostrukturnih precipitata koji se mogu izlučiti na relativno niskoj temperaturi, a koji loše utječu na korozijsku postojanost i mehanička svojstva. Toplinska rastezljivost dupleks čelika slična je toplinskoj rastezljivosti ugljičnih i niskolegiranih čelika. Ova podudarnost omogućava njihovo međusobno spajanje u nekim proizvodima (npr. tlačne posude) bez opasnosti od pojave prevelikih naprezanja pri kasnijem zagrijavanju tijekom eksploatacije [7]. Mikrostruktura dupleks čelika je dvofazna i sastoji se od približno 50 % volumnih udjela ferita i austenita. Optimalna kombinacija austenita i ferita varira ovisno o proizvođačima i kreće se između 45 % i 60 % austenita u mikrostrukтури.

4. Eksperiment

Eksperiment je proveden na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Određena je odgovarajuća tehnologija za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom dupleks nehrđajućeg čelika pomoću MAG postupka te je ispitan utjecaj zaštitnog plina na kvalitetu površine i mikrostrukтуру izrađenog uzorka.

Zavarivanje uzoraka provedeno je pomoću robotske stanice Almega OTC AX V6. Korištena robotska ruka ima šest rotacijskih stupnjeva slobode gibanja na osnovi kojih je u pripadajućem radnom prostoru moguće postići precizno pozicioniranje i orijentiranje pištolja za zavarivanje. U sastavu robotske stanice nalazi se korišteni izvor struje Varstroj VPS 4000.

Za izradu uzoraka korišten je dodatni materijal oznake G 22 9 3 NL prema EN ISO 14343 A promjera 1,2 mm. Kemijski sastav materijala prikazan je u tablici 1.

Legirni element	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo
Maseni udio, %	0,009	0,370	1,630	8,76	22,8	3,150
Legirni element	Cu	Co	S	P	N	
Maseni udio, %	0,050	0,028	0,001	0,013	0,1405	

**Tablica 1. Kemijski sastav dodatnog materijala [8]**

Kao podloga za izradu uzoraka korišten je lim od nehrđajućeg čelika oznake AISI 304 debljine 8 mm, dimenzija 300 mm × 40 mm. U eksperimentu su korištene četiri mješavine zaštitnih plinova s ciljem

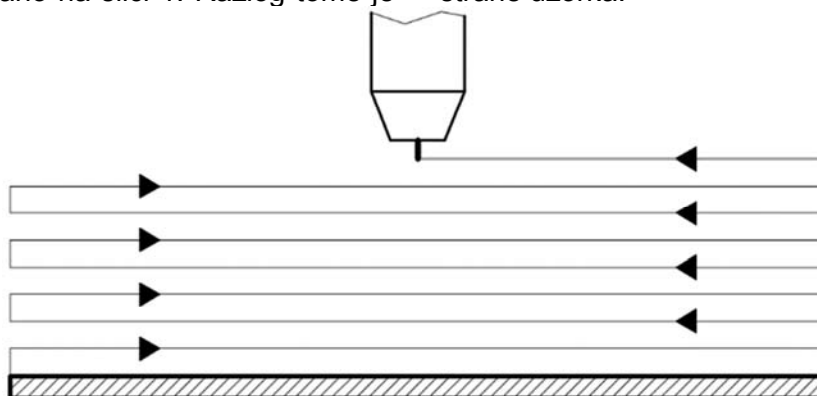
otkrivanja njihovih utjecaja na kvalitetu i svojstva uzoraka. U tablici 2. navedene su korištene mješavine zaštitnih plinova i njihov sastav.

Naziv proizvoda	Grupa po ISO 14175	Volumni udio, %			
		Ar	O ₂	CO ₂	N ₂
Inoxline N2	N2	97,5			2,5
Inoxline X3	M13	97	3		
Inoxline C2	M12	97,5		2,5	
Ferroline C6X1	M24	93	1	6	

Tablica 2. Mješavine zaštitnih plinova [9]

Putanja gibanja pištolja za zavarivanje naizmjenično je mijenjala smjer, dakle, jedan prolaz je zavaren s lijeva na desno, a drugi s desna na lijevo kako je i prikazano na slici 1. Razlog tome je

izbjegavanje uspostave električnog luka na jednoj strani. Takav bi način izrade uzoraka doveo do velikih razlika u visinama između jedne i druge strane uzorka.

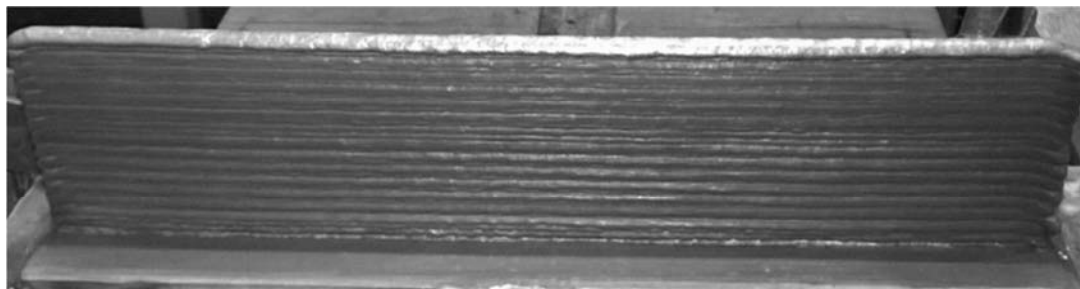
**Slika 1. Trajektorije putanja alata [9]**

U prvoj fazi eksperimenta određeno je optimalno područje parametara s obzirom na stabilnost procesa. Tijekom izrade uzoraka očitavani su parametri zavarivanja i mjerena je visina pomičnim mjerilom nakon svakog prolaza. Prije svakog prolaza mjerena je temperatura beskontaktnom metodom uređajem Fluke IR Thermometer. Temperatura između prolaza držana je ispod 100

°C. Prijenos metala u sva četiri stanja pokusa bio je kratkim spojevima, a nagib pištolja bio je neutralan. Protok plina kod sva četiri stanja pokusa iznosio je 19 l/min, slobodni kraj žice 10 mm, a brzina zavarivanja 27 cm/min. Prosječni parametri zavarivanja za svaki od uzoraka prikazani su u tablici 3. Konačan izgled uzorka vidljiv je na slici 2.

Uzorak	Prosječna jakost struje, A	Prosječni napon, V	Prosječni unos topline, kJ/cm	Prosječna visina slojeva, mm
N2	133	17	4,0	2,14
X3	150	17,3	4,6	2,07
C2	149	17,2	4,6	2,07
C6X1	150	17,2	4,6	2,00

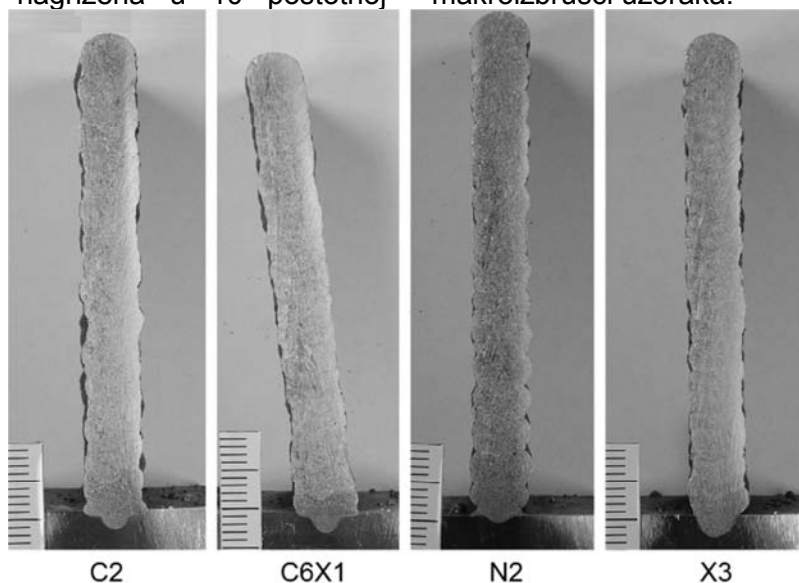
Tablica 3. Prosječni parametri zavarivanja i prosječna visina slojeva [9]



Slika 2. Konačni izgled uzorka [9]

Nakon provedenog zavarivanja iz uzoraka su izrezani makroizbrusci čija je površina nakon finog brušenja i poliranja nagrižena u 10 postotnoj

oksalnoj kiselini pri naponu od 8 V i jakosti struje od 6 A u trajanju od 60 sekundi. Na slici 3 prikazani su makroizbrusci uzoraka.



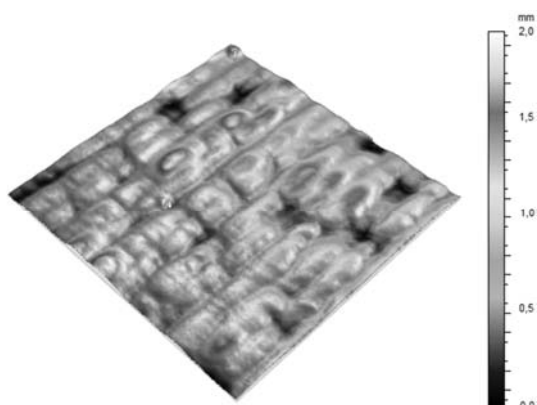
Slika 3. Makroizbrusci uzoraka [9]

Analizom makrostrukture nisu uočene nikakve nepravilnosti ni u jednom od uzoraka. Struktura uzoraka je ujednačena i homogena bez vidljivih uključaka i poroznosti. Stabilan proces i malo odstupanje parametara rezultirali su ujednačenom širinom slojeva na uzorcima. Makroanaliza je također pokazala da postoji potencijalna razlika u mikrostrukтури između završnog sloja na vrhu uzorka i središnjih slojeva.

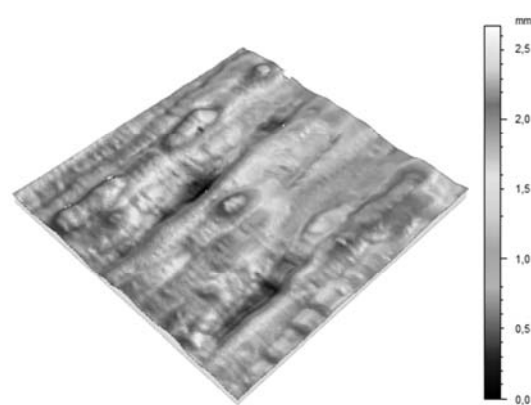
Na izrađenim uzorcima provedeno je ispitivanje tekture površine tako da je iz svakog uzorka pomoću 3D skenera najprije skenirana bočna ispitna površina dimenzija 50 mm × 50 mm. Korišteni skener je David SLS 2 te pripadajući softver DAVID 3. Dobivene digitalne slike potom su obrađene pomoću softvera MountainsMap. Rezultati obrade prikazani su na slikama 4, 5, 6 i 7. Parametri tekture površine ispitani su prema normi ISO 25178 te prikazani u tablici 4.,



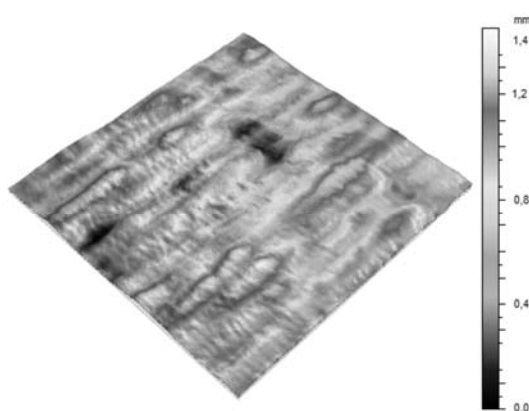
Slika 4. Tekstura dijela bočne površine uzorka N2



Slika 5. Tekstura dijela bočne površine uzorka X3



Slika 6. Tekstura dijela bočne površine uzorka C2



Slika 7. Tekstura dijela bočne površine uzorka C6X1

Parametar	N2	X3	C2	C6X1
S_a	0,287	0,244	0,362	0,194
S_q	0,355	0,308	0,448	0,245
S_z	2,32	1,97	2,68	1,45

Tablica 4. Parametri teksture ispitanog dijela površine uzoraka

Ispitana su tri osnovna parametra teksture površine: srednje aritmetičko odstupanje površine S_a (pandan uobičajeno korištenom parametru hrapavosti R_a), kvadratni korijen prosječnih korijena visine površine S_q i raspon neravnina površine S_z [10]. Pregledom izračunatih parametara jasno se može vidjeti da je tekstura uzorka C2 najnepravilnijeg oblika s izraženom valovitošću. Najmanja valovitost zabilježena je kod uzorka C6X1.

Kako su parametri teksture bočne površine uzoraka izračunati na temelju relativno malog dijela uzorka, treba ih uzeti s rezervom jer potencijalno u sebi sadrže relativno veliku grešku mjerenja. Navedene vrijednosti parametara su stoga samo indikativne

za razlike između istraženih skupova podataka i ne mogu se uzeti u obzir kao statistički značajni pokazatelji ukupne učinkovitosti primijenjene tehnologije aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom.

5. Zaključci

Na temelju provedenog istraživanja može se zaključiti da je dupleks nehrđajući čelik oznake G 22 9 3 NL prema EN ISO 14343 A primjenjiv za postupak aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom. Korišteni parametri rezultirali su stabilnim procesom i zadovoljavajuće ujednačenom geometrijom slojeva. Kod uzorka N2 ostvarena je najveća prosječna visina slojeva unatoč najmanjem



primijenjenom unosu topline. To se objašnjava najmanjim gubitkom materijala odnosno najmanjim rasprskavanjem prilikom korištenja zaštitnog plina s 2,5 % N₂. Analiza makrostrukture pokazala je homogenu strukturu bez vidljivih nepravilnosti. Ispitivanjem teksture bočne površine uzoraka najveća je valovitost utvrđena kod uzorka C2, a najmanja kod uzorka C6X1. Iako je uvjerljivo najmanje rasprskavanje zabilježeno kod uzorka N2,

parametri teksture površine tog uzorka pokazali su značajnu razinu nepravilnosti u usporedbi s drugim uzorcima.

Makroanalizom je utvrđena potencijalna razlika u mikrostrukтури između završnog sloja na vrhu uzorka i središnjih slojeva, pa će buduće istraživanje biti usmjereno na detaljno ispitivanje mikrostrukture i mehaničkih svojstava uzoraka.

Literatura

- [1] Godec D., Šercer M., „Aditivna proizvodnja“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [2] Ilić D., „Optimizacija prijenosa metala za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom“, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.
- [3] Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H., „Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests“, *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, pp. 465-481, 2015.
- [4] Williams S., WAAMMat team, „Large Scale Metal Wire + Arc Additive Manufacturing of Structural Engineering Parts“, Cranfield University, 2016.
- [5] Martina F., Williams S., „Wire + arc additive manufacturing vs. traditional machining from solid: a cost comparison“, *Welding Engineering and Laser Processing Centre*, Cranfield University, 2015.
- [6] Williams S. W., Martina F., Addison A. C., Ding J., Pardal G., Colegrove P., „Wire + Arc Additive Manufacturing“, *Materials Science and Technology*, 2016.
- [7] Rede, Vera, „Utjecaj mikrostrukture zavora duplex čelika na otpornost prema trošenju“, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2004.
- [8] <http://www.migweld.de/english/products/stainles-s-steel-welding-wire/4462-ml-2293-nl/>
Dostupno: 1. 7. 2017.
- [9] Udbinac, D., „Primjena duplex čelika za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom“, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [10] Thompson, A., Senina, N., Maskeryc, I., Körner, L., Lawesa, S., Leacha, R., „Internal surface measurement of metal powder bed fusion parts“, *Additive Manufacturing*, vol. 20, pp. 126–133, 2018.



