



ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE

WELDING & WELDED STRUCTURES

God. 68 Vol. 68	Br. 3 No. 3	97-144 97-144	Beograd Belgrade	Srbija Serbia	2023. 2023.
--------------------	----------------	------------------	---------------------	------------------	----------------

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

Dr Zoran Odanović, dipl.ing.

duzs011@gmail.com, odanovic@ptt.rs

Tehnički urednik / Technical Editor

Branislav Lukić, dipl.ing

Redakcijski odbor / Editorial Board

Dr Nenad Radović, dipl.ing.

Dr Radomir Jovičić, dipl.ing.

Dr Srđan Bulatović, 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)



Duzs011@gmail.com.rs
www.duzs.org.rs

UREĐIVAČKI ODBOR / PUBLISHING COUNCIL

Dr Vencislav Grabulov, dipl.ing, (predsednik)

Prof.dr Vukić Lazić, dipl.ing.

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

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

Prof. dr Dragoslav Dobraš, 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 - Каталогизација у публикацији
Народна 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 Zoran Odanović. – Vol. 41, no. 1
(1996)- . - Beograd : DUZS - Društvo za unapređivanje
zavarivanja u Srbiji, 1996-. (Beograd : VIS studio).-29 cm

Tromesečno. Je nastavak: Zavarivač = 0513-8523
ISSN 0354-7965 = Zavarivanje i zavarene konstrukcije
COBISS.SR-ID 105396743

CENE I NARUDŽBINA ZA 2023.

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.

Bulevar Arsenija Čamojevića 123, Beograd

Tiraž: 400 kom.

SADRŽAJ

CONTENTS



NAUKA•ISTRAŽIVANJE•RAZVOJ

SCIENCE•RESEARCH•DEVELOPMENT

99

ANALIZA TOPLOTNIH EFEKATA U POSTUPCIMA
FRIKCIONOG ZAVARIVANJA MEŠANJEMANALYSIS OF THERMAL EFFECTS IN WELDING
PROCESSES WITH FRICTION STIR WELDING*Aleksandar Jovanović, Aleksandar Sedmak, Srđan Tadić*

NAUKA•ISTRAŽIVANJE•RAZVOJ

SCIENCE•RESEARCH•DEVELOPMENT

107

TEHNOLOGIJE SPAJANJA LIMOVA OD ČELIKA I
LEGURA ALUMINIJA – PREGLED STANJAJOINING TECHNOLOGY OF STEEL AND ALLUMINUM
ALLOY SHEETS – STATE OF THE ART*Aleksija Đurić, Dragan Milčić, Damjan Klobčar, Biljana Marković, Miodrag Milčić*

NAUKA•ISTRAŽIVANJE•RAZVOJ

SCIENCE•RESEARCH•DEVELOPMENT

119

ISPITIVANJA ZAVARENIH SPOJEVA
NISKOLEGIRANOG ČELIKA POVIŠENE ČVRSTOĆE
KLASE 700 MPAINVESTIGATION OF WELDED JOINTS OF 700 MPA
GRADE HIGH STRENGTH LOW ALLOY STEEL*Srđan Bulatović*

PRAKSA

PRACTICE

133

ZAVARIVANJE CIJEVI IZ NISKOUGLJENIČNOG
ČELIKA TIG POSTUPKOMWELDING OF PIPES FROM LOW-CARBON STEEL BY
TIG PROCEDURE*Stjepan Kožuh, Mirko Gojić, Ivana Ivanić, Aleš Nagode, Kristijan Jerković*

PRAKSA

PRACTICE

137

SANACIJA PUKOTINE NA NOSIVOM PRSTENU
ROTACIONE PEĆI CEMENTARE KAKANJCRACK REPAIR ON THE BEARING RING OF THE
ROTARY KILN OF THE KAKANJ CEMENT PLANT*Namik Džibrić, Sead Avdić, Resul Hamzić*

VESTI

NEWS

117

VESTI – PRIKAZ MONOGRAFIJE – NERĐAJUĆI ČELICI

128

VESTI - 76. GODIŠNJA SKUPŠTINA MEĐUNARODNOG INSTITUTA ZA ZAVARIVANJE I MEĐUNARODNA
KONFERENCIJA O ZAVARIVANJU I SPAJANJU, SINGAPUR, 16 – 21. JUL 2023.

132

VESTI - KONFERENCIJA JOINTRANS 2024

132

VESTI - 6. MEĐUNARODNI KONGRES (IC-2024) - NAPREDAK KA ODRŽIVOM I ZELENOM ZAVARIVANJU

132

VESTI - MEĐUNARODNO TAKMIČENJE U ZAVARIVANJU 2023. - ARC CUP

132

VESTI - 18. MEĐUNARODNI SIMPOZIJUM O CEVNIM KONSTRUKCIJAMA (ISTS18)

144

MARKETING



ANALIZA TOPLOTNIH EFEKATA U POSTUPCIMA FRIKCIONOG ZAVARIVANJA MEŠANJEM

ANALYSIS OF THERMAL EFFECTS IN WELDING PROCESSES WITH FRICTION STIR WELDING

Originalni naučni rad / Original scientific paper

Rad primljen / Paper received:

Avgust 2022.

Rad prihvaćen / Paper accepted:

Maj 2023.

Adresa autora / Author's address:

¹ Mont-R d.o.o., Dubravska 2d, Meljak, Srbija

² Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Kraljice Marije 16, Beograd, Srbija

³ Inovacioni centar Mašinskog fakulteta u Beogradu, Kraljice Marije 16, Beograd, Srbija

email: ^a a.jovanovic@mont-r.rs

Ključne reči: zavarivanje trenjem sa mešanjem, generisanje toplote, prenos toplote, analitičko modeliranje.

Keywords: friction stir welding (FSW), heat generation, heat transfer, analytical modelling.