72. GODIŠNJA SKUPŠTINA MEĐUNARODNOG INSTITUTA ZA ZAVARIVANJE I MEĐUNARODNA KONFERENCIJA BRATISLAVA, SLOVAČKA, 07-13. jul 2019.

Domaćini ovogodišnje 72. po redu Godišnje skupštine međunarodnog instituta za zavarivanje (IIW) i prateće međunarodne konferencije su bili Slovački istraživački institut za zavarivanje i Slovačko društvo za zavarivanje. Pored Godišnje skupštine, održana je Međunarodna konferencija na temu "Novi savremeni materijali i postupci zavarivanja u automobilske industriji", izložba opreme za zavarivanje i po prvi put izložba umetničkih radova (slika i skulptura) na temu zavarivanja ili izrađenih zavarivanjem. Mesto održavanja ovih manifestacija je bila divna Bratislava u periodu od 07-13. jula.

Ovogodišnja Godišnja skupština IIW-a po mnogo čemu je bila jedinstvena. Od toga da prvi put nije bio obelodanjen podatak o broju i imenima delegata, učesnika na Skupštini (objašnjenje da ne postoji saglasnost svih učesnika - zaštita podataka), održavanje radnih sastanaka čak u tri hotela u isto vreme (doduše na malom rastojanju), organizacija prve umetničke izložbe do kurioziteta da je tehnička organizacija bila poverena agenciji iz Češke republike.

Suštinski, najznačajnija novina je bila što je pored redovne Skupštine u nastavku održana i Vanredna skupština Međunarodnog instituta za zavarivanje.

Prema nezvaničnim podacima u radu Godišnje skupštine Međunarodnog instituta za zavarivanje učestvovalo je oko 600 učesnika iz preko 40 zemalja u svojstvu delegata, eksperata ili posmatrača u tehničkim Komisijama, članova radnih grupa - podkomisija, studijskih grupa, tehničkih komiteta i drugih tela.

Najbrojnije delegacije, kao i uvek su bile delegacije Nemačke, Slovačke, Japana, Kine i USA.

Organizacija je bila sasvim dobra, mada u pojedinim segmentima je mogla da bude i bolja što je svakako rezultat iznenadnih i korenitih kadrovskih promena u Institutu za zavarivanje i Društvu za zavarivanje u Slovačkoj.

AKTIVNOSTI IIW RADNIH JEDINICA

- Generalna skupština – redovna i vanredna

Redovna Generalna skupština IIW je održana 07. jula. 2019.g. Na Skupštinskoj sednici su usvojeni izveštaji o radu svih tela IIW, donete rezolucije o daljim aktivnostima, usvojen finansijski izveštaj i plan budžeta za sledeću godinu.



Predstavnik iz Srbije, Dr Vencislav Grabulov

Usvojen je kalendar budućih aktivnosti i regionalnih Kongresa IIW i potvrđeno da će organizatori narednih skupština biti Singapur – 2020, Đenova – Italija 2021 i Tokio-Japan 2022 godine.

Svakako najznačajniji događaj Generalne skupštine IIW je Vanredna skupština IIW koja je održana 07. Jula u nastavku redovne Skupštine.



S obzirom da predsedniku Međunarodnog instituta gospodinu Douglas Luciani završava mandat, za budućeg predsednika IIW je izabran David Landon iz USA.

Potreba za održavanjem Vanredne skupštine IIW je bila donošenje odluke o preseljenju Sekretarijata IIW iz Francuske u Italiju.

Ovo je posledica bolje ponude Italijanskog instituta za zavarivanje iz Đenove u odnosu na Institut za zavarivanje iz Pariza.

Prvi put na "tenderu" ko će biti domaćin sekretarijata IIW se pojavio i drugi kandidat, ovoga puta Đenova – Italija koji je imao nižu cenu za troškove pa je tako i dobio da bude domaćin sekretarijata IIW od početka 2020 do kraja 2024 godine.

Odluka o prebacivanju Sekretarijata IIW iz Pariza u Đenovu je bila povezana sa odlukama o modifikaciji Organizacije IIW i sa niz promena u Statutu IIW koji treba da bude usaglašen sa zakonima koji se primenjuju u Italiji. Naravno, predstoje niz aktivnosti oko registracije IIW u Italiji i ostalih formalnih odluka.

Bitna je odluka da je za izvršnog direktora IIW izabran dr Luca Costa iz Italije umesto Dr-Eng Cecille Mayer iz Francuske.



Douglas Luciani predsednik IIW i Dr Vencislav Grabulov



Dr Cecile Mayer bivši izvršni direktor IIW i Dr Vencislav Grabulov

- Radne jedinice IIW

Radne jedinice IIW čine 18 tehničkih Komisija, 5 podkomisija, 4 radne grupe (Regionalna saradnja, Standardizacija i komunikacija i marketing), Tehnički komitet i Međunarodno telo za ovlašćivanje (IAB) sa dve radne grupe i to: Grupa A – Obrazovanje, obuka i kvalifikacija i Grupa B – Implementacija i ovlašćivanje.

Sastanci tehničkih komisija su održani tokom tri dana, od 08 do 11. jula. Na njima su razmatrani stručni materijali – dokumenti IIW. Izabrani dokumenti IIW su predloženi da se objave u časopisu "Welding in the world". Održani su i sastanci svih ostalih radnih jedinica i doneti odgovarajući zaključci.

IIW MEĐUNARODNA KONFERENCIJA

IIW međunarodna konferencija pod naslovom "Novi savremeni materijali i postupci zavarivanja u automobilske industriji" održana je 11. i 12. jula. Na 2 plenarne i 11 usmenih sesija prezentovano je 72 rada dok je putem postera predstavljeno još 59 radova.

IZLOŽBA ZAVARIVANJA

Sponzori 72. Skupštine IIW su iskoristili mogućnost da predstave svoje proizvode na izložbi koja je organizovana u jednom od hotela gde je održana Generalna skupština (hotel Crown Plaza) za vreme trajanja Skupštine. Ipak broj izlagača je bio znatno manji od broja sponzora, što nije umanjilo značaj ovog dela manifestacije.



IZLOŽBA UMETNOST U ZAVARIVANJU

Prvi put je kao prateća manifestacija Generalne skupštine IIW održana i izložba "Umetnost u zavarivanju". Izloženo je preko 20 radova umetnika iz celog sveta koji su obrađivali tematiku zavarivanja ili primenjivali tehniku zavarivanja za izradu eksponata.

AKTIVNOSTI DELEGACIJE SRBIJE

Na 72. sednici Skupštine međunarodnog instituta za zavarivanje je, ispred naše zemlje, nažalost bio prisutan samo jedan član, dr Vencislav Grabulov, izvršni rukovodilac DUZS CertPers-a.

U pripremnim aktivnostima u vezi Godišnje skupštine učestvovali su naši predstavnici člana IIW, Zavoda za zavarivanje, a u aktivnostima u vezi Međunarodnog tela za ovlašćivanje – IAB, Grupe A i Grupe B, predstavnici ANB za Srbiju, Društvo za unapređivanje zavarivanja u Srbiji, odnosno DUZS CertPers i predstavnici ANBCC Zavoda za zavarivanje.

Pored učešća u radu na samoj sednici Redovne i vanredne Skupštine koja je održana 07.07., najznačajnija aktivnost je bila učešće u radu IAB Grupe A (održana 08.07), IAB Grupe B (09.07.) i predstavnika članica IAB grupe (10.07).

Na ovim sednicama su razmatrane izmene i dopune dokumenata za realizaciju kurseva za obrazovanje kadrova u zavarivanju kao i primena istih.

Na grupama A i B su donete ili potvrđene odluke koje se tiču ANB a odnose se na preliminarnu autorizaciju DUZS CertPers-a za sertifikaciju osoblja u zavarivanju (Međunarodnih inženjera, tehnologa i inspektora).

Potvrđeno je da će poseta tima ocenjivača radi reocenjivanje ANB-a i ANBCC-a za Srbiju obaviti u septembru 2019. Odeređen je i sastav ocenjivačkog tima: vodeći ocenjivač je g-din Christian Ahrens (Nemačka) a prateći, g-din Aleksandar Mullin (Ruska federacija).

Sastanak radne grupe za regionalnu saradnju održan je 08. jula. Posebno su bili emotivni susreti sa zvaničnicima IIW i EWF i ostalim koji su bili ušesnici na IIW Regionalnom Kongresu koji je oktobra 2018 godine održan u Beogradu. Na svakom koraku i u svakoj prilici su isticali uspeh Regionalnog Kongresa, odnosno pohvale Društvu za unapređivanje zavarivanja u Srbiji na organizaciji i posebno na gostoprimstvu koje su osetili tokom boravka u Beogradu.

Sastanak Komisija za obrazovanje na kome je prisustvovao i naš predstavnik je održan 11. jula.

Dr Vencislav Grabulov je imao više bilateralnih susreta, kao na primer sa predsednikom IIW-a g-dinom Daglasom Lučianom, predsednikom Evropske zavarivačke federacija g-dinom Chris Eddy-em, predsenikom grupe A Henk Bodt-om, grupe B Stefano Morra-om kao i sa izvršnim direktorom MIZ-a g-đicom Cecile Mayer...

Naravno sastanci sa predstavnicima delegacija iz regiona se podrazumevaju.

Na kraju sa može, kao i uvek, zaključiti da je učešće u radu Godišnjih skupština IIW-a i radnih grupa, pre svega IAB grupe, korisno i neophodno. Ostaje veliki problem što veoma mali broj aktivista i stručnjaka naše zavarivačke javnosti prati i učestvuje u pripremnom radu na izradi ili dopuni dokumenata IIW-a koji mogu bitno da utiču na naše nacionalne aktivnosti i imaju nesagledive posledice za razvoj i unapređivanje zavarivanja u Srbiji.

Neophodno je da se više stručnjaka i/ili subjekata uključi u praćanje rada IIW-a i EWF-a, blagovremeno, još u fazi pripremnog rada na izradi novih dokumenata ili pravila. U vezi sa tim, veoma je značajna i brojnost delegacije iz Srbije na ovakvim manifestacijama, odnosno radnim sastancima gde se "kroji sudbina" razvoja zavarivanja u svetu ali i kod nas. Fizičko prisustvo je veoma bitno, jednočlana ili delegacija sastavljena od par članova ne može ni fizički da isprati sva bitna događanja i da prati izmene dokumenata i pravila. Da ne govorimo o potrebi da utiče na promene koje nam često nisu naklonjene.

Uspešnost zavisi i od brojnosti naše delegacije koja prisustvuje u radu stručnih tela.

Dr Vencislav Grabulov, IWE
Izvršni rukovodilac DUZS CertPers



D. Klobcar^{1,a}, D. Bračun^{1,b}, M. Soković^{2,c}, M. Bušić^{3,d}, S. Baloš^{4,e}, and M. Pleterški^{5,f}

Important findings in Wire + Arc Additive Manufacturing Značajni nalazi u adiktivnoj proizvodnji žica za elektrolučno zavarivanje

Originalni naučni rad / Original scientific paper

Rad je u izvornom obliku objavljen u Zborniku sa 4. IIW Kongresa zavarivanja Jugoistočne Evrope „Safe Welded Construction by High Quality Welding“ održanog u Beogradu 10-13. Oktobra 2018

Rad primljen / Paper received:

Jul 2019.

Ključne reči: robotsko navarivanje MIG / MAG, tvrdoća, adiktivna proizvodnja žice za elektrolučno zavarivanje (WAAM), SprutCAM

Abstract

The paper presents a set of findings important for a Wire Arc Additive Manufacturing using a welding robot. At the beginning an overview of additive manufacturing technologies for production of metal parts is presented. A special attention is set to wire arc additive manufacturing (WAAM) technologies. The advantage of WAAM compared to laser or electron beam technologies are lower investment and operational costs, while the disadvantage could be a lower dimensional accuracy. Due to higher productivity the WAAM technologies are more suitable for production of bigger parts. In this paper results study of WAAM using a welding robot and a CMT power source is presented. Thin walls have been clad using G3Si1 welding wire. The microstructure and hardness of produced structures were measured and analysed. A research was done to determine the optimal welding parameters for production of thin walls with smooth surface. A SprutCAM software was used to make a code for 3D printing of sample part. It was found out that weld interpass temperature and workpiece to contact tip length play an important role in WAAM technologies.

1. Introduction

American Society for Testing and Materials – ASTM defined additive manufacturing as a process of joining materials layer by layer to make objects from 3D data. There are many differences between additive manufacturing compared to subtractive manufacturing. Many terms are used for this technology: additive manufacturing, additive

Adresa autora / Author's address:

¹ Faculty of Mechanical Engineering, University of Ljubljana, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana, Slovenia

² Faculty of Mechanical engineering, University of Novo Mesto, Na Loko 2, 8000 Novo mesto, Slovenia

³ Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, Ivana Lučića 5, 1000 Zagreb, Croatia

⁴ Faculty of Technical Sciences Trg Dositeja Obradovica 6, 21000 Novi Sad, Serbia

⁵ Numip d.o.o., Cvetkova ulica 27, 1000 Ljubljana, Slovenia

^a damjan.klobcar@fs.uni-lj.si,

^b drago.bracun@fs.uni-lj.si,

^c mirko.sokovic@gmail.com,

^d matija.busic@fsb.hr,

^e sebab@uns.ac.rs, ^f matej.pleterški@numip.si

Key words: robotic MIG/MAG weld surfacing, hardness, wire-arc additive manufacturing (WAAM), SprutCAM

Rezime

U radu je predstavljen niz nalaza koji su važni za adiktivnu proizvodnju žičanih elektroda za elektrolučno zavarivanje koristeći robota za zavarivanje. Na početku je dat pregled tehnologija aditivne proizvodnje metalnih delova. Posebna pažnja posvećena je tehnologiji aditivne proizvodnje žica za elektrolučno zavarivanje (WAAM). Prednost WAAM-a u odnosu na tehnologije laserskih ili elektronskih zraka je manja investicijska i operativna cena, dok bi nedostatak mogao biti manja tačnost dimenzija. Zbog veće produktivnosti, WAAM tehnologije su pogodnije za proizvodnju većih delova. U ovom radu predstavljena je studija rezultata WAAM-a upotrebom zavarivačkog robota i izvora napajanja CMT. Tanki zidovi su obloženi žicom za zavarivanje G3Si1. Izmerena je tvrdoća i analizirana mikrostruktura proizvedenih konstrukcija. Obavljeno istraživanje da bi se utvrdili optimalni parametri zavarivanja za proizvodnju tankih zidova sa glatkom površinom. Za pravljenje koda za 3D štampanje uzorka dela korišćen je softver SprutCAM. Otkriveno je da međuslojna temperatura i radni komad i dužina kontaktnog vraha igraju važnu ulogu u WAAM tehnologijama.

1. Uvod

Američko društvo za ispitivanje i materijale- ASTM definiše adiktivnu proizvodnju kao proces spajanja materijala sloj po sloj radi pravljenja predmeta iz 3D podataka. Mnogo je razlika između adiktivne proizvodnje u poređenju sa subtraktivnom proizvodnjom. Za ovu tehnologiju se koriste mnogi izrazi: aditivna proizvodnja, aditivni proces,



process, additive technology, 3D printing, rapid prototyping and rapid tooling [1]. The development of additive manufacturing of metal and polymer parts technologies does not progress evenly. Existing market solutions enable complex parts manufacturing in tight tolerances. The costs part depends on precision and quality of manufacturing. For example, development of polymers rapid prototype is already at high level. One can buy low-cost 3D printers, which are available for home use. The advantages of these systems is in user friendliness and inexpensiveness, but they have limitations in manufacturing process [1, 2].

There are many different technologies which are developed in additive manufacturing of metal parts. "Electric arc using heat as power source for 3D parts by welding in layers" was patented in 1926 by Baker. Pressure vessels were made with SMAW and TIG welding by using different filler wires for building walls by Ujiie (Mitsubishi) in 1971. Shape welding was used for producing large, 79 tons heavy high quality nuclear structural parts made from 20MnMoNi 5 with build rate 80 kg/h by Kussimaul in 1983. In 1993 Prinz and Weiss patented the process which was the combination of welding and CNC milling and named it "Shaped Deposition Manufacturing – SDM" [3], [4] for the Rolls Royce Company for castings. Through the years they developed a variety of processes and materials, the process itself is still used in manufacturing. In 2006 companies expressed the need for rapid prototyping from titanium. Engineers tried to find the replacement for non-sustainable traditional subtractive manufacturing. The prediction for the next 20 years is, that aircraft industry will need over 18 million tons of titanium wherein the buy-to-fly ratio is 5. That means 72 million tons of titanium will be waste material [5–8]. Additive manufacturing of metal parts can be divided on technologies using beams and technologies using arc (Fig. 1). For printing of metal parts could be used laser beam or electron beam. Filler material in that case is powder or wire. In laser systems the feed powder can be added with gas (blowing), we speak then about a process called laser cladding. In Selective Laser Sintering (SLS) or Electron Beam Melting (EBM) powder in containers can be used. In laser systems wire is added from side or perpendicular on the welding spot. In case of welding with electron beam we use Sciaky system. MIG, TIG and plasma are most common in arc welding. In all variations the feeding material in a form of wire is being. Common expression for all these technologies is Wire + arc Additive Manufacturing – WAAM [5].

aditivna tehnologija, 3D štampanje, brzo izrađivanje prototipa i brza izrada alate [1]. Razvoj tehnologije aditivne proizvodnje metala i polimernih delova ne napreduje ravnomerno. Postojeća tržišna rešenja omogućavaju izradu složenih delova u strogim tolerancijama. Deo troškova zavisi od preciznosti i kvaliteta izrade. Na primer, razvoj polimernog prototipa za brzi prototip je već na visokom nivou. Možete kupiti jeftine 3D štampače koji su dostupni za kućnu upotrebu. Prednosti ovih sistema su u lakoći rukovanja i jeftinosti, ali imaju ograničenja u procesu proizvodnje [1, 2]

Postoji mnogo različitih tehnologija koje su razvijene u aditivnoj proizvodnji metalnih delova. "Električni luk koji koristi toplotu kao izvor energije za 3D delove zavarivanjem u slojevima" patentirao je 1926. Baker. Posude pod pritiskom rađene su zavarivanjem SMAW i TIG korišćenjem različitih žica za ispunu zidova Ujiie (Mitsubishi) 1971. Zavarivanje oblikovanjem korišćeno je za proizvodnju velikih, 79 tona teških visokokvalitetnih nuklearnih konstrukcionih delova izrađenih od 20MnMoNi 5 sa radnom snagom 80 kg / h od strane Kussimaula 1983. Godine 1993. Prinz i Weiss su patentirali postupak, koji je bio kombinacija zavarivanja i CNC glodanja i nazvali ga „Oblikovana taložna proizvodnja - SDM“ [3], [4] za kompaniju Rolls Roice za livenje. Kroz godine razvijanja različitih procesa i materijala, sam proces se još uvek koristi u proizvodnji. Kompanije su tokom 2006. godine izrazile potrebu za brzim prototipovima od titana. Inžinjeri su pokušali pronaći zamenu za neodrživu tradicionalnu substraktivnu proizvodnju. Predviđanje za narednih 20 godina je da će vazduhoplovnoj industriji biti potrebno preko 18 miliona tona titana, pri čemu je odnos kupovine i letenja 5. To znači da će 72 miliona tona titana biti otpadni materijal [5–8].

Aditivna proizvodnja metalnih delova može se podeliti na tehnologije pomoću snopa i tehnologije koje koriste luk (slika 1). Za štampanje metalnih delova može se koristiti laserski snop ili elektronski snop. Dodatni materijal u tom slučaju je prah ili žica. U laserskim sistemima prah može da se doda gasom (duvanjem), tada govorimo o procesu koji se zove lasersko oblaganje. U posudama se može koristiti prah selektivnog laserskog sinterovanja (SLS) ili pretapanje elektronskim snopom (EBM). U laserskim sistemima žica se dodaje sa strane ili upravno na mesto zavarivanja. U slučaju zavarivanja elektronskim snopom koristimo Sciaky sistem. MIG, TIG i plazma su najčešći u elektro-lučnom zavarivanju. U svim varijacijama je materijal u obliku žice. Zajednički izraz za sve ove



Most common system used for WAAM is industrial robot to which is install welding torch. Price of such system is up to 300 k€ for building of less complex parts. For production of high quality parts suitable for aerospace technology are systems consist of high cost CNC and robot. Their price are in range of 0.2-2 M€ [2]. Structure stiffness, dynamic accuracy and vibration damping of CNC machines is higher so they are more appropriate for manufacturing by WAAM [3].

There are many disadvantages of using powder instead of wire: High costs, variable powder quality, the feed is complex unless the side feed system is being used, low efficiency (40-60 %), careful handling because of safety aspects, head rotation problems if feed is added from side. If adding wire filler material, the price of materials is medium-high, the quality of material is high (Ti, Fe, Ni) but also could be different when using aluminium alloys. The efficiency of feed material is close to 100%, the feeding system is already developed, the recycling of materials is not necessary, head rotation problems turn up only when using plasma and TIG welding. Feed material outside from the required position is possible [5].

The purpose of this research was to determine optimal technological welding parameters for WAAM of thin welds that could result with stable depositions in heights at different welding positions. Standard MAG (with shielding gas CO₂), impulse MIG (with shielding gas Ar) and Cold Metal Transfer (CMT) process at preliminary welding have been analyzed. Different welding currents (40 A, 90 A, 140 A) and welding speeds (3 mm/s, 7.5 mm/s, 12 mm/s) were investigated. Based on preliminary tests, to achieve optimal welding conditions CMT process has been selected for future optimization. During welding in different positions PA, PC and PG temperatures of layers have been measured. Demonstration products were made with optimal welding parameters using SprutCam software [9].

Comparing energy inputs by laser or arc technologies show high investment and operational costs when using laser and low when using plasma or MIG. Total efficiency and joining efficiency are approx. 10 % using laser and 80 % using arc. There is also a high safety risk when using laser technologies, but they have medium to high build rate compared to arc technologies. Minimum thickness of 0.2 mm layer can be achieved with laser technologies compared to arc where minimum thickness is 1 mm [5].

tehnologije je aditivna proizvodnja žica i luka - WAAM [5].

Najčešći sistem koji se koristi za WAAM je industrijski robot na koji je ugrađen gorionik za zavarivanje. Cena takvog sistema je do 300 k € za izgradnju manje složenih delova. Za proizvodnju visokokvalitetnih delova pogodnih za vazduhoplovnu tehnologiju su sistemi koji se sastoje od CNC-a i robota visokih cena. Njihova cena je u rasponu od 0,2-2 miliona evra [2]. Čvrstoća konstrukcije, dinamička tačnost i prigušivanje vibracija CNC mašina su veće pa su one pogodnije za proizvodnju od strane WAAM [3]. Postoje mnogi nedostaci upotrebe praha umesto žice: visoki troškovi, promenljiv kvalitet praha, dodavanje je složeno ukoliko se ne koristi sistem bočnog uvlačenja, niska efikasnost (40-60%), pažljivo rukovanje zbog bezbednosnih aspekata, problemi sa rotacijom glave ako je dodavanje sa strane. Ako se dodaje materijal žica, cena materijala je srednje visoka, kvalitet materijala je visok (Ti, Fe, Ni), ali takođe može biti drugačiji kada se koriste legure aluminijuma. Efikasnost sirovina je blizu 100%, sistem dodavanja je već razvijen, recikliranje materijala nije potrebno, problemi sa rotacijom glave pojavljuju se samo kada se koristi plazma i TIG zavarivanje. Moguće je umetanje materijala izvan pozicije [5].

Svrha ovog istraživanja bila je utvrđivanje optimalnih tehnoloških parametara zavarivanja za WAAM tankih zavara koji mogu rezultovati stabilnim taloženjem u visinu na različitim položajima zavarivanja. Analizirani su standardni MAG (sa zaštitnim gasom CO₂), impulsni MIG (sa zaštitnim gasom Ar) i proces hladnog metala (CMT) pri prethodnom zavarivanju. Ispitivane su različite struje zavarivanja (40 A, 90 A, 140 A) i brzine zavarivanja (3 mm/s, 7,5 mm/s, 12 mm/s). Na osnovu preliminarnih testova, za postizanje optimalnih uslova zavarivanja, odabran je CMT postupak za buduću optimizaciju. Tokom zavarivanja u različitim položajima izmerene su temperature za PA, PC i PG. Demonstracijski proizvodi napravljeni su sa optimalnim parametrima zavarivanja pomoću softvera SprutCam [9].

Poređenje ulaza energije laserskom ili elektrolučnom tehnologijom pokazuje velike investicione i operativne troškove kada se koristi laser i niske kada se koriste plazma ili MIG. Ukupna efikasnost i efikasnost spajanja su oko 10% korišćenjem lasera i 80% korišćenjem luka. Takođe, postoji visok bezbednosni rizik kada se koriste laserske tehnologije, ali one imaju srednju do visoku stopu izrade u poređenju sa elektrolučnim tehnologijama. Minimalna debljina



Comparison between layer heights, build rate and horizontal resolution suggest that technologies with powder in container have the lowest build rate and high resolution, while technologies based on blowing powder have high build rate and low resolution. WAAM technology has higher build rate and lowest resolution compared to powder technologies. When melting efficiency is maximal the build rate depends on squared layer height for single axially symmetric source. Resolution has many influencing factors and it depends on layer height and width ratio. Usually is the best in 1.5 layer to height ratio [5]. Because of low resolution parts commonly need post-machining treatment process to fit the geometrical tolerances. Treatment can be done as intermediate or post-process, depends on requirement result. Intermediate machining done between deposited layers allows adjustment of layer thickness and machining of internal surfaces in case of shell parts in comparison to post machining which does not support such machining but is less time consuming. sloja od 0,2 mm može se postići laserskim tehnologijama u poređenju sa lukom gde je najmanja debljina 1 mm [5].

Poređenje između visine sloja, stepena sakupljanja i horizontalne rezolucije sugerise da tehnologije sa prahom u posudi imaju najnižu stopu nakupljanja i visoku rezoluciju, dok tehnologije zasnovane na prahu za puhanje imaju visoku stopu nakupljanja i malu rezoluciju. WAAM tehnologija ima višu stopu izrade i najmanju rezoluciju u poređenju sa tehnologijama praška. Kada je efikasnost topljenja maksimalna, brzina sastavljanja zavisi od visine kvadratnog sloja za jedan aksijalno simetrični izvor. Rezolucija ima mnogo uticajnih faktora i zavisi od odnosa visine i širine sloja. Obično je najbolji u odnosu između 1,5 i visine sloja [5]. Zbog delova male rezolucije obično je potreban postupak obrade nakon mašinske obrade kako bi se prilagodile geometriji tolerancije.. Tretman se može obaviti kao srednji ili post-proces, zavisno od rezultata. Međusobna obrada između nanesenih slojeva omogućava podešavanje debljine sloja i obradu unutrašnjih površina u slučaju delova školjke u odnosu na naknadnu obradu koja ne podržava takvu obradu, ali zahteva manje vremena.

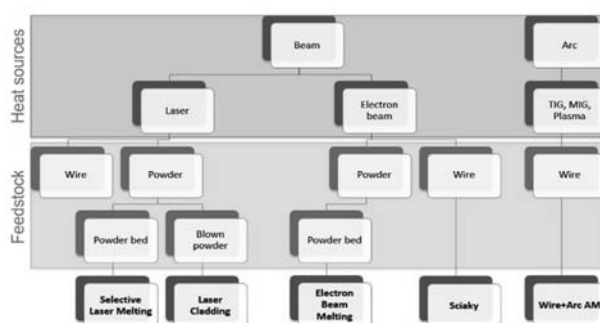


Figure 1. Division of additive manufacturing of metals [5]
Slika 1. Odeljenje aditivne proizvodnje metala [5]

2. Materials and methods

MAG process has been used on S355 structural steel base plate in dimensions 100×22×8 mm. G3Si1 welding wire of 1.2 mm in diameter was used for WAAM, with shielding gas (82 % Ar + 18 % CO₂) flow rate of 10 l/min. Fronius TransPlus Synergic 3200 CMT power source and welding robot ABB IRB 140 were used. From the produced structures, specimens were sectioned for microstructure analysis, measurement of Vickers hardness and Zwick/Z250 tensile testing machine was used for tensile tests. A 2 % nital etchant was used for for analysis of microstructure, which was analysed at optical microscope Mitutoyo TM.

2. Materijali i metode

MAG postupak je korišćen na ploči od konstrukcionog čelika S355 dimenzija 100 × 22 × 8 mm. Za WAAM korišćena je žica za zavarivanje G3Si1 prečnika 1,2 mm, sa protokom gasa (82% Ar + 18% CO₂) od 10 l / min. Korišćeni su izvor napajanja Fronius TransPlus Sinergic 3200 CMT i robot za zavarivanje ABB IRB 140. Od proizvedenih struktura uzorci su isečeni za analizu mikrostrukture, merenje tvrdoće po Vickersu. Mašina za ispitivanje zatezne čvrstoće Zwick / Z250 korišćena je za ispitivanja zatezanjem. Za analizu mikrostrukture korišćen je 2% nital. koja je analizirana na optičkom mikroskopu Mitutoyo TM.



3. Results and discussison

Welding parameters which allow stable welding for thin walls have been determined. One layer deposited on substrate 8 mm thickness built with welding current 40 A is shown on Fig. 2. In the case of standard control of wire feed, the weld was acceptable only at the lowest speed of welding and highest energy input (137.3 kJ/m). Energy input at higher welding speed was too low to build an acceptable weld. In the case of pulse control of wire feed an acceptable weld has been made with the welding speed 7.5 mm/s and energy input 94 kJ/m. All welds were of sufficient quality when using CMT at all welding speeds and also at higher energy input (34.3 kJ/m). Welds were wider than in other cases.

3. Rezultati i diskusija

Određeni su parametri zavarivanja koji omogućavaju stabilno zavarivanje tankih zidova. Jedan sloj nanesen na podlogu debljine 8 mm izveden strujom zavarivanja 40 A prikazan je na slici 2. U slučaju standardne kontrole dovoda žica, zavarivanje je bilo prihvatljivo samo pri najmanjoj brzini zavarivanja i najvećem unosu energije (137,3 kJ / m). Ulaz energije pri većoj brzini zavarivanja bio je previše nizak da bi se dobio prihvatljiv zavar. U slučaju kontrole impulsa dovoda žice napravljen je prihvatljivi zavar brzine zavarivanja 7,5 mm / s i unosa energije 94 kJ / m. Svi zavari su bili dovoljnog kvaliteta kada su koristili CMT pri svim brzinama zavarivanja i takođe pri većem unosu energije (34,3 kJ / m). Zavareni spojevi su bili šira nego u drugim slučajevima.