Rezime

U radu je opisano formiranje analitičkog modela generisanja i prenosa toplote pri zavarivanja trenjem sa mešanjem. Rešavanjem diferencijalnih jednačina prenosa toplote, prilagođenim za zavarivanje trenjem sa mešanjem postavljene su osnove za formiranje analitičkog modela. Da bi se varirali tehnološki parametri zavarivanja koji utiču na generisanje toplote, uprošćeno je naponskog stanja materijala na povišenim temperaturama. Cilj je bila simulacija prenosa toplote za tanke i debele limove, dobijanjem ravanske i prostorne temperaturne raspodele za određene parametre zavarivanja. Analitički model je dobijen programskim jezikom Python.

Abstract

This paper describes the formation of an analytical model of heat generation and transfer during friction stir welding. By solving differential equations of heat transfer, adapted for friction stir welding, the foundations for the formation of an analytical model were laid. In order to vary the technological parameters of welding that affect the generated heat, certain approximations were performed and the stress state of the material was observed at elevated temperatures. The aim was to simulate heat transfer for thin and thick plates, by obtaining a planar and spatial temperature image for certain welding parameters. The formation of the analytical model was performed in the Python programming language.

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



1. Uvod

Prilikom zavarivanja metala topljenjem i očvršćavanjem, bilo konvencionalnim ili nekonvencionalnim postupcima zavarivanja uvek je prisutno generisanje i prenos toplote. Zavisno od parametara zavarivanja i od karakteristika materijala koji se zavaruje, gradijent prostiranja toplote biće različit sa promenom nekog od parametara zavarivanja ili odabirom materijala sa drugačijim fizičko-hemijskim osobinama. Kako bi se izbeglo ili u što manjoj meri smanjilo eksperimentalno nalaženje optimalnih parametara zavarivanja, kao moćan inženjerski alat nametnulo se formiranje analitičkog ili numeričkog modela, u cilju simulacije postupka zavarivanja.

Dominantan problem prilikom zavarivanja legura aluminijuma koje očvršćavaju starenjem predstavlja pad mehaničkih osobina (tvrdoće i čvrstoće) u zoni uticaja toplote. Taj problem u većoj meri je prevaziđen patentiranjem nekonvencionalnog postupka zavarivanja trenjem sa mešanjem. Dalji razvoj ovog postupka baziran je na dizajniranju alata kojim se zavaruje i pravilnim odabirom parametara zavarivanja (poput brzine zavarivanja, učestanost obrtanja alata i sl.). Cilj ove studije je optimizacija parametara zavarivanja uz pomoć analitičkog modela prenosa toplote pre procesa zavarivanja. Na taj način bi se pravilnim odabirom parametara zavarivanja proces degradacije strukture aluminijumskih legura sveo na minimum, a sa njim postigli postavljeni zahtevi za kvalitetom zavarenih spojeva.

Prilikom zavarivanja postupkom FSW alat, kao pokretni izvor toplote, predstavlja frikcionni element (tzv. „drugo telo“) koji ima zadatak da indukuje proces generisanja toplote na kontaktu sa materijalom koji se zavaruje [1-4]. Površine alata koje učestvuju u procesu oslobađanja toplote jesu tzv. aktivne površine, i to su: čelo trna, bočna površina (bok) trna i čelo valjka alata. Ne postoje egzaktni podaci, ali poznato je da količina energije koja se unese u zavareni spoj direktno zavisi od: geometrijskih karakteristika alata, tehnoloških parametara samog procesa zavarivanja i mehaničkih karakteristika materijala alata i osnovnog metala/legure.

Za potrebe formiranja analitičkog modela procesa zavarivanja trenjem sa mešanjem iskorišćene su Roshental jednačine [5], dok se za izračunavanje generisane količine toplote korišćena modifikovana forma jednačina Sheppard i Wright [6]. Uz određene aproksimacije koje su opisane detaljno u nastavku rada cilj formiranja analitičkog

modela je bio dobijanje ravanske, prostorne i raspodele generisane toplote duž ose zavarivanja.

Generalno, postoji više različitih studija na temu prenosa toplote u toku zavarivanja trenjem sa mešanjem. Ali, za razliku od modela koji se formirani metodom konačnih elemenata (MKE) analitički modeli su se deklarirali kao praktičniji, efektivniji i efikasniji za primenu, jer za njihovo formiranje nisu neophodni specijalni softverski paketi i posebna obučenosť za rad u istim.

2. Eksperiment

Toplotni fluks kod FSW nastaje pre svega na račun trenja i deformacionog procesa materijala. Diferencijalna jednačina prenosa toplote kod postupka FSW opisana je jednačinom (1):

$$\rho \cdot c_p \cdot \dot{T} + Q_{int} = \nabla k \cdot \nabla T \quad (1)$$

gde $Q_{int} \left[\frac{W}{m^3} \right]$ predstavlja zapreminsku količinu toplote oslobođenu na račun plastične deformacije materijala, $\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ predstavlja gustinu materijala, $c_p \left[\frac{J}{kg K} \right]$ je specifični toplotni kapacitet, $k \left[\frac{W}{m K} \right]$ je koeficijent toplotne provodljivosti materijala, $T [K]$ je apsolutna temperatura, i $\nabla = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z}$ predstavlja gradijent porasta veličine u polju [7-9].

Međutim, mehanička opterećenja kojima alat deluje na radni komad skoncentrisana su na malu površinu oko vrha trna i čela alata, dok većina površine radnog komada ostaje rasterećena. Lokalizovano idealizovanje radne oblasti pri inicijalnom kontaktu površine alata sa radnim komadom i posmatranjem radnih predmeta kao krutih tela omogućava da toplota generisana na račun trenja i plastičnog deformisanja materijala može modelirati preko površinskog fluksa kao graničnog uslova između alata i radnog komada. Na taj način jednačina (1) može biti pojednostavljena i predstavljena jednačinom (2):

$$\rho \cdot c_p \cdot \dot{T} = \nabla k \cdot \nabla T \quad (2)$$

Granični uslovi definisani su jednačinom (3):

$$q = -k \cdot \nabla T \quad (3)$$

gde q predstavlja toplotni fluks na graničnoj površini.

Razmatrajući konstantne vrednosti za materijal, jednačina (2) može biti predstavljena jednačinom (4):



$$\frac{1}{\alpha} \dot{T} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (4)$$

gde $\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_p}$ predstavlja difuzioni koeficijent.