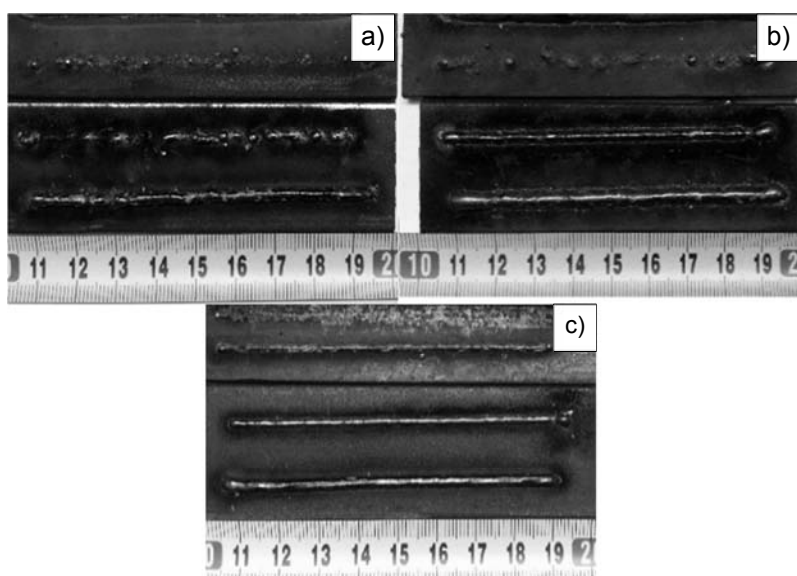


Figure 2. Welding at 40A a) standard, b) pulse c) CMT (different welding speed from bottom to top: 3, 7.5, 12 mm/s)
Slika 2. Zavarivanje na 40A a) standardno, b) impulsno c) CMT (različita brzina zavarivanja odozdo prema gore: 3, 7,5, 12 mm / s)

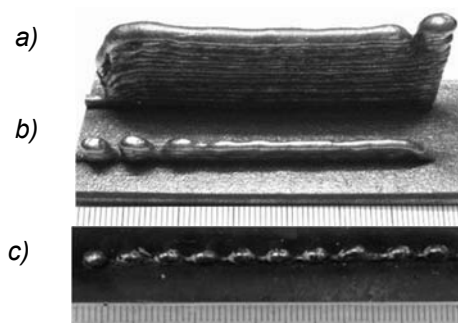


Figure 3. Welding by CMT process at welding current 40 A (different welding speeds from top to bottom: 3, 7.5, 12 mm/s)

Slika 3. Zavarivanje CMT postupkom na zavarivačkoj struji 40 A (različite brzine zavarivanja od vrha do dna: 3, 7,5, 12 mm / s)



Welds made by CMT process at welding current 40 A are shown at Fig. 3. In the picture above were welding took place from right to left, on the median and lower from left to right. Weld were acceptable only when welding at speed 3 mm/s. There were problems with the arc ignition at the start and melting of material at the end. Because of unstable process cavity has occurred at start of the welds. If energy input is decreased, stability of welding process is reduced when welding walls. The process of welding cannot be performed at the deposition of only a few layers. The welding of the wall after process optimization, at welding current 90 A and welding speed 3 mm/s from right to left is shown at Fig. 4a. It can be noticed that thickness of wall increased and sloping appeared. This is because of wall overheating at the end of welding and spilling of deposited material. Sloping can be partially improved by changing welding direction by the welding of each layer which is shown on Fig. 4b.

Zavarivanja napravljena CMT postupkom pri struji zavarivanja 40 A prikazana su na slici 3. Na gornjoj slici zavarivanje se odvijalo s desna na levo, na srednjem i nižem s leva na desno. Zavarivanje je bilo prihvatljivo samo za zavarivanje brzinom od 3 mm / s. Bilo je problema sa uspostavljanjem luka na početku i topljenjem materijala na kraju. Zbog nestabilne procesne šupljine došlo je do početka zavarivanja. Ako se smanji unos energije, smanjuje se stabilnost procesa zavarivanja zidova. Postupak zavarivanja ne može se izvesti samo nanošenjem nekoliko slojeva. Zavarivanje zida nakon optimizacije procesa, pri struji zavarivanja 90 A i brzini zavarivanja 3 mm / s s desna na levo, prikazano je na slici 4a. Može se primetiti da se debljina zida povećavala i naginjala. To je zbog pregrevanja zida na kraju zavarivanja i prosipanja nataloženog materijala. Nagib se može delimično poboljšati promenom smeru zavarivanja zavarivanjem svakog sloja, što je prikazano na slici 4b.

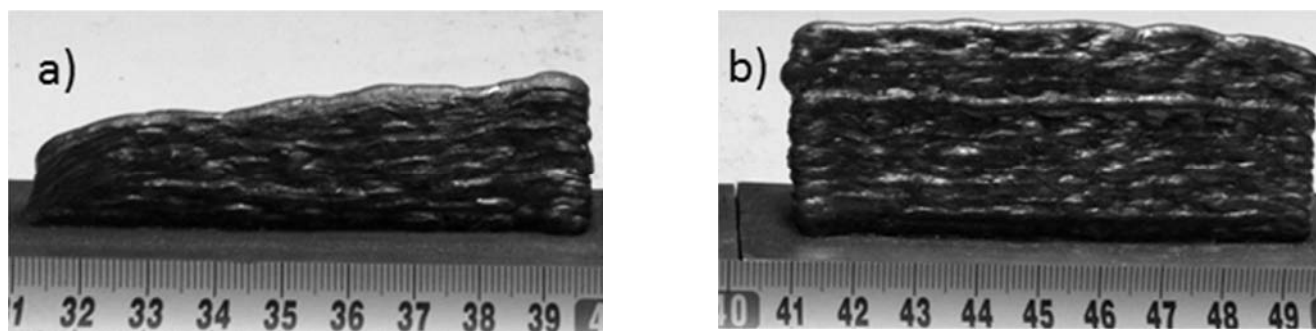


Figure 4. Welding influence at $I = 90 \text{ A}$, $v = 7.5 \text{ mm/s}$ a) at left b) alternate on both sides
Slika 4. Uticaj zavarivanja pri $I = 90 \text{ A}$, $v = 7,5 \text{ mm / s}$ a) na levoj strani b) naizmeničan je na obe strane

Based on parametric analysis and geometry measurement weld width and height decreased if welding speed was increased (shown on Fig. 5). If welding current increased, consequently welding wire feed speed, energy input, welding height and width increased, too. In case of welding many layers with high weld inter-pass temperature ($200 \text{ }^\circ\text{C}$), weld width increased and weld height decreased at constant volume. One of impacts on weld height and width besides welding parameters is also inter-weld temperature.

Na osnovu parametrijske analize i mjerenja geometrije širina i visina zavarenog spoja su se smanjivali ako se povećala brzina zavarivanja (prikazano na slici 5). Ako se povećala struja zavarivanja, posljedično se povećala i brzina zavarivanja žice, ulazna energija, visina i širina zavarenog spoja. U slučaju zavarivanja mnogih slojeva sa visokom inter-propusnom temperaturom zavarivanja ($200 \text{ }^\circ\text{C}$), širina zavarenog spoja se povećava, a visina zavarenog spoja smanjuje se na konstantnu zapreminu. Jedan od uticaja na visinu i širinu šava pored parametara zavarivanja je i temperatura zavarivanja

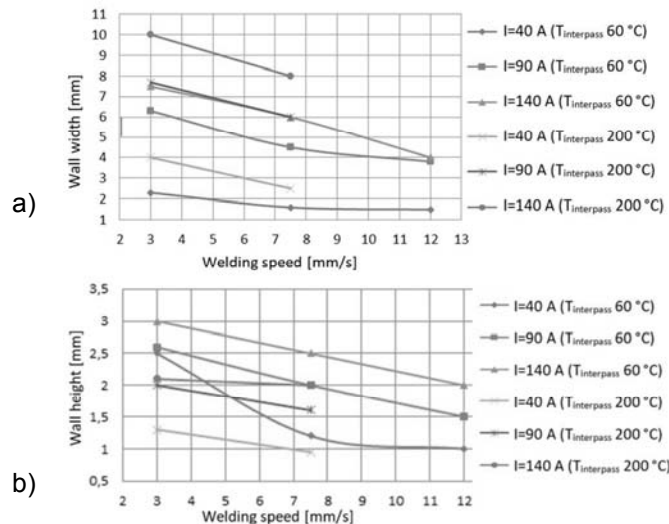


Figure 4. Influence of welding parameters for CMT process on: a) bead width b) weld height.
Slika 5. Uticaj parametara zavarivanja na CMT postupak na: a) širinu zavora b) visinu šava

Welding in difficult positions and different angles of torch were also performed. The inter-weld temperature had, besides energy input, great influence in all cases. Welds made in PA position with different energy input are shown at Fig. 6a. Torch angle was 60° and was equal to the wall angle which was built. Welding made in PG position (welding from up to bottom) by increasing weld inter-pass temperature developed a droplet of material at the end of weld because of gravity influence (shown at Fig. 6b.) The height of weld increased, too.

Izvršeno je i zavarivanje u teškim položajima i različitim uglovima gorionika. Temperatura zavarivanja je osim unosa energije imala veliki uticaj u svim slučajevima. Zavarivanja napravljena u PA položaju sa različitim unosom energije prikazana su na slici 6a. Ugao gorionika bio je 60° i bio je jednak uglu zida koji je rađen. Zavarivanje izvedeno u PG položaju (zavarivanje odozdo na dno) povećanjem inter-propusne temperature zavarivanja razvilo je kapljicu materijala na kraju zavora zbog uticaja gravitacije (prikazano na slici 6b.) Visina zavora se takođe povećala.

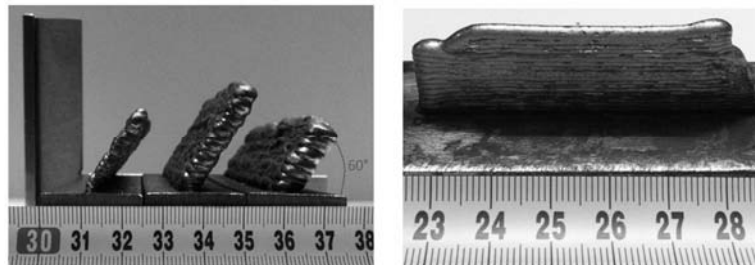


Figure 5. Welding in a) PA position at parameters: $I = 40\text{ A}$, $v = 5\text{ mm/s}$; $I = 90\text{ A}$, $v = 7.5\text{ mm/s}$; $I = 140\text{ A}$, $v = 7.5\text{ mm/s}$ and angle of torch 60°, b) PG position at parameters: $I = 40\text{ A}$, $v = 5\text{ mm/s}$

Slika 6. Zavarivanje u a) položaju PA kod parametara: $I = 40\text{ A}$, $v = 5\text{ mm/s}$; $I = 90\text{ A}$, $v = 7,5\text{ mm/s}$; $I = 140\text{ A}$, $v = 7,5\text{ mm/s}$ i ugao baklje 60°, b) pozicija PG kod parametara: $I = 40\text{ A}$, $v = 5\text{ mm/s}$

Fig. 7a presents macro of weld made at welding current 59 A and welding speed 5 mm/s. First weld is narrower and higher because of increased heat transfer into colder substrate. Weld thickness in layers above was increased because of lower heat transfer and higher inter-weld temperature. Hardness in layers is shown at Fig. 7b.

Hardness was measured in different spots in HAZ, where it was increased up to 280 HV value. Measuring hardness value of substrate was 190 HV. Hardness at layers above was measured in the middle of each layer. Failure of welds in upper layers has been detected. Hardness decreases

Sl. 7a prikazuje makrostrukturu zavora izrađenog pri na struji zavarivanja 59 A i brzini zavarivanja 5 mm / s. Prvi šav je uži i veći zbog povećanog prenosa toplote u hladniju podlogu. Debljina šava u gornjim slojevima povećana je zbog nižeg prenosa toplote i veće temperature između zavora. Tvrdća u slojevima je prikazana na slici 7b.

Tvrdoća je merena na različitim mestima u ZUT-u, gde je povećana do 280 HV. Vrednost merenja tvrdoće podloge bila je 190 HV. Tvrdoća gornjih slojeva merena je u sredini svakog sloja. Otkriven je lom na gornjim slojevima. Tvrdoća se smanjuje



from value 200 HV to 160 HV. Welded layer was softer compared to the substrate for approx. 20 HV.

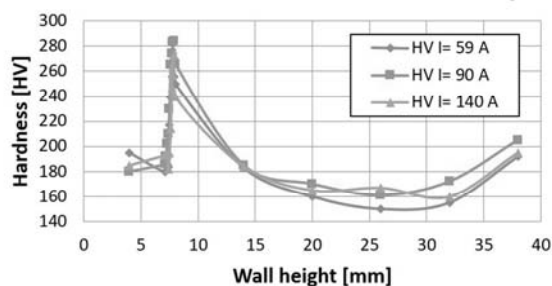
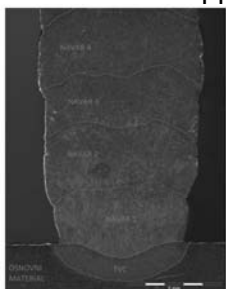


Figure 6. a) Macro made at welding current 59 A and welding speed 5 mm/s b) Hardness changing at different welding parameters (5 mm/s (59 A), 7,5 mm/s (90 A in 140 A).

Slika 7. a) Makrostruktura napravljena pri struji zavarivanja 59 A i brzini zavarivanja 5 mm / s b) Tvrdoća koja se menja pri različitim parametrima zavarivanja (5 mm / s (59 A), 7,5 mm / s (90 A u 140 A).

A 3D model of demonstration part built with WAAM technology is shown at Fig. 8. Process was continuous without controlling inter-weld temperature. Inter-weld temperature was high which can be seen on the middle picture where the part being built was still glowing. Shape of 3D model corresponds to the shape of part made with WAAM technology. Because of higher inter-weld temperature there is a rough surface and material spillage over the part built. Smoother surface caused with few-second of pause which provided lower inter-weld temperature.

3D model demonstrativnog dela izgrađenog WAAM tehnologijom prikazan je na slici 8. Proces je bio kontinuiran bez kontrole temperature zavarivanja. Temperatura zavarivanja bila je visoka, što se može videti na srednjoj slici gde je deo koji se gradi još uvek užaren. Oblik 3D modela odgovara obliku dela izrađenog VAAM tehnologijom. Zbog viših temperatura zavarivanja, na delu se gradi hrapava površina i prosipanje materijala. Glatka površina prouzrokovana je pauzom od nekoliko sekundi, što je omogućilo nižu temperaturu zavarivanja



Figure 7. 3D model and final product welded by CMT and pulse combined process at welding current 59 A and welding speed 5 mm/s.

Slika 8. 3D model i krajnji proizvod zavaren CMT-om i pulsirajućim lukom kombinovanim postupkom pri zavarivačkoj struji 59 A i brzini zavarivanja 5 mm / s.

4. Conclusion

A parametric analysis of weld surfacing (WAAM) of thin walls was done using MIG/MAG technology and 1.2 mm in diameter welding filler wire G3Si. It was established:

- a combination of pulse and CMT welding presented the optimal process control program. Optimal welding parameters for weld surfacing of thin layered walls were obtained at welding current of 59 A, welding voltage 8.8 V and welding speed 5 mm/s, where the linear heat input was 103.8 kJ/m,
- welding parameters together with inter-pass weld temperature should be considered to provide stable surfacing process. Inter-pass weld temperature should not exceed 100 °C, to avoid spilling of the molten metal,

4. Zaključak

Parametrijska analiza navarenih slojeva (WAAM) tankih zidova urađena je upotrebom MIG / MAG tehnologije i žice za zavarivanje prečnika 1,2 mm prečnika G3Si. Utvrđeno je:

- kombinacija pulsnog i CMT zavarivanja predstavila je optimalan program kontrole procesa. Optimalni parametri zavarivanja za navarivanje zidova tankim slojevima, dobijeni su pri struji zavarivanja od 59 A, naponu zavarivanja 8,8 V i brzini zavarivanja 5 mm / s, pri čemu je linearni unos toplote 103,8 kJ / m,
- parametre zavarivanja zajedno s međuslojnom temperaturom treba uzeti u obzir da bi se osigurao stabilan proces navarivanja. Međuslojna



- energy input should be between 100-300 kJ/m. If linear energy input is too low wavy surface may appear, if too high there can be a spilling of material with changed height to width ratio,
 - hardness of material is very constant, it only changes in HAZ,
 - welding in different positions can be done but the most convenient is to do it in PA position. In other positions the influence of gravity, surface tension and inter-pass weld temperature should be considered with keeping energy input minimized.

temperatura ne sme biti veća od 100°C, kako bi se izbeglo prosipanje rastopljenog metala,
 - unos energije treba da bude između 100-300 kJ/m. Ako je linearni unos energije prenizak, može se pojaviti talasasta površina, ako je previsoka, može doći do izlivanja materijala sa promenjenim odnosom visine i širine,
 - tvrdoća materijala je vrlo konstantna, menja se samo u ZUT-u,
 - zavarivanje u različitim položajima može se obavljati, ali najprikladnije je uraditi ga u PA položaju. U drugim položajima treba uzeti u obzir uticaj gravitacije, površinskog napona i međuslojne temperature ako bi se unos energije smanjio na minimum.