Da bi se postigli stalni i konzistentni stabilni uslovi za brzinsko polje stalnog izvora toplote, odnosno $\mathcal{V} = (\mathcal{V}_x, \mathcal{V}_y, \mathcal{V}_z) = (\mathcal{V}, 0, 0)$, sledi da se koordinate u odnosu na postavljeni sistem menjaju kao: $\xi = x - \mathcal{V} \cdot t$, $y' = y$, $z' = z$, $t' = t$.

Uvođenje pokretnog koordinatnog sistema u diferencijalnu jednačinu za prenošenje toplote (4) i uz postavljene stabilne uslove, pojednostavljeni oblik diferencijalne jednačine provođenja toplote može se predstaviti sledećom jednačinom (5):

$$-\frac{\mathcal{V}}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \xi} = \frac{\partial^2 T}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (5)$$

Za toplotno polje predstavljeno jednačinom (6):

$$T = T_0 + e^{-\frac{\mathcal{V}\xi}{2\alpha}} \varphi(\xi, y, z) \quad (6)$$

gde T_0 predstavlja početnu ili referentnu temperaturu (ambijentalna temperatura) i φ predstavlja jednoosno preslikanu funkciju pomoću koje se određuje ukupna toplotna provodljivost, i to zamenom u jednačinu (5) pa glavna jednačina postaje (7):

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} - \left[\left(\frac{\mathcal{V}}{2\alpha} \right)^2 \right] \varphi = 0 \quad (7)$$

Na predlog Vilaca [10], toplotni izvor može se posmatrati kao da je postavljen na sredini debljine ploče koja se zavaruje, sa položajem u centru grumena i pomera se konstantnom translatornom brzinom (\mathcal{V}). Prema tome, pretpostavka je da su izvori toplote kod debelih limova tačkasti, odnosno centrirani na sredini debljine ploče. Dok su kod tankih limova toplotni izvori linijski, pozicionirani preko cele debljine lima.

Dakle, uzimajući u obzir pokretni tačkasti izvor duž x-ose (ose zavarivanja) na beskonačnoj ploči bez gubitka usled konvekcije toplote, rešenje jednačine (7) se može predstaviti jednačnom (8) u obliku:

$$T - T_0 = \frac{Q}{2\pi k} e^{-\frac{\mathcal{V}\xi}{2\alpha}} \frac{e^{-\frac{\mathcal{V}r}{2\alpha}}}{r} \quad (8)$$

gde je, Q ukupna količina toplote generisana usled trenja i plastične deformacije materijala.

Dok za tanke ploče prenos toplote je prema jednačini (9), najbolji rezultati mogu se dobiti korišćenjem linijskog izvora toplote umesto tačkastog izvora toplote:

$$T - T_0 = \frac{Q}{2\pi k H} e^{-\frac{\mathcal{V}\xi}{2\alpha}} K_0 \left(\frac{\mathcal{V}\xi}{2\alpha} \sqrt{\xi^2 + y^2} \right) \quad (9)$$

gde K_0 predstavlja modifikovanu Bessel-ova funkciju druge vrste i nultog reda.

Na osnovu jednačina za prenos toplote kroz čvrsto telo pri postupku FSW, za beskonačne (debele) (8) i tanke limove (9), potrebno je definisati ulazne vrednosti i na taj način modelirati proces uz određena pojednostavljenja. Cilj formiranja analitičkog modela je da se optimizacijom geometrijskih karakteristika alata, parametara postupka i svojstava materijala koji se zavaruje, dobiju rezultati o količini generisane toplote. U načelu, cilj je dobijanja optimalnih vrednosti parametara procesa zavarivanja koje daju kvalitetan zavareni spoj.

Veličina koja ima krucijalan značaj na to koja će se temperatura razviti u toku procesa je: $Q = \eta \cdot Q_u$ iskorišćena količina toplote, gde su, η - koeficijent iskorišćenja toplote, Q_u - ukupno oslobođena količina toplote.

Ukupno oslobođenu količinu toplote moguće je izračunati pomoću analitičkih obrazaca (10-14) [8]. Veličine koje figurišu u njima su geometrijske karakteristike alata, parametri postupka zavarivanja i mehaničke karakteristike materijala koji se zavaruje. Od geometrijskih karakteristika alata mogu se izdvojiti: poluprečnik čela (R_{sh}) i trna alata (R_p), dužina trna alata (H_p).

Analitički obrasci za izračunavanje oslobođene količine toplote:

- ukupna količina toplote koja se generiše na vrhu pina alata:

$$Q_{pt} = \int_0^{2\pi} \int_0^{R_p} \omega \cdot r^2 \cdot \tau_{cont} \cdot dQ \cdot dr \quad (10)$$

$$= \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \omega \cdot \tau_{cont} \cdot R_p^3$$

- ukupna količina toplote generisana bočnom površinom trna:

$$Q_{ps} = \int_0^{2\pi} \int_0^{H_p} \omega \cdot r^2 \cdot \tau_{cont} \cdot dQ \cdot dz \quad (11)$$

$$= 2 \cdot \pi \cdot \omega \cdot \tau_{cont} \cdot R_p^2 \cdot H_p$$



- ukupna količina toplote generisana na čelu alata, ukoliko na čelu postoji konusna površina, ugla konusa α :

$$Q_{st} = \int_0^{2\pi} \int_{R_p}^{R_{sh}} \omega \cdot r^2 \cdot \tau_{cont} \cdot (1 + \tan \alpha) \cdot dQ \cdot dr \quad (12)$$

$$= \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \omega \cdot \tau_{cont} \cdot (R_{sh}^3 - R_p^3) \cdot (1 + \tan \alpha)$$

Pa je ukupna količina toplote jednaka zbiru gore navedenih, data je izrazom (13):

$$Q_{total} = Q_{pt} + Q_{ps} + Q_{st}$$

$$= \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \omega \cdot \tau_{cont} \cdot [(R_{sh}^3 - R_p^3) \cdot (1 + \tan \alpha) + R_p^3 + 3 \cdot R_p^2 \cdot H_p] \quad (13)$$