Acknowledgments

The authors wish to thank Luka Bricelj and Boris Bell for conducting experimental work, Nikolay Konov for the help with SprutCAM software, company SIJ Elektrode Jesenice for supporting us with filler metals and company GTG Plin d.o.o. for support with their shielding gasses. The authors acknowledge the financial support from the Slovenian Research Agency (research core Funding No. P2-0270, and Projects No. L2-8181 and No. L2-8183). The article is in part the result of work in the implementation of the SPS Operation entitled MAterials and Technologies for New Applications - MARTINA. The investment is co-financed by the Republic of Slovenia and the European Union from the European Regional Development Fund.

References

Literatura

- [1] Frazier, W. E. (2014): Metal additive manufacturing: A review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(6), pp. 1917–1928.
- [2] Wong, K.V., Hernandez, A. (2012): A review of additive manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*, 2012, pp. 1–10.
- [3] Merz, R. (1994): Shape deposition manufacturing (Doctoral dissertation), Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/30873042_Shape_deposition_manufacturing, pp. 169.
- [4] Weiss, L.E., Merz, R., Prinz, F.B., Neplotnik, G., Padmanabhan, P., Schultz, L., Ramaswami, K. (1997): Shape deposition manufacturing of heterogeneous structures. *Journal of Manufacturing Systems*, 16(4), pp. 239–248.
- [5] Williams, S.W., Martina, F., Addison, A.C., Ding, J., Pardal, G., Colegrove, P. (2016): Wire+ arc additive manufacturing. *Materials Science and Technology*, 32, pp. 641–647.
- [6] Martina, F., Roy, M.J., Colegrove, P.A., Williams, S.W. (2014): Residual stress reduction in high pressure interpass rolled wire+ arc additive manufacturing Ti-6Al-4V components. *Proc. 25th Int. Solid Freeform Fabrication Symp*, pp. 89–94.
- [7] [Colegrove, P.A. et al., (2014): High pressure interpass rolling of wire+ arc additively manufactured titanium components. *Advanced Materials Research*, 996, pp. 694–700.
- [8] Nilsiam Y., Haselhuhn, A., Wijnen, B., Sanders, P., Pearce, J.M. (2015): Integrated Voltage—Current Monitoring and Control of Gas Metal Arc Weld Magnetic Ball-Jointed Open Source 3-D Printer. *Machines*, 3(4), pp. 339–351.
- [9] SprutCam software [cited 17/8/2018], Available on: <http://www.sprutcaml.com>



Nastavak sa strane 100

MEĐUNARODNO TAKMIČENJE ZAVARIVAČA „ARC CUP“ 2019 – LANGFANG-PEKING

FOTOGRAFIJE



CNPC International Welding Training Centre



Grupna fotografija učesnika takmičenja

Naši takmičari na „zadatku“



Marko Vasičić (141)



Dejan Tomić (111)



Marko Živković (135)



Naša ekipa



Živković M., Vasičić M., Tomić D



L. Weingrill^{1,a}, M. Schwald^{1,b}, D. Frühstück¹, C. Faustmann¹, N. Enzinger^{1,c}

GMA root welding of pearlitic rails using magnetic arc deflection GMA zavarivanje korena perlitnih šina korišćenjem skretanja magnetnog luka

NASTAVAK IZ PREDHODNOG BROJA
2.deo

CONTINUED FROM PREVIOUS ISSUE
Part 2

The entire setup was mounted on a table which was actuated by an automated linear axis and thus controlled the welding speed. By moving the sample instead of the weld torch it was possible to keep the HF-camera focused on the welding process throughout the entire length of the weld. For all experiments a standard G3Si1 wire from voestalpine Boehler Welding was used as a filler material. M21 (82% Argon, 18% CO₂) shielding gas was used for all experiments at 12l/min.

The welding experiments were structured into separate series in order to sequentially optimize all necessary parameters. Throughout the first series, parameter studies were carried out to find an optimum heat input. Therefore, the welding current I_w and the welding speed V_w were systematically altered, starting from low heat input per unit of length in several one-sided single pass welds for 3 different filler wire diameters D_F . The ranges of this parameter variations are depicted in Table 2.

Cela instalacija je postavljena na sto koji se aktivira po automatskoj linearnoj osi i tako se kontrolisala brzina zavarivanja. Pomeranjem uzorka umesto gorionika za zavarivanje bilo je moguće zadržati HF-kameru fokusiranu na proces zavarivanja kroz čitavu dužinu zavarenog spoja. Za sve eksperimente upotrebljena je standardna G3Si1 žica, proizvođača Voestalpine Boehler Welding. Zaštitni gas M21 (82% Argon, 18% CO₂) je korišćen za sve eksperimente na 12 l/min.

Eksperimenti zavarivanja su strukturirani u odvojene serije kako bi se sekvencijalno optimizovali svi potrebni parametri. U prvoj seriji sprovedena su ispitivanja parametara kako bi se pronašao optimalni unos toplote. Zbog toga je struja zavarivanja I_w i brzina zavarivanja V_w sistematski izmenjena, počevši od unosa male toplote po jedinici dužine u više jednostranih jednostrukih zavara za 3 različita prečnika žice za zavarivanje DF. Opsezi varijacija ovog parametra prikazani su u Tabeli 2.

D_F (mm)	I_w (A)	V_w (cm min ⁻¹)	preheating
1,0	200-270	19,8 - 33	no
1,2	285-360	33	no
1,6	202-400	19,8 - 69	no / 300°C

Table 2. Welding parameter variation ranges during carried out experimental serie
Tabela 2. Opsezi varijacije parametara zavarivanja tokom izvedenih eksperimentalnih serija

Welds in the first stages were evaluated by visual inspection and macrographs of at least two cross section. Based on the optimized welding parameters subsequent investigations were focused on the magnetic unit. Therein, still on-sided single pass welds were done. Parameter optimization herein included the alteration of the magnetic flux density via the coil current I_C from 1A to its maximum of 3A in 3 steps, as well as an alteration of the welding voltage from the standard characteristic to + 20%. Macrographs of cross sections and HF-camera videos were used for evaluation in this series. Although the overall welding process was stable some agitation of the weld arc and irregularities of the direction of motion

Zavareni spojevi u prvim fazama su procenjivani vizuelnim pregledom i makrografima najmanje dva poprečna preseka. Na osnovu optimizovanih parametara zavarivanja naredna istraživanja su fokusirana na magnetnu jedinicu. U tome su izvedeni i dalje jednostrani zavareni spojevi. Optimizacija parametara je uključivala promenu gustine magnetnog fluksa preko struje I_C od 1A do maksimuma od 3A u 3 koraka, kao i promenu napona zavarivanja od standardne karakteristike do + 20%. Za procenu u ovoj seriji korišćeni su makrografi poprečnih preseka i videozapisa HF kamere. Iako je celokupni proces zavarivanja bio stabilan, uočeno je mešanje luka i nepravilnosti smera kretanja kapi. Zbog toga je bilo teško



of the droplet was observed. Therefore, it was difficult to measure the angle of the arc and droplets deflections directly. Alternatively, the angle α between the molten wire tip and the still solid vertical filler wire was used as a reference, s.Fig. 2.

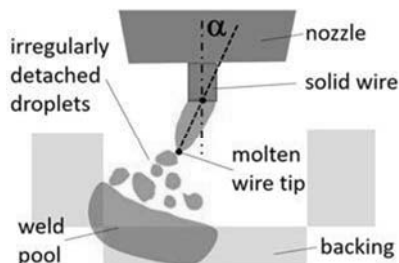


Fig. 2. Schematic of measured angle for evaluation of magnetic deflection.

Slika 2. Šema izmerenog ugla za procenu magnetnog skretanja

Finally, a fine tuning series was carried out for the optimum value of I_W for the intended two-pass-per-layer, to and fro continuous weld sequence. I_W therefore was adjusted within a narrow band of 5% from the previously defined optimum of the single sided welds. As required in the standard, samples were preheated to 300°C to avoid formation of phases other than Pearlite. During the fine tuning series a more exact evaluation of results was done based on measurement of geometrical aspects of the beads in three cross sections at $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ and $\frac{3}{4}$ of the length of each weld, see a_i and c_i in Fig. 3.

direktno izmeriti ugao skretanja luka i kapljica. Alternativno, kao referenca je korišćen ugao između vrha rastopljene žice i još uvek čvrste vertikalne žice za zavarivanje, sl. 2.

Konačno, izvršena je serija finog podešavanja za optimalnu vrednost I_W za predviđenu sekvencu sa dva prolaza po sloju, do i od neprekidnog zavarivanja. Stoga je I_W podešena u uskom pojasu od 5% od prethodno definisanog optimuma jednostrukih zavara. Kao što je zahtevano u standardu, uzorci su predgrejani na 300 °C da bi se izbeglo stvaranje drugih faza osim perlita. Tokom serija finog podešavanja preciznija procena rezultata izvršena je na osnovu merenja geometrijskih aspekata zavara u tri preseka pri $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ i $\frac{3}{4}$ dužine svakog šava, vidi a_i i c_i na slici 3.

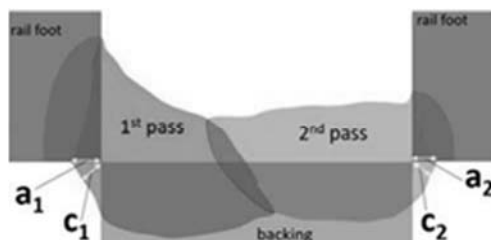


Fig. 3. Schematic of measured lateral and diagonal penetration in evaluated cross sections.

Slika 3. Shematski prikaz izmerenog bočnog i dijagonalnog uvarivanja u procenjenim poprečnim presecima

4. Results

4.1 Welding parameters optimization

Best results were obtained if on the one side was maximized in order to increase the penetration and to have a spray arc where droplets can be deflected easily. However, on the other side it was found that the penetration did not depend on the high heat input from high I_W alone, but, rather on the ratio of I_W and the deposition rate. a_i and c_i were highest if this ratio was maximized by also increasing the welding velocity V_W highest possible. This can be explained as follows: Although an increase of V_W meant a decrease in heat input per unit length, it also meant a lower relative deposition rate. Thus the weld gap was filled slower. Hence the weld pool could penetrate the sidewall more.

4. Rezultati

4.2 Optimizacija parametara zavarivanja

Najbolji rezultati su dobijeni ako je sa jedne strane I_W maksimizira da bi se povećalo uvarivanje i da bi se dobio raspršeni (sprej) luk gde je kapljice lako skretati. Međutim, sa druge strane, utvrđeno je da uvarivanje nije zavisilo od visokog unosa toplote usled velike I_W , već od odnosa I_W i brzine deponovanja. a_i i c_i bili su najviši ako je ovaj odnos maksimiziran uz najveće moguće brzine zavarivanja V_W . Ovo se može objasniti na sledeći način: lako povećanje V_W znači smanjenje unosa toplote po jedinici dužine, to je takođe značilo nižu relativnu brzinu deponovanja. Tako je zazor popunjen sporije. Stoga bi zavarivačka kupka mogla prodrati kroz bočnu debljinu zida i time



and thus improve a_i and c_i . Therefore, when both I_W and at the same time V_W are - within the limits for a stable process - increased to a maximum, the best results could be achieved

For what concerns the optimum diameter D_F of the filler wire the best results were obtained with 1.6mm, From the comparison of the three cross sections of welds with same I_W and V_W but different D_F in Fig. 4 it can be derived that the weld pool was flatter and wider for larger D_F . Although it penetrates vertically deeper for small D_F , this maximum is reached through a narrow cone shaped weld pool, which is located too little to the side of the weld gap and therefore $c_i = 0$ and no root is formed. This fact can also be derived from the position of the weld bead inside the weld gap, which sits deeper and more to the side for larger D_F . As a result, the relative vertical position of the maximum lateral penetration, is labelled with h_P in Fig. 4 (a), (b) and (c), decreases with increasing D_F . In combination with the changed shape of the weld pool this results in a decrease of the filling of the weld gap (marked in yellow in Fig. 4 with increasing D_F . In summary this means, by using a larger filler wire D_F the location of penetration can be better pushed towards the intended location, close to the lateral edge of the root.

poboljšati a_i i c_i . Stoga, kada su I_W i istovremeno V_W - u granicama stabilnog procesa - povećani do maksimuma, mogu se postići najbolji rezultati poboljšati a_i i c_i . Stoga, kada su I_W i istovremeno V_W - u granicama stabilnog procesa - povećani do maksimuma, mogu se postići najbolji rezultati. Što se tiče optimalnog prečnika D_F žice zazavarivanje, najbolji rezultati su dobijeni sa 1.6mm, od poređenja tri preseka zavarenih spojeva sa istim I_W i V_W , ali različitog D_F . sa slike 4, može se izvesti da zavarivačka kupka bude ravnija i šir za veći D_F . Iako prodire vertikalno dublje kod malog D_F , ovaj maksimum se postiže kroz uski konusni oblik šava, koji je vrlo malo pomeren na stranu zazora i zato je $c_i = 0$ i nema korena. Ova činjenica se takođe može izvesti iz pozicije šava zavara unutar zazora, koji se nalazi dublje i više na strani za veći D_F . Kao rezultat, relativna vertikalna pozicija maksimalnog bočnog uvarivanja, označena je sa h_P na slici 4 (a), (b) i (c), smanjuje se sa povećanjem D_F . U kombinaciji sa promenjenim oblikom zavarivačke kupke to dovodi do smanjenja popunjenosti zazora (označeno žutom bojom na slici 4 sa povećanjem D_F . Ukratko, to znači, korišćenjem veće žice za zavarivanje D_F mesto uvarivanja se može bolje gurnuti prema predviđenoj lokaciji, blizu bočne ivice korena.

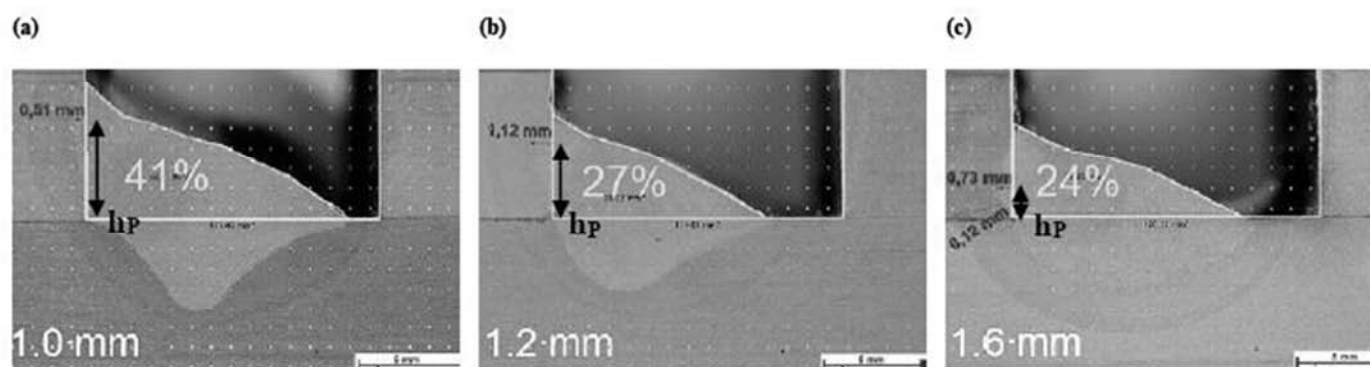


Fig. 4. Comparison of shape of penetration and degree of filling for one-sided welds of same I_W and V_W , I_C and U_W , but varying D_F : (a)... 1.0mm (b)... 1.2mm (c)... 1.6mm .

Slika 4. Poređenje oblika uvarivanja i stepena punjenja za jednostrane zavarene spojeve istih I_W i V_W , I_C i U_W , ali varirajući D_F : (a)... 1.0mm (b)... 1.2mm (c)... 1.6mm

For what concerns investigation of the process behavior under an external magnetic field the following results can be presented: An almost linear correlation between the strength of the magnetic field characterized by the coil current I_C and the lateral deflection of weld arc and droplets was found, s. Fig. 5. Thus, lateral penetration can be maximized by also maximizing the strength of the external magnetic field. The only limitation to this finding resulted from the given equipment.

Što se tiče istraživanja ponašanja procesa pod spoljašnjim magnetnim poljem, mogu se prikazati sledeći rezultati: Nađena je skoro linearna korelacija između jačine magnetnog polja koje karakteriše struja zavojnice I_C i bočnog skretanja luka i kapljica, Slika 5. Dakle, bočno uvarivanje se može maksimizirati tako što se maksimizira snaga spoljašnjeg magnetnog polja. Jedino ograničenje ovog nalaza rezultuje iz date opreme.

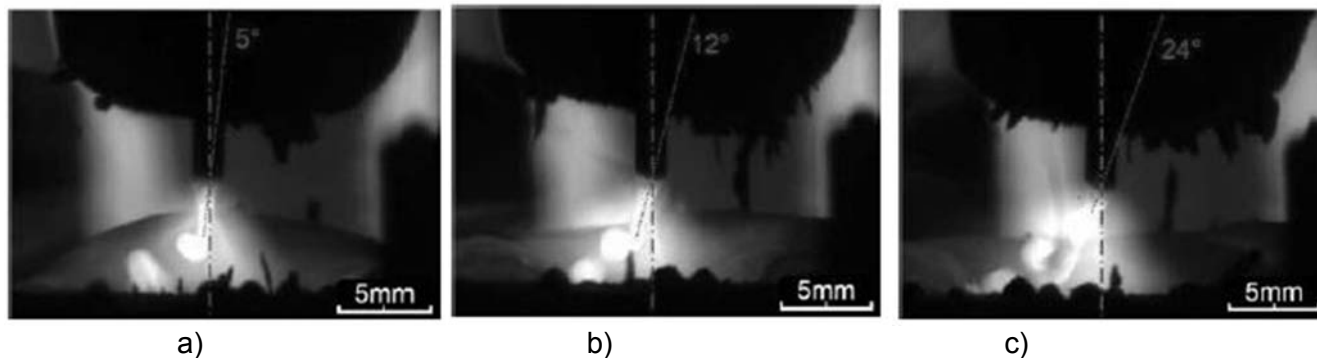


Fig. 5. Weld arc and droplet deflection for varying strength of external magnetic field (a)... $I_C=1A$ (5mT) (b)... $I_C=2A$ (10mT) (c)... $I_C=3A$ (30mT)

Slika 5. Skretanje luka i kapljica za promenu jačine spoljašnjeg magnetnog polja (a)... $I_C = 1A$ (5mT) (b)... $I_C = 2A$ (10mT) (c)... $I_C = 3A$ (30mT)

For some experiments of high I_C , the yoke adhered to the side wall of the weld sample which caused a magnetic shortcut and thus malfunction.

Furthermore, it was found that increased welding voltage U_W is beneficial in two ways. First, an increase of U_W increases the heat input and thus the penetration. Second, it also increased the length of the weld arc and therefore the length of interaction of the external magnetic field with the weld arc and droplets, s. Fig. 6.

Za neke eksperimente visoke I_C , jaram je prijanjao na bočni zid uzorka zavarenog spoja koji je izazvao magnetnu kratki spoj i time prekinuo.

Nadalje, utvrđeno je da je povećanje napona zavarivanja U_W korisno na dva načina. Prvo, povećanje U_W povećava unos toplote i time uvarivanje. Drugo, takođe je povećana dužina zavarenog spoja, a time i dužina interakcije spoljašnjeg magnetnog polja sa lukom i kapljicama, sl. 6.

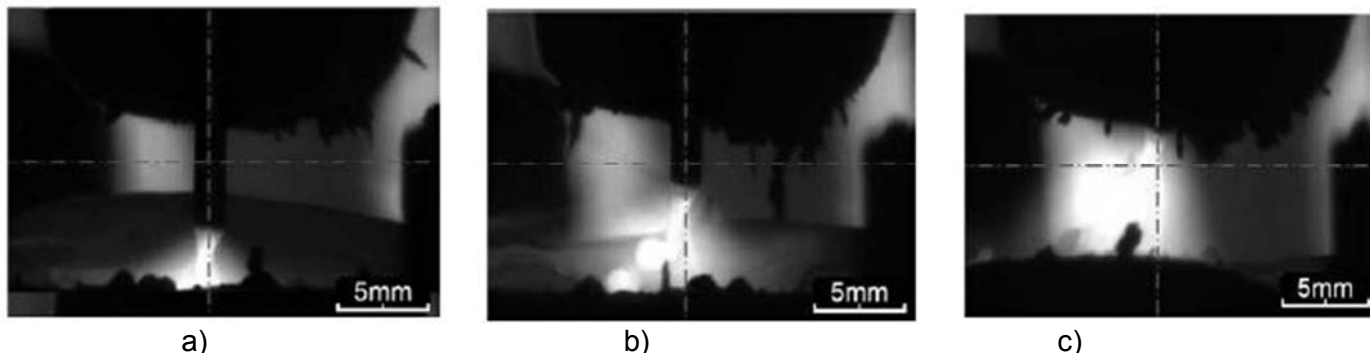


Fig. 6. Weld arc length for varied increase of U_W (a)... standard value of $U_W +0\%$ (b)... $+10\%$ (c)... 20% .

Slika 6. Dužina električnog luka za različito povećanje U_W (a).. standardna vrednost $U_W + 0\%$ (b).. $+ 10\%$ (c).. 20% .

Therefore, the droplet has a longer trajectory and thus more space and time to travel to the side of the weld gap. However, contrary to I_C , for U_W there was an upper limit at about $+12\%$ of the standard U_W for the found optimum I_W value. If U_W was too high the arc partially bounced outside from the weld gap. As a result, the weld process became unstable. This resulted in weld flaws of different types such as droplet expulsion and thus increased spatter as well as high amount of pores through disturbance of the gas flow. However, because of the beneficial influence of the increase (length of the weld arc) the best results were obtained from welds with U_W values closest possible to this limit.

The effect of the external magnetic field can be derived from the comparison of HF-camera images in Fig. 7. It can be seen that the external magnetic field not only deflects the weld arc but also the

Stoga, kapljica ima dužu putanju i time više prostora i vremena za putovanje na stranu zazora. Međutim, za razliku od I_C , za U_W je postojala gornja granica na oko $+ 12\%$ od standardnog U_W za pronađenu optimalnu vrednost I_W . Ako je U_W bio previsok, luk se delimično odbijao od zazora. Kao rezultat, proces zavarivanja postaje nestabilan. Ovo je rezultovalo raznim vrstama grešaka kao što je izbacivanje kapljica i time povećano prskanje kao i velika količina pora zbog poremećaja protoka gasa. Međutim, zbog blagotvornog uticaja povećanja (dužine luka zavarivanja) najbolji rezultati su dobijeni iz zavarenih spojeva sa U_W vrednostima koje su najbliže moguće ovoj granici.

Uticaj spoljašnjeg magnetnog polja može se izvesti iz poređenja slika HF kamere na slici 7. Može se videti da spoljno magnetno polje ne samo da odbija luk nego i kapljice. Utvrđeno je da se ne menja



droplets. It was found that not only the direction of the droplet is changed but also the mode of detachment. Under influence of the external magnetic field coarser droplets are formed and thus the detachment speed is less. Furthermore, droplets spin clockwise during the transition into the weld pool. The finally proposed optimum welding parameter set for the first and the second pass are given in Table 3.

samo pravac kapi, već i način odvajanja. Pod uticajem spoljašnjeg magnetnog polja formiraju se grublje kapljice, tako da je brzina odvajanja manja. Štaviše, kapljice se okreću u smeru kazaljke na satu tokom prelaska u zavarivačku kupku. Konačno predloženi optimalni parametri zavarivanja za prvi i drugi prolaz dat je u tabeli 3.

Pass	I_w (A)	U_w (V)	V_w (cm.min ⁻¹)	I_c (A)
1 st	400	31,1	64,5	3
2 nd	380	30,7	64,5	3

Table 3. Optimum found welding parameters for GMAW the first two passes of root welding.

Tabela 3. Optimalno pronađeni parametri zavarivanja za GMAV prva dva prolaza zavarivanja korena.

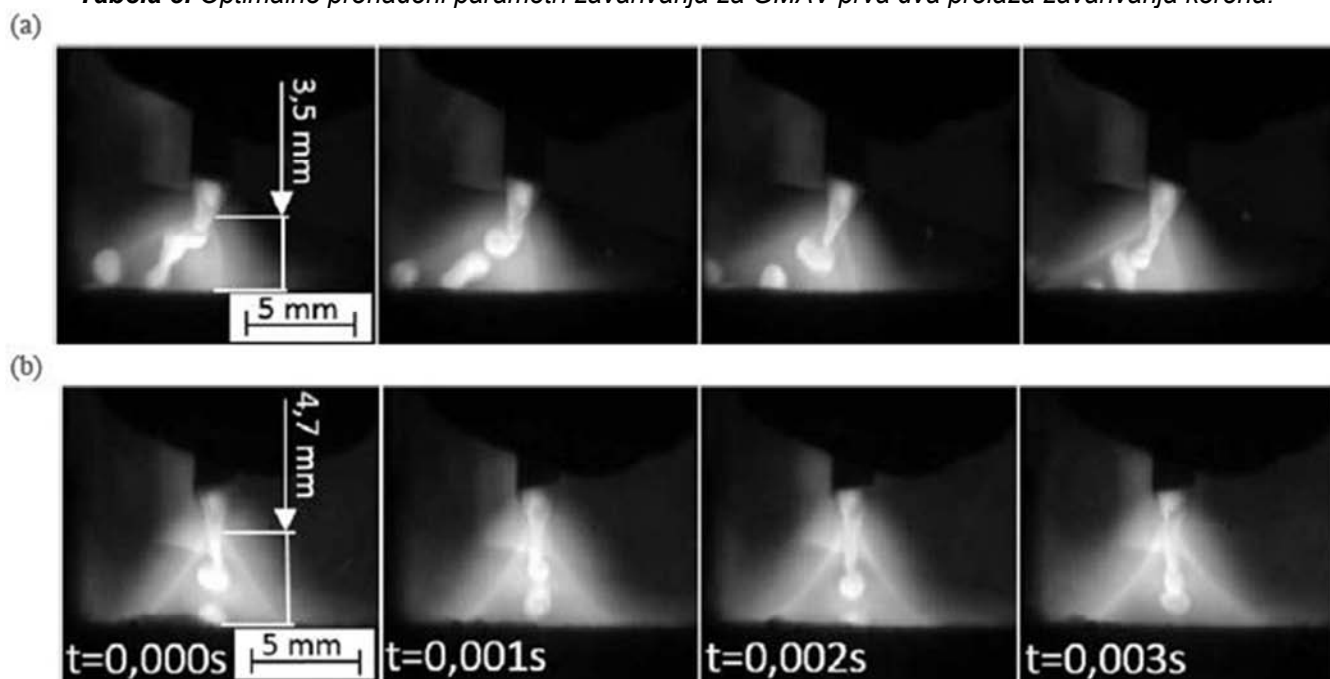


Fig. 7. Comparison of optimized welding process . (a) with magnetic deflection $I_C = 3A$ (b) without magnetic deflection.

Slika 7. Poređenje optimizovanih procesa zavarivanja . (a) sa skretanjem luka $I_C = 3A$ (b) bez skretanja luka

4.2 Optimum root weld geometry after final parameter optimizatio

The cross section in Fig. 8 represents the optimum of the achieved GMA root welding results after parameters optimization, based on the above described findings. It can be seen that a flawless weld, with good lateral penetration and a smooth collar at the transition from the base metal (BM) to the weld metal on both sides was formed. In order to illustrate the beneficial effect of the magnetic arc deflection in Fig. 9 a reference weld is presented with same parameters but not magnetic deflection is shown. It can be derived that the weld bead is located right in middle of the weld gap. The flanks of the work piece are not attained by the weld metal, thus no weld at all is formed.

4.2 Optimalna geometrija korena zuba nakon konačne optimizacije parametaran

Presek na slici 8 predstavlja optimalni rezultat postignutih rezultata zavarivanja GMA korena nakon optimizacije parametara, na osnovu gore opisanih nalaza. Može se videti da je formiran besprekoran šav, sa dobrim bočnim uvarivanjem i glatkom ogrlicom na prelazu od osnovnog metala (BM) do metala šava sa obe strane. Da bi se ilustrovala povoljan efekat otklona magnetnog luka na slici 9, prikazan je referentni šav sa istim parametrima, ali nije prikazano skretanje magneta. Može se zaključiti da se šav nalazi na sredini zazora. Na bokovima radnog komada nije postignut metal šava, pa se uopšte ne formira zavareni spoj.



4.3 Weld root geometry irregularities

Measurement results of a_i and c_i from the optimum parameter weld for the three reference cross sections are shown in Fig. 10. Irregularities in the root formation can be derived. First of all, the penetration is not uniform within one pass. Second it can be seen that in general the penetration is better for the 1st pass. Whereas the penetration continuously increases throughout the 1st pass to $a_{1max}=3.5$ mm, respectively $c_{1max}=2.3$ mm, the lateral cross sections of the 2nd pass have relatively lower penetration and $a_{2max}=1.8$ mm, respectively $c_{2max}=1.4$ mm, is found in the center cross section. From the overview of the bottom of the weld root in Fig. 11 a qualitative assessment of the welding result over the entire length is possible. First of all it can be seen that the root is continuously formed on both sides of the weld with an exception at the beginning of the 2nd pass (s. label 7 in Fig. 11). It can be seen that within the central segment of about $\frac{3}{4}$ of the entire length of the weld the above described irregularities are valid for the entire length of the weld.

Non-uniform penetration within one pass is drawn back to within one pass non-uniform temperature field as a result of the rail geometry and the high V_W . Better results for the 1st pass are drawn back to better accessibility of the heat of the weld arc and pool when the weld gap is still fully open during the 1st pass and a not yet-fully optimized balancing of heat input in between the two passes.