Za slučaj korišćenja alata sa ravnim ramenima, izraz (13) postaje:

$$Q_{total} = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \omega \cdot \tau_{cont} \cdot (R_{sh}^3 + 3 \cdot R_p^2 \cdot H_p) \quad (14)$$

Parametari procesa značajno utiču na količinu generisane toplote. Njih čine brzine translatorskog i rotacionog kretanja alata. Translatorska brzina zavarivanja predstavlja pomeraj alata u toku procesa zavarivanja duž linije stapanja. Rotaciona brzina definisana je vezom između učestanosti obrtanja alata i vremena ($\omega = \frac{2\pi n}{60}$). Smicajni napon koji figurira u obrascu generisane toplote izračunat je korišćenjem jednačina Sheppard i Wright [6] za određivanje normalnog naposnog stanja u materijalu na povišenim temperaturama, a iskorišćena je veza ($\tau_e = \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}}$) za prevođenje normalnog napona u smicajni.

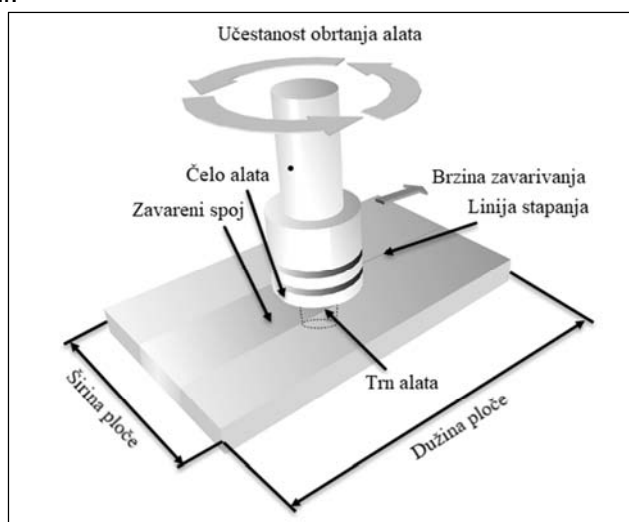
3. Rezultati i diskusija

Na osnovu jednačina (10)-(14) količina generisane toplote zavisi od: geometrijske karakteristike alata, vrsta materijala koji se zavaruje (mehaničke osobine materijala) i parametri procesa zavarivanja.

Od mehaničkih osobina materijala veoma značajnu ulogu ima smicajni napon koji se javlja u omešnom materijalu pri zavarivanju, za potrebe formiranja modela značajne su samo vrednost smicajnog napona od 4 do 10 [MPa]. Da bi se formirao matematički model postavljena je pretpostavka da se materijal pri zavarivanju nalazi na temperaturi 90% od temperature topljenja metala/legure.

Ostale veličine koje su od krucijalnog značaja na količinu generisane toplote su vezane za parametre procesa: učestanost obrtanja alata (rotaciona brzina alata) i translatorska brzina alata, geometrijske karakteristike alata i materijala koji se zavaruje: poluprečnici alata (čela i pina), dužina pina alata, debljina lima koji se zavaruje.

Odlučeno je da se gore pomenute veličine koje utiču na količinu generisane toplote za potrebe formiranja analitičkog modela menjaju na sledeći način: poluprečnik čela alata (R_{sh}) u intervalu od 8-16 mm, učestanost obrtanja alata (n) od 600-1200 o/min, debljina lima (H) koji se zavaruje od 4-10 mm. Za brzinu zavarivanja (translatorsku brzinu alata) je odlučeno da se varira u opsegu od 50-200 mm/min. Usvojeno je da dimenzija ploče na kojoj se modelira prenošenje generisane toplote bude 400x400 mm. Ilustracija parametra koji su varirani u modelu prikazani su na Slici 1 [11].



Slika 1. Parametri koji su od značaja za formirani model.

Figure 1. Parameters those are important for the model formed.



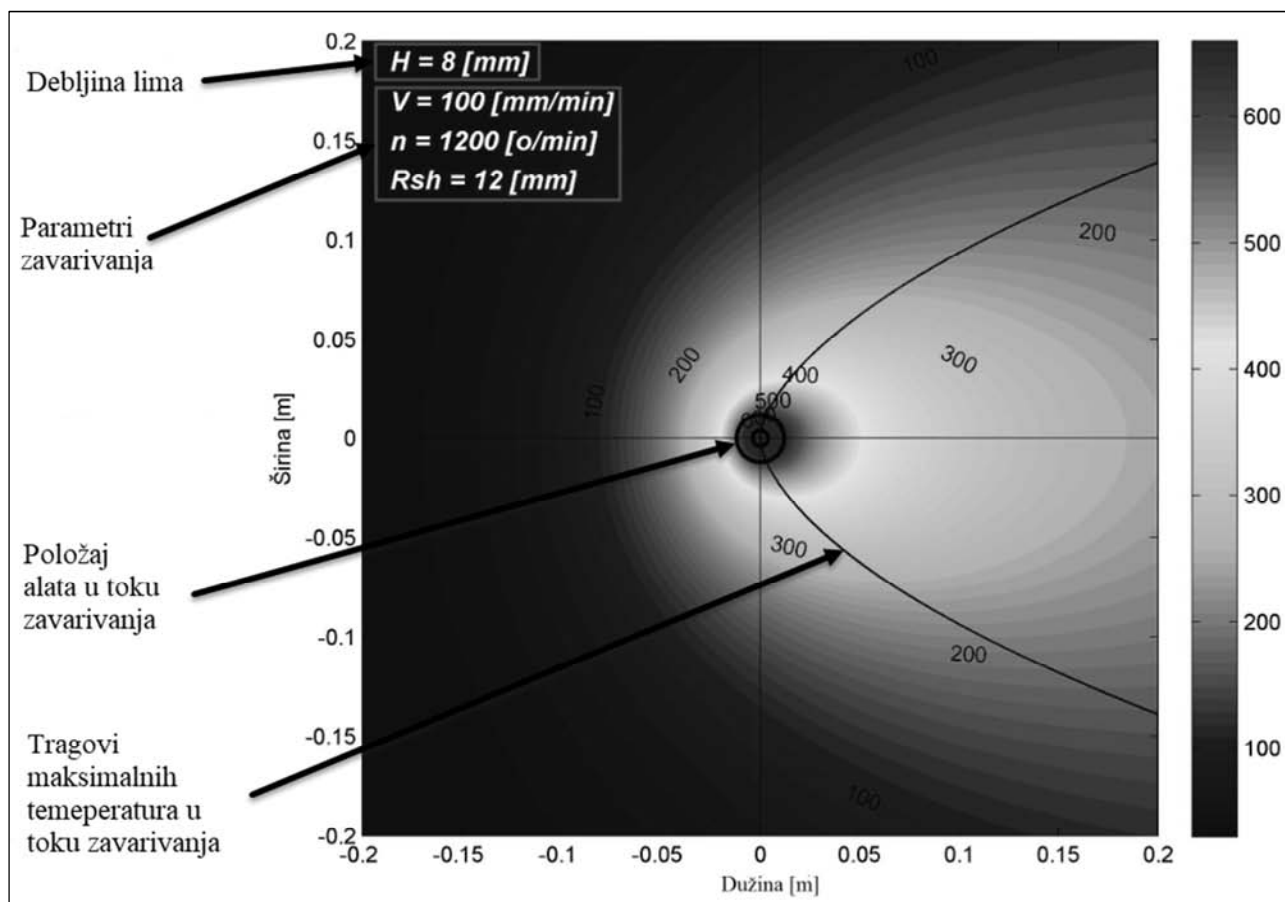
Neki od parametara morali su biti fiksirani kako bi se pojednostavilo modeliranje. Odnosi se na geometriju alata, tačnije poluprečnik pina (trna) alata i njegova dužinu. Za dužinu pina je usvojeno da bude u funkciji od debljine lima tj. da je dužina trna 95% od debljine lima dok je za poluprečnik trna usvojeno da bude takođe u funkciji od debljine lima tj. da je njegova vrednost 50% od debljine lima.