4.3 Nepravilnosti geometrije korena zavora

Rezultati merenja a_i i c_i kod optimalnih parametara zavarivanja za tri referentna preseka prikazani su na slici 10. Mogu se izvući nepravilnosti u formiranju korena. Prvo, uvarivanje nije ravnomerno u jednom prolazu. Drugo se može videti da je uopšte uvarivanje bolja za prvi prolaz. Dok se uvarivanje kontinuirano povećava tokom prvog prolaza na $a_{1max}=3.5$ mm, odnosno $c_{1max}=2.3$ mm, bočni poprečni preseki 2. prolaza imaju relativno manje uvarivanje i $a_{2max}=1.8$ mm, odnosno $c_{2max}=1.4$ mm, nalazi se u sredini poprečnog preseka.

Iz pregleda dna korena šava na slici 11 moguće je kvalitativno ocenjivanje rezultata zavarivanja po celoj dužini. Kao prvo, može se videti da se koren kontinuirano formira na obe strane šava sa izuzetkom na početku 2. prolaza (oznaka 7 na slici 11). Može se videti da u središnjem segmentu od oko $\frac{3}{4}$ cele dužine šava gore opisane nepravilnosti važe za celu dužinu zavarenog spoja.

Nejednoliko uvarivanje u jednom prolazu povučeni su u jedno prolazno nejednako temperaturno polje kao rezultat geometrije šine i visokog V_W . Bolji rezultati za prvi prolaz povučeni su zbog bolje dostupnosti toplote luka i kupke kada je zazor za zavarivanje još uvek potpuno otvoren tokom prvog prolaza i još nije potpuno optimizirano balansiranje unosa toplote između dva prolaza.

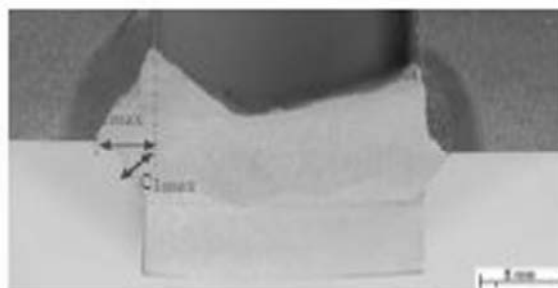


Fig. 8. Root weld geometry after optimized parameters and magnetic arc deflection in cross section at $\frac{3}{4}$ of weld length.

Slika 8. Geometrija korena zavarenog spoja posle optimizovanih parametara i skretanja magnetnog luka u preseku na $\frac{3}{4}$ dužine zavarenog spoja

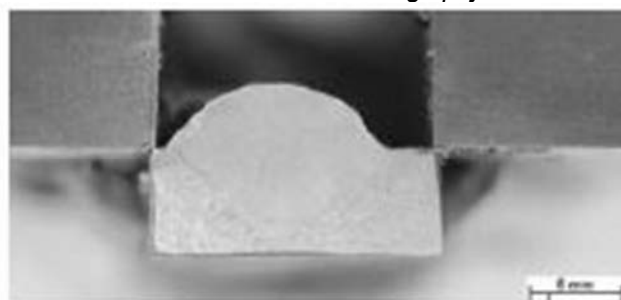


Fig. 9. Root weld geometry of reference single pass weld without magnetic arc deflection

Slika 9. Geometrija korena zavarenog spoja referentnog jednostrukog prolaza bez skretanja magnetnog luka

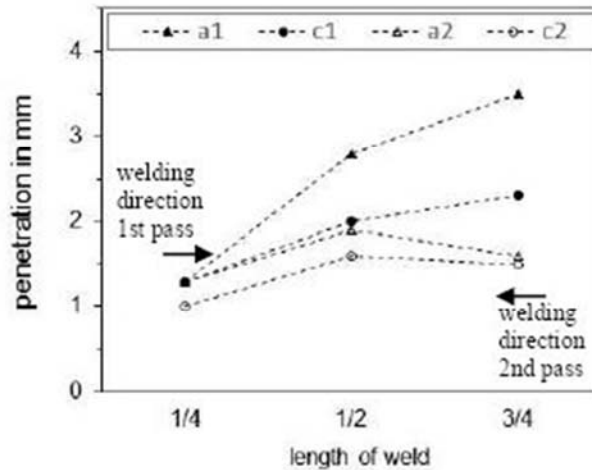


Fig. 10. Lateral and diagonal penetration in the evaluated cross sections for 1st and 2nd pass.
Slika 10. Bočno i dijagonalno uvarivanje u procenjenim presecima za 1. i 2. prolaz.

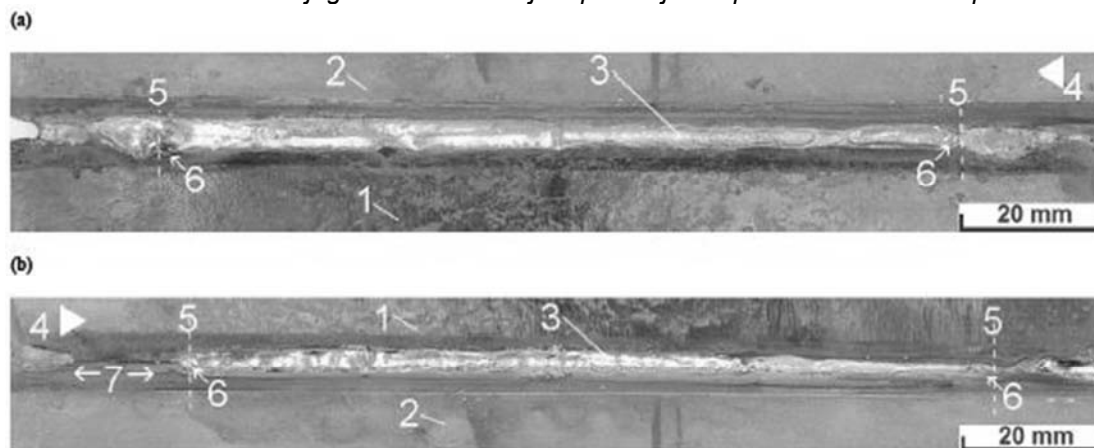


Fig. 11. Outer appearance of root layer of GMA welded rail foot after parameter optimization. (a) bottom view 1st pass (b)... bottom view 2nd pass. 1...rail foot 2... weld pool backing strip 3... Weld root 4... Welding direction 5... Sidewise run-in and run-out delimitation lines 6... TIG weld spot for fixation 7...no root

Slika 11. Spoljni izgled korenog sloja GMA zavarenih šina nakon optimizacije parametara. (donji pogled 1. prolaz (b)... pogled donji 2. prolaz 1 ... stopalo šine 2 ... podložna traka za zavarivačku kupku 3 ... koren zavarenog spoja 4 ... pravac zavarivanja 5 ... linije za razgraničavanje bočnih i potisnih tačaka 6... mesto TIG zavarivanje za fiksiranje 7... bez korena

4.4 Microstructure & hardness in the HAZ

The microstructures at different areas of the HAZ (in same cross section from the optimum weld in Fig. 8) are presented Fig. 12. It can be derived that the heat affected zone (HAZ) of the rail steel consist entirely of Pearlite. Beside the fully pearlitic matrix dispersed dark elongated spots inside the HAZ, which are identified as Mn-sulfides, marked with S in Fig. 12 (b) and (f). It results from steel production and is unchanged in the HAZ. The weld metal (WM) consist of acicular ferrite, s. Fig. 12 (f), which is the expected microstructure of the used G3Si filler wire Within a narrow band of about 50µm width along the fusion line, s. Fig. 12 (g) plate-shaped pre-eutectoid ferrite (marked with F) is found at the former austenite grain boundaries. Its formation is understood as a result of decreased carbon content caused by the high difference in carbon content between the rail steel and filler

4.4 Mikrostruktura i tvrdoća u ZUT

Mikrostrukture na različitim područjima ZUT (u istom poprečnom preseku optimalnog šava na slici 8) su prikazane na slici 12. Može se zaključiti da zona uticaja toplote (HAZ) šine u celini sadrži perlit. Pored potpuno perlitne matrice raspršene su tamno izdužene tačke unutar ZUT, koje su identifikovane kao Mn-sulfidi, označeni sa S na slici 12 (b) i (f). Oni su rezultat proizvodnje čelika i nepromenjene su u ZUT. Metal šava (WM) se sastoji od igličastog ferita, slika 12 (f), koja je očekivana mikrostruktura korišćene žice za zavarivanje. U okviru uskog pojasa širine oko 50µm duž linije stapanja, slika 12 (g) proeutektoidni ferit u obliku ploče (označen sa F) nalazi se na bivšim granicama zrna austenita. Njegovo formiranje se shvata kao rezultat smanjenog sadržaja ugljenika usled velike razlike u sadržaju ugljenika u šini i dodatnom materijalu. Iako potpuno perlitna, iz slike 12 (b) može se zaključiti



metal. Although fully pearlitic, it can be derived from Fig. 12 (b) that the optical appearance of the HAZ varies. This is an indication of the changing Pearlite morphology, which for pearlitic microstructure is defined by the colony and nodule size. Inside the HAZ close from the transition from base metal (BM) these are smaller in size and thus the morphology is much refined, s. Fig. 12 (c). Further on, the morphology is gradually coarsening towards the WM. However, inside the coarse grain zone it is still finer than in the BM, compare Fig. 12 (c) top left corner and HAZ in Fig. 12 (d).

The hardness distribution over the weld is shown in (a). The hardness in the HAZ is constantly higher than the one of the BM. The hardness increases from the BM towards the WM to over 450 HV10. The hardness in the weld metal is generally on a lower level, which is a result of the used undermatching filler wire.

da optički izgled ZUT varira. Ovo ukazuje na promenu morfologije perlita, koja je za perlitnu mikrostrukturu definisana veličinom kolonije i nodula. Unutar ZUT blizu granice sa osnovnim materijalom (BM) one su manje veličine i zbog toga je morfologija sitnija, slika 12 (c). Dalje, morfologija se postepeno povećava prema metalu šava (WM). Međutim, u zoni krupnog zrna to je još finije nego u OM, uporediti sl. 12 (c) gornji levi ugao i ZUT na slici 12 (d).

Distribucija tvrdoće na zavarenom spoju prikazana je u (a). Tvrdoća u ZUT je konstantno viša nego kod OM. Tvrdoća se povećava od OM prema metalu šava na preko 450 HV10. Tvrdoća u metalu šava je generalno na nižem nivou, što je rezultat korišćene žice za zavarivanje.

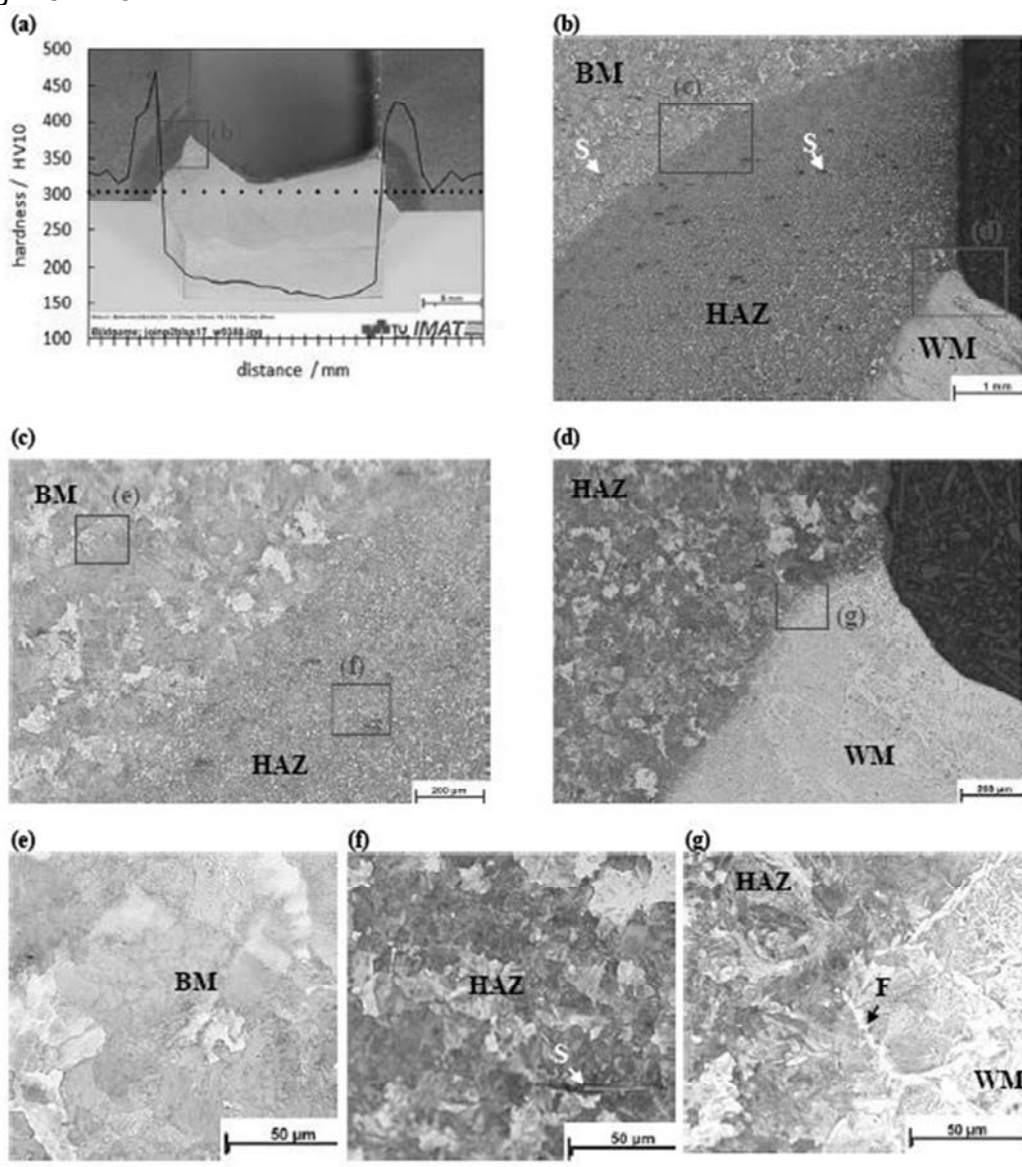


Fig. 12. Microstructure at different areas of the optimized parameter weld.

Slika 12. Mikrostruktura na različitim područjima optimizovanih parametara zavarivanja



5. Discussion

The findings of this research could in part illustrate the potential of the new approach for joining of pearlitic rails. From the comparison in Fig. 13 its advantages over conventional AT-weld can be derived: The hardness in the HAZ of the GMA welded rail is significantly and entirely above the hardness of the that of the AT-weld. Furthermore, no soft zone at the transition from BM to HAZ is observed. It can also be derived that the size of the HAZ is reduced by about 75%. If projected to the rail head, these two aspects are believed to contribute tremendously to an improvement of the wear resistance of rail welds. Furthermore, it was shown that very good lateral penetration and smooth geometry of the collar at the weld root could be attained if all necessary parameters are well optimized. The joint in this state can surely be considered as a sound weld, providing per se sufficient bonding strength. However, penetration was not yet uniform along the weld. With regards to the applicability for in the track welding the current result are thus still questionable. For an entirely sound weld and also to overcome high gap bridging tolerances, the penetration would need to be more constant. Also the sidewise run-in in and run-out sections are not yet sufficiently weldable. The overall smaller penetration of the second pass might not be enough to achieve satisfying welds. The smooth geometry of the root furthermore opts for sufficient fatigue strength of the joint.