Na osnovu rezultata dobijenih za formirane analitičke modele generisanja i prenosa količine toplote prilikom FSW, neophodno je doneti zaključke o tome koji je optimum unete količine toplote potreban da bi se formirao zavareni spoj. Time je stvorena mogućnost da se već na osnovu geometrijskih karakteristika FSW alata pri zavarivanju određenih metala/legura moguće doneti zaključak pre samog zavarivanja da li će biti ostvaren kvalitetan zavareni spoj ili ne.

Formirani analitički model daje:

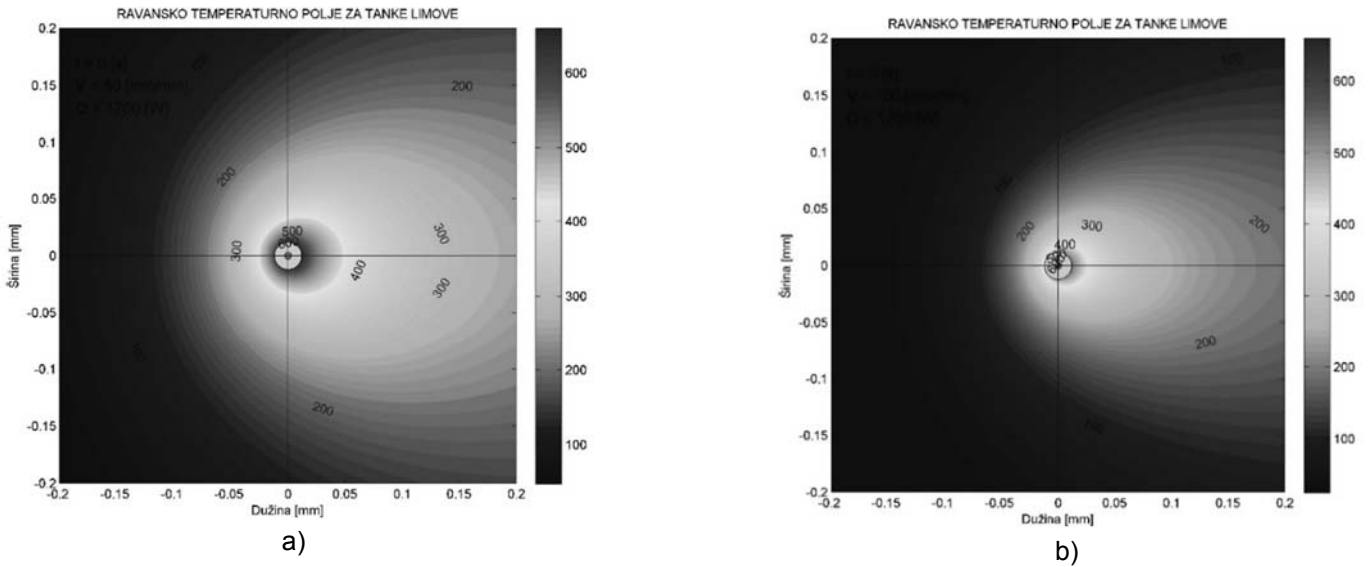
- 1) Ravansku temperaturnu sliku,
- 2) Prostornu temperaturnu sliku i
- 3) Dijagram promene temperature duž ose zavarivanja za pomake duž kordinate upravne na pravac translatorne brzine alata (brzine zavarivanja).

Dati modeli su formirani za samo jedan promenljiv parametar, i to: učestanost obrtanja alata, brzinu zavarivanja, prečnik čela alata i debljinu lima. Na Slici 2 prikazan je ravanski dijagram prenosa toplote za tanke i debele limove, tj. pojašnjeno je koji su parametri procesa od značaja fiksirani za dati model i kako utiču na količinu generisanja toplote i njeno prostiranje. Dok je na Slici 3 prikazano ravansko temperaturno polje za tanke limove u konkretnom slučaju kada je količina generisane toplote na početku procesa zavarivanja ista, a jedini varirani parametar je brzina zavarivanja. U oba slučaja dat je grafički prikaz temperaturnog polja, položaj alata kojim se zavaruje i prikaz izoterma u neposrednoj okolini alata kojim se zavaruje.



Slika 2. Pojašnjenje ravanskog dijagrama prenosa toplote.

Figure 2. Explanation of the planar diagram of the heat transfer.

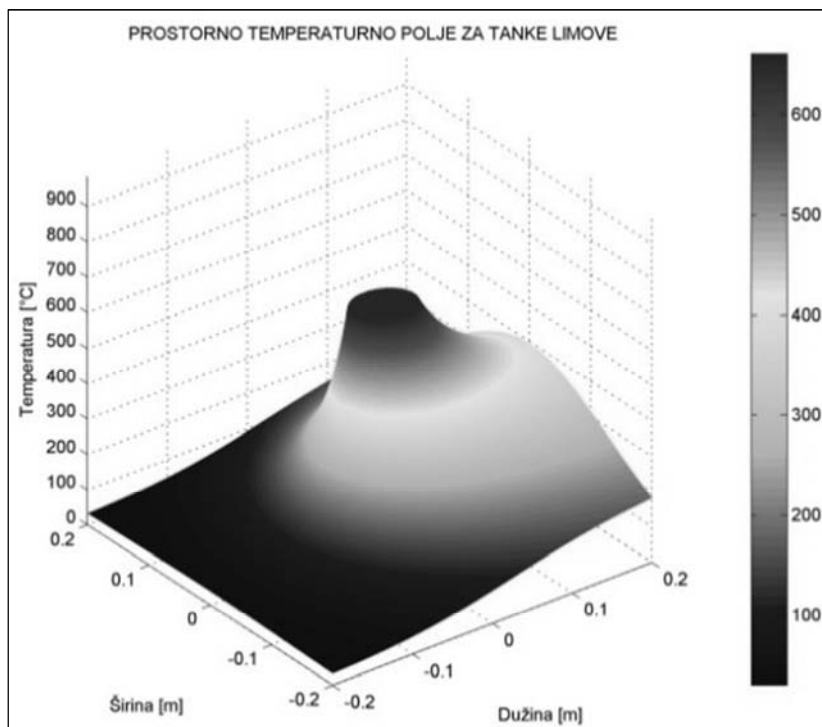


Slika 3. Ravanski dijagrami prenosa toplote za unos toplote od 1700 W pri brzinama zavarivanja a) 50 mm/min i b) 100 mm/min.

Figure 3. Plane heat transfer diagrams for heat input of 1700 W at welding speeds a) 50 mm/min and b) 100 mm/min.

Pored ravanskog temperaturnog polja modelirano je i prostorno temperaturno polje za tanke i debele limove. Ravanskom temperaturnom polju pridodata je treća osa (temperatura) i na taj način formirana prostorna slika generisane količine toplote. Varirani su isti parametri procesa kao i za ravansko temperaturno polje. Na Slici 4 prikazano je

prostorno temperaturno polje za tanke limove, za sledeće parametre: poluprečnik čela alata ($R_{sh}=14$ mm), učestanost obrtanja alata ($n=1000$ o/min), debljina lima ($N=6$ mm) i brzina zavarivanja ($V=100$ mm/min). Prema oblicima prostornih dijagrama može se zaključiti da li je ostvarena količina toplote dovoljna da se izvede proces zavarivanja.



Slika 4. Prostorno temperaturno polje generisane količine toplote.
Figure 4. Spatial temperature field of the generated heat quantity.



Da bi se upotpunila slika o ravanskom prostiranju toplote kroz tanku ploču urađeni su i dijagrami temperatura-x-osa (pravac zavarivanja), koji daju vrednosti temperatura oko izvora toplote duž njegovog pravca kretanja i pravca upravnog na pravac kretanja. Za dijagrame koji daju zavisnost temperatura-x-osa (pravac zavarivanja) a upravni su na pravac kretanja alata urađeni su za određene pomake duž y-ose (0, R_{sh} , $1.5 \cdot R_{sh}$, $2 \cdot R_{sh}$, $2.5 \cdot R_{sh}$, $3.5 \cdot R_{sh}$, $4.5 \cdot R_{sh}$), gde su pomeraji duž y-ose:

-0- položaj koji odgovara osi alata

- R_{sh} -položaj na izvodnici čela alata

- $1.5 \cdot R_{sh}$ - položaj udaljen za poluprečnik i po čela alata od ose alata

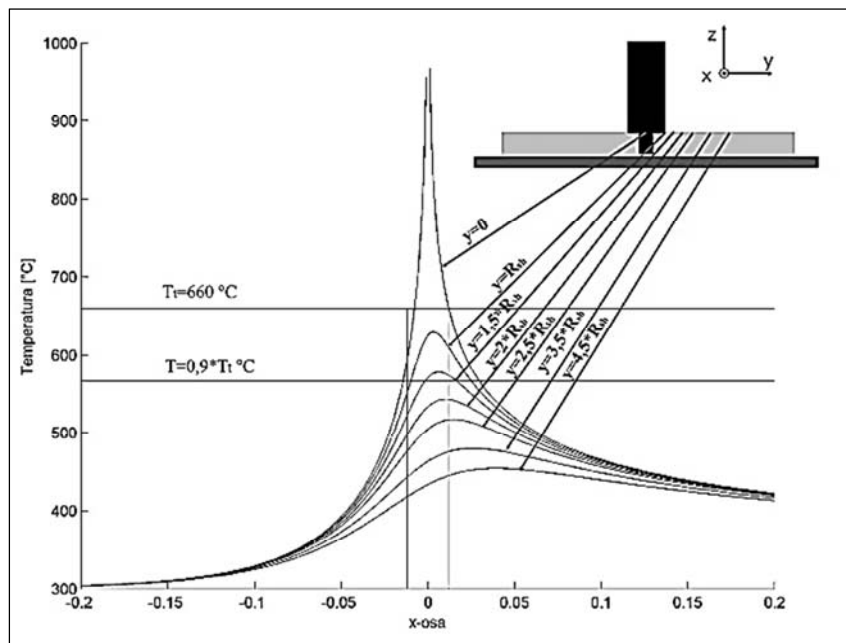
- $2 \cdot R_{sh}$ - položaj udaljen za prečnik čela alata od ose alata

- $2.5 \cdot R_{sh}$ - položaj udaljen za dva i po poluprečnika čela alata od ose alata

- $3.5 \cdot R_{sh}$ - položaj udaljen za tri i po poluprečnika čela alata od ose alata

- $4.5 \cdot R_{sh}$ - položaj udaljen za četiri i po poluprečnika čela alata od ose alata.