5. Diskusija

Nalazi ovog istraživanja mogli bi delimično ilustrovati potencijal novog pristupa za spajanje perlitnih šina. Iz poređenja na slici 13 mogu se izvesti njegove prednosti u odnosu na konvencionalni AT-šav: tvrdoća u ZUT GMA zavarene šine je značajno i potpuno iznad tvrdoće AT-zavarenog spoja. Osim toga, nije primećena nikakva meka zona na prelazu sa OM na ZUT. Takođe se može uočiti da je veličina ZUT smanjena za oko 75%. Ako se projektuju na šine, veruje se da ova dva aspekta značajno doprinose poboljšanju otpornosti na habanje šinskih zavarenih spojeva. Nadalje, pokazano je da se vrlo dobro bočno uvarivanje i glatka geometrija ogrlice na korenu šava mogu postići ako su svi potrebni parametri dobro optimizovani. Spoj u ovom stanju se sigurno može smatrati šavom bez grešaka, obezbeđujući sebi dovoljnu čvrstoću vezivanja. Međutim, uvarivanje još nije bilo ravnomerno šava. S obzirom na primenljivost za zavarivanje koloseka, trenutni rezultat je stoga i dalje pod znakom pitanja. Za potpuno zdrav šav i za prevazilaženje velikih tolerancija zazora, uvarivanje bi trebalo da bude konstantnije. Isto tako, bočni ulazi i izlazi nisu dovoljno zavarljivi. Ukupno manje uvarivanje drugog prolaza možda nije dovoljno da se postigne zadovoljavajuće zavarene spojeve. Glatka geometrija korena obezbeđuje dovoljnu zamornu čvrstoću spoja.

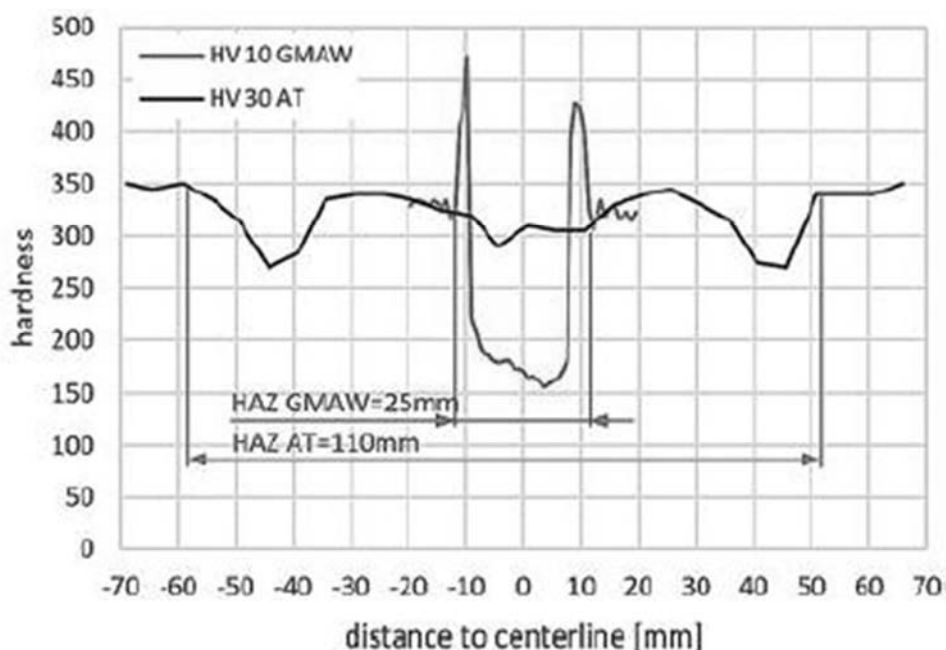


Fig. 13. Hardness and size of HAZ: Green... GMAW from this work. Black... exemplary state of the art AT-weld of same rail steel.

Slika 13. Tvrdoća i veličina ZUTW Zelena... GMAV iz ovog rada. Crni... primeri najsavremenijeg AT-zavara iste šine.



6. Conclusions

GMAW with magnetic arc deflection for the root layers of a pearlitic rails weld showed under laboratory conditions and after parameter optimization very promising results. The chosen two-pass-per layer sequence was approved to be beneficial, because it enables one to focus the weld on one side per pass, and thus adjust parameters to improve the penetration of each pass individually. In this regard, heat input optimization concluded that the highest possible ratio of the welding current I_W (~ 400A) and the deposition rate (via high welding speed V_W ~64cm/min) for the 1.6mm filler wire showed the best results. In combination with the magnetic deflection it causes a laterally repositioned weld pool, which penetrates the BM at the root best. The present spray arc mode is also beneficial for the magnetic arc deflection. By a relative increase of the welding voltage U_W of up to about +12% the arc length is increased and the magnetic deflection further improved.

Furthermore, because of the high V_W and thus reduced heat input the microstructure in the HAZ is refined but still pearlitic. As a result of the refined pearlitic microstructure also the hardness of the HAZ is above the BM. Furthermore, because of the small heat input also the size of the HAZ is small in comparison to standard rail welding processes (75% reductions in size when compared to AT-welding). The lateral weld arc deflection by an external magnetic field works best if the field is parallel to the welding direction and the magnetic flux density at the weld is highest possible. The maximum magnetic flux density tested in this work was 30mT.

By applying these parameters, a smooth transition collar of the root and a maximum lateral penetration at the root of 3.5mm could be obtained.

The intended penetration at the root was found to be not constant over the full length of the weld. Lateral run-in and run-out with partial no root formation at the 2nd pass was found.

7. Outlook

The fundamental studies of this work have pointed out a strong potential of GMAW for pearlitic rails. However, further investigations are believed to be essential to bring the process closer to an applicability for in the track welding:

- improve results at run-in and run-out area via further optimization of welding parameters and the setup.
- equalize penetration over entire weld and in between of 1st and 2nd pass via further pass-wise parameter optimization

6. Zaključci

GMAW sa skretanjem magnetnog luka za korene slojeve perlitnih šina pokazuje u laboratorijskim uslovima i nakon optimizacije parametara veoma obećavajuće rezultate. Izabrana sekvenca sa dva prolaza po sloju je odobrena da bude korisna, jer omogućava fokus na jednostrani šav po prolazu, i na taj način podese parametre kako bi se poboljšalo uvarivanje svakog prolaza pojedinačno. U tom smislu, optimizacijom utroška toplote je zaključeno da je najbolji mogući odnos struje zavarivanja I_W (~ 400A) i brzine deponovanja (preko visoke brzine zavarivanja V_W ~ 64cm / min) za žicu za zavarivanje od 1.6mm pokazao najbolje rezultate. U kombinaciji sa magnetnim skretanjem, on izaziva bočno premeštanje zavarivačke kupke, koja najbolje prodire u OM. Sadašnji raspršeni (sprej) luk je takođe koristan za skretanje magnetnog luka. Relativnim povećanjem napona za zavarivanje U_W do oko + 12% povećava se dužina luka i dodatno se poboljšava magnetno skretanje.

Osim toga, zbog visokog V_W i na taj način smanjenog unosa toplote, mikrostruktura u ZUT je rafinirana, ali još uvek perlitna. Kao rezultat rafinirane perlitne mikrostrukture, tvrdoća ZUT je iznad OM. Pored toga, zbog malog unosa toplote, veličina ZUT je mala u poređenju sa standardnim postupcima zavarivanja (75% smanjenja u odnosu na AT-zavarivanje). Bočno odstupanje luka skretanjem, spoljašnjim magnetnim poljem najbolje funkcioniše ako je polje paralelno sa pravcem zavarivanja, a gustina magnetnog fluksa na zavarenom spoju najveća. Maksimalna gustina magnetnog fluksa testirana u ovom radu bila je 30mT.

Primenom ovih parametara može se dobiti glatka ogrlica prelaza korena i maksimalno bočno uvarivanje u korenu od 3,5 mm.

Nađeno je da nameravano uvarivanje u korenu nije konstantna po celoj dužini šava. Nađeno je bočno neslaganje i isticanje s delimičnim formiranjem korena na 2. prolazu.

7. Perspektiva

Fundamentalne studije ovog rada ukazale su na veliki potencijal GMAW za perlitne šine. Međutim, smatra se da su dalja istraživanja od suštinskog značaja za približavanje procesa primenljivosti za zavarivanje koloseka:

- poboljšanje rezultata u oblasti neslaganja i isticanja daljom optimizacijom parametara zavarivanja i podešavanja.
- izjednačiti uvarivanje kroz ceo šav i između 1. i 2. prolaza daljom optimizacijom parametara



- redesign and optimize the magnetic unit to test the possibility to further increase lateral penetration via an increase of the magnetic flux density. This should comprise improvements to achieve higher magnetic flux densities and stronger mechanical fixation of the yoke.

To permit a future transition from the here carried out laboratory tests to in the track GMA rail welding we see these further fields of investigations are believed necessary:

- welding of entire cross sections with for each part of the rail's cross section optimization of the welding parameters, which include weld backing. This would also include a suitable design of the welding torch and magnetic unit.

- testing of mechanical properties: fatigue strength of the entire joint and wear resistance at the rail head, in order to assess if the requirements in the rail standards can be met.

- testing of gap bridging capabilities of the magnetic arc deflection.

- design and optimization of automatisisation equipment and control for in track welding.

General foster notes / Acknowledgment

This work was carried out in the course of the K-project 'metal JOINing P2 High performance welding of rails'. The K-Project Network of Excellence for Metal JOINing is fostered in the frame of COMET - Competence Centers for Excellent Technologies by BMWFW, BMVIT, FFG, Land Oberösterreich, Land Steiermark, Land Tirol and SFG. The program COMET is handled by FFG.

References

- [1] European Commission, "Fourth report on monitoring development of the rail market" pp. 1–43, 2014.
- [2] A. Skyttebol, B. L. Josefson, and J. W. Ringsberg, "Fatigue crack growth in a welded rail under the influence of residual stresses" Eng. Fract. Mech., vol. 72, pp. 271–285, 2005.
- [3] A. Ekberg and B. Paulsson, "Concluding technical report - Innotrack." International Union of Railways (UIC), p. 288, 2010.
- [4] S. Romano, D. Manenti, S. Beretta, and U. Zerbst, "Semi-probabilistic method for residual lifetime of aluminothermic welded rails with foot cracks" Theor. Appl. Fract. Mech., vol. 85, pp. 398–411, 2016.
- [5] Competence Center Welding (CCW), "voestalpineSchienenGmbH, Leoben/Donawitz AUSTRIA." Leoben/Donawitz AUSTRIA, 2015.

- redizajnirati i optimizovati magnetnu jedinicu kako bi se ispitala mogućnost daljeg povećanja bočnog uvarivanja povećanjem gustine magnetnog fluksa. Ovo bi trebalo da obuhvati poboljšanja za postizanje veće gustine magnetnog fluksa i jaču mehaničku fiksaciju jarma.

Da bi se omogućila budući prenos ovde sprovedenih laboratorijskih testova na GMA zavarivanje šina na železnici, vidimo da su te neophodne dalje oblasti istraživanja:

- zavarivanje celih poprečnih preseka sa za svaki deo poprečnog preseka železničke šine optimizacijom parametara zavarivanja, koji uključuju i podloške za zavarene spojeve. Ovo bi takođe uključivalo pogodan dizajn gorionika za zavarivanje i magnetne jedinice.

- Ispitivanje mehaničkih svojstava: zamorna čvrstoća celog spoja i otpornost na habanje na glavi šine, kako bi se procenilo da li se mogu ispuniti zahtevi u železničkim standardima .

- Ispitivanje mogućnosti premoščavanja zazora, skretanjem magnetnog luka.

- projektovanje i optimizacija opreme za automatizaciju i kontrolu kod zavarivanja koloseka.

Dopisi opšte podrške / Zahvalnost

Ovaj rad je izveden tokom K-projekta project „metal JOINing P2 Visokokvalitetno zavarivanje šina“. U okviru COMET-a podstiče se K-Project mreža izvrsnosti za metal JOINing - Kompetentni centri za odlične tehnologije BMVFFV, BMVIT, FFG, Land Oberösterreich, Land Steiermark, Land Tirol i SFG. Programom COMET upravlja FFG.

- [6] P. Micenko and H. Li, "Double Dip Hardness Profiles in Rail Weld Heat-affected Zone — Literature and Research Review Report" Brisbane, Australia, 2013.
- [7] P. J. Mutton and E. F. Alvarez, "Failure modes in aluminothermic rail welds under high axle load conditions" Eng. Fail. Anal., vol. 11, pp. 151–166, 2004.
- [8] J. Keichel and R. Gehrman, "Neues Thermit-Schweißverfahren SkV-Elite" Elektro Thermit GmbH & Co KG Halle Germany, EI-Eisenbahningenieur, pp. 50–53, Sep-2008.
- [9] "Railway applications - Track - Rail - Part 1: Vignole railway rails 46kg/m and above." Austrian/European Standard OENORM EN 13674-1, 2011.

ČASOPIS ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE**Cenovnik oglasnog prostora u četiri uzastopna broja 2019**

	A4	2/2	1/1	1/2	1/4	1/8
dimenzije (mm)		2 x 210 x 297	210 x 297	180 x 120	90 x 120	90 x 60
DIN	crno/beli	-	39 000	23 000	16 000	10 000
	kolor	105 000	75 000	-	-	-

- U cene nije uračunat PDV 20%.
- Objavljanje oglasa u samo jednom broju iznosi 30% od datih cena.
- Reklamni tekstovi: 25 % od cene površine crno/belih oglasa.
- Dostava materijala:
 - za crno-beli film ili CD (Adobe Photoshop / CorelDRAW);
 - za kolor film ili CD (Adobe Photoshop / CorelDRAW);
 - izrada filma sa CD: 10 % od cene angažovanog prostora.
- Na web prezentaciji DUZS-a, (www.duzs.org.rs), na strani Marketing, objavljuje se pregled firmi-oglašivača sa podacima o glavnim grupama proizvoda/usluga i adresom web prezentacije. Svi posetioci naše web prezentacije mogu da posete i web prezentacije oglašivača, preko aktivnih linkova koji se nalaze na ovoj stranici!

WELDING & WELDED STRUCTURES, Quarterly review
Advertising prices for four successive numbers in 2019

	A4	2/2	1/1	1/2	1/4	1/8
dimensions (mm)		2 x 210 x 297	210 x 297	180 x 120	90 x 120	90 x 60
EUR	black/white	-	840	432	336	240
	colour	2 640	1 680	-	-	-

- VAT 20% included.
- Advertising in one number only is 35% of the given prices.
- Commercial articles: 30 % of black/white advertising price.
- Print material:
 - for black/white CD (Adobe Photoshop / CorelDRAW)
 - for color CD (Adobe Photoshop / CorelDRAW).
- All the visitors of our web site may be linked to the advertisers' web site.

INDEKS OGLAŠIVAČA
ADVERTISERS INDEX

DUCTIL SA
 WELD-ING
 YASKAWA SLOVENIJA
 HONEX
 ELIMP
 NEMINIK
 MESSER TEHNOGAS
 APAVE Ver Tech Serbia

1. ČLANARINA DUZS za 2019. godinu **3.500 dinara**
 Članovima DUZS **GRATIS** godišnje izdanje časopisa "ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE"
2. ČASOPIS "ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE" - 2019. godina u slobodnoj prodaji (u cene je uračunat PDV 10%):
 - cena pojedinačnog broja..... 825 dinara
 - godišnja pretplata za 1 komplet brojeva godišnjeg izdanja..... 2.500 dinara
3. ČASOPIS - stari brojevi (u cene je uračunat PDV 10%)
 - a) u slobodnoj prodaji:
 - cena pojedinačnog broja za 2017. godinu 500 dinara
 - cena pojedinačnog broja za prethodne godine..... 250 dinara
 - b) beneficirane cene za članove DUZS:
 - cena pojedinačnog broja za 2018. godinu (pouzećem ili preuzimanjem) 400 dinara
 - cena pojedinačnog broja za prethodne godine (pouzećem ili preuzimanjem) Gratis
4. Knjiga Organizacija i ekonomika zavarivačkih radova – autor: prof. dr Zoran Radojević (uračunat PDV 10%) 1.045 dinara
5. Zbirke standarda OBEZBEĐENJE KVALITETA U ZAVARIVANJU, komplet 4 toma 6.750 dinara