Na Slici 5 prikazan je dijagram temperatura-x-osa (pravac zavarivanja) uz odgovarajuća pojašnjenja. Dijagram temperaturnog polja ispred i iza izvora toplote, i sve to za odgovarajuće pomake duž ose upravne na pravac kretanja izvora toplote. Parametrima procesa zavarivanja: poluprečnik čela alata ($R_{sh}=9$ mm), učestanost obrtanja alata ($n=1000$ o/min), debljina lima ($N=6$ mm) i brzina zavarivanja ($V=100$ mm/min).



Slika 5. Promena temperature duž ose zavarivanja i ose normalne u odnosu na pravac zavarivanja.

Figure 5. Temperature change longitudinally the welding axis and the normal axis in relation to the welding direction.

4. Zaključak

U ovom radu, za potrebe formiranja analitičkog modela korišćena su rešenja diferencijalnih jednačina za provođenje toplote u čvrstom telu, generisanje toplote za tačkasti i linijski izvor u stacionarnom stanju. Generisana toplota opisana je kao površinski fluks, koji zavisi od varijacije smicajnog napona tečenja sa promenom temperature. Granice analitičkog modela su kao kod bilo kog analitičkog modela zavarivanja: termička svojstva materijala su nepromenljiva sa promenom temperature, toplotni gubitak zračenjem i konvekcijski kao i granični efekti ne uzimaju se u obzir.

4. Conclusion

In this work, for the purposes of forming an analytical model, solutions of differential equations for heat conduction in a solid body, heat generation for a spot and line source in a stationary state were used. The heat generated is described as a surface flux, which depends on the variation of the of yield shear stress with temperature change. The boundaries of the analytical model are as with any analytical welding model: the thermal properties of the material are unchangeable with temperature change, heat loss by radiation and convection as well as boundary effects are not taken into account.



Takođe, uticaj podloge na kojoj se zavaruje se ne može uzeti u obzir u jednostavnoj analitičkoj formulaciji problema, pa shodno tome nije uzet u obzir pri formiranju modela. Modelu su potrebni tačni podaci o naponu smicanja u blizini tačka topljenja materijala kako bi generisao termalnu sliku samo u stacionarnom stanju.

Formirani model može se korisno koristiti za parametarske studije FSW procesa i optimizaciju parametara zavarivanja sa minimalnim informacijama u vezi sa podešavanjem parametara zavarivanja. Tumačenjem generisanih ravanskih i prostornih temperaturnih dijagrama može se proceniti kakve će strukturne promene posedovati zavareni spoj. Pored toga što ravanski model sadrži izoterme, isti poseduje i liniju koja oslikava trag maksimalnih temperatura u polju, što je od velikog značaja za tumačenje pomenutog.

Cilj formiranja ovog i sličnih modela je ušteda vremena koje bi bilo potrebno za eksperimentalno variranja parametara postupka, što doprinosi produktivnosti, ekonomizaciji i podizanju kvaliteta zavarenih spojeva izvedenih postupkom FSW.

Literatura / References

[1] W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham, M. G. Murch, P. Templesmith, C. J. Dawes, (1995): Friction Stir Butt Welding, Int. Patent App. PCT/GB92/02203 and GB Patent App. 9125978.8, Dec. 1991. U.S. Patent No. 5,460,317.

[2] K.E. Knipstrb'm (1995): New welding method for aluminium, ESAB Svetsaren, 3, 5-6.

[3] N. N. (1995): Friction welding of aluminium, ESAB Svetsaren 1, 30-31.

[4] C. Dawes, W. Thomson (1995): Friction stir joining of aluminium alloys, TWI Bulltin 6, 124-127.

[5] A. C. Nunes (1983): 'An Extended Rosenthal Weld Model', NASA Marshall Space Flight Center (MSFC), 165-170.

[6] T. Sheppard and D. S. Wright (1979): 'Determination of flow stress: Part 1 constitutive equation for aluminum alloys at elevated temperatures', Met. Technol., 6, 215-223.

Also, the influence of the understructure on which the welding is done cannot be taken into account in a simple analytical formulation of the problem, and accordingly, it was not taken into account during the development of the model. The model needs accurate shear stress data near the melting point of the material in order to generate a steady state thermal image only.

The presented model can be usefully used for parametric studies of the FSW process and optimization of welding parameters with minimal information related to the setting of welding parameters. By interpreting the generated planar and spatial temperature diagrams, it is possible to estimate what kind of structural changes the welded joint will have. In addition to the fact that the plane model contains isotherms, it also has a line which representing the trace of the maximum temperatures in the field, which is of great importance for the interpretation of the aforementioned.

The goal of creating this and similar models is to save the time that would be needed for experimentally varying the parameters of the procedure, which contributes to productivity, economy and raising the quality of welded joints made by the FSW procedure.

[7] T. Jackson (1997): „Constitutive equations for use in prediction of flow stress during extrusion of aluminium alloys Sheppard”, A Materials Science and Technology; 13, 3; ProQuest Central 203

[8] P. Ferro: „ The Use of Matlab in Advanced Design of Bonded and Welded Joints”, University of Padova Italy.

[9] H. Schmidt: Hattel J. , Wert J. (2003) „ An analytical model for the heat generation in friction stir welding”, September. Denmark.

[10] Vilaca, P., Quintino, L., dos Santos, J.F., Zettler, R., Sheikhi, S. (2007). Quality assessment of friction stir welding joints via an analytical thermal model, iSTIR'. Materials Science and Engineering A, 445-446, 501-508.

[11] <https://www.essaii.com/friction-stir-welding-fsw-pros-cons/>, (Anonimno, 2022)



Aleksija Đurić ^{1,a}, Dragan Milčić ², Damjan Klobčar ³, Biljana Marković ¹, Miodrag Milčić ²

TEHNOLOGIJE SPAJANJA LIMOVA OD ČELIKA I LEGURA ALUMINIJA – PREGLED STANJA

JOINING TECHNOLOGY OF STEEL AND ALLUMINUM ALLOY SHEETS – STATE OF THE ART

Pregledni rad / Review

Rad primljen / Paper received:

Avgust 2022.

Rad prihvaćen / Paper accepted:

Maj 2023.

Ključne reči: tehnologije spajanja, raznorodni materijali, čelik i legure aluminijuma

Rezime

Multi-materijal dizajn je razvijen kao savremeni koncept dizajna za lake konstrukcije (Lightweight design -LW) koji ima za cilj integrisanje različitih vrsta materijala u jednu strukturu. Osnovni problem pri spajanju limova od raznorodnih materijala, prvenstveno čelika i legura aluminijuma, su različita mehanička, fizička i hemijska svojstva materijala koji se spajaju. Kroz ovaj rad biće analizirano stanje tehnike kada su u pitanju savremene tehnologije spajanja limova od čelika i legura aluminijuma. Pod pojmom savremene tehnike spajanja misli se na sve inovativne tehnologije spajanje koje su razvijene ili su značajniju primjenu doživjele u posljednjih nekoliko godina.

Adresa autora / Author's address:

¹ Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Mašinski fakultet, Vuka Karadžića 30, 71123 Istočno Sarajevo, RS, Bosna i Hercegovina

² Mašinski fakultet, Univerzitet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija

³ Mašunski fakultet u Ljubljani, Univerzitet u Ljubljani, Aškerčeva cesta 6, 1000 Ljubljana, Slovenija

email: ^a aleksija.djuric@ues.rs.ba

Keywords: joining technologies, dissimilar materials, steel and aluminum alloys

Abstract

Multi-material design was developed as a modern design concept for lightweight structures (Lightweight design - LW) which aims to integrate different types of materials into one structure. The main problem when joining sheets made of different, i.e. dissimilar materials, primarily steel and aluminum alloys, are the different mechanical, physical and chemical properties of the materials being joined. Through this paper, the state of the art will be analyzed when it comes to modern technologies for joining steel and aluminum alloys sheets. The term "modern joining technique" refers to all innovative joining technologies that have been developed or have seen significant application in the last few years.

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



1. Uvod

Dizajn za lake konstrukcije (*eng. Lightweight desing* - LW) nastaje kao rezultat potrebe za održivim dizajnom i razvojem proizvoda, te radi potrebe za pogodnim izborom materijala. Pravilnim izborom materijala može se smanjiti masa kako pojedinih elemenata, tako i ukupne konstrukcije, što direktno utiče na smanjenje energije i resursa, te očuvanje životne sredine [1-3]. Dizajn za lake konstrukcije pronalazi svoju primjenu u raznim oblastima, mada je njegova primjena najzastupljenija u automobilskoj i avionskoj industriji. Kada je riječ o primjeni LW dizajna u automobilskoj industriji onda se kao glavni motiv navodi ispunjenje zahtjeva kupaca u pogledu lakšeg rukovanja, smanjivanje potrošnje goriva i povećavanja pokretačke snage. Opšti cilj ovog pristupa jeste smanjenje ukupne težine vozila, kroz smanjivanje mase pojedinih komponenti.

Multimaterijal dizajn je razvijen kao savremeni koncept dizajna za lake konstrukcije (LW dizajn) koji ima za cilj integrisanje različitih vrsta materijala u jednu strukturu [4]. Na primjer, težina karoserije automobila može biti smanjena upotrebom različitih vrsta materijala. Različiti tipovi lakih karoserija razvijeni su primjenom čelika, aluminijuma i kompozitnih materijala. Istraživanja pokazuju da se masa automobila može smanjiti i za 50% ukoliko se legure aluminijuma primjenjuju u karoseriji automobila [5]. S druge strane, jedan od najvećih nedostataka značajnije primjene aluminijuma je visoka cijena. Kada je riječ o primjeni čelika, onda treba napomenuti da se tu prvenstveno misli na čelik 2. i 3. generacije kao što su ugljenični čelici za obradu u toplom stanju, austenitni ugljenik-mangan čelik, AHSS (*eng. Advanced High-Strength Steel*) čelici, itd. Zamjena konvencionalnih ugljeničkih čelika AHSS čelicima rezultovala je smanjenjem mase automobila za 15–20% [6]. Preduslov za postizanje multimaterijal strukture je primjena efikasnih i jeftinih tehnologija spajanja raznorodnih materijala. Osnovni problem pri spajanju limova od raznorodnih materijala su različita mehanička, fizička i hemijska svojstva materijala koji se spajaju, pa vrlo često konvencionalne tehnologije zavarivanja nisu pogodne za spajanje.

Kroz ovaj rad biće najprije analizirano stanje tehnike kada su u pitanju savremene tehnologije spajanja limova od čelika i legura aluminijuma. Pod pojmom savremene tehnike spajanja misli se na sve inovativne tehnologije spajanje koje su razvijene ili su značajniju primjenu doživjele u posljednjih nekoliko godina. Same tehnologije

spajanja limova raznorodnih materijala u suštini se mogu podijeliti u četiri osnovne grupe: zavarivanje, mehaničko spajanje, lijepljenje i hibridne tehnologije (kombinacija više postupaka spajanja).

2. Tehnologije spajanja zavarivanjem

Zavarivanje je proces spajanje dva ili više istih ili različitih materijala u jednu nerazdvojivu strukturu. Kada se govori o spajanju materijali manje debljine, tj. spajanju limova, onda su najzastupljeniji postupci: Elektrootporno tačkasto zavarivanje (*eng. Resistance spot welding* – RSW), Elektrootporno tačkasto zavarivanje elementima (*eng. Resistance element welding* – REW), Zavarivanje trenjem sa miješanjem (*eng. Friction stir welding* - FSW), Zavarivanje trenjem sa mješanjem pomoću dodatnih elemenata (*eng. Friction element welding* - FEW), zavarivanje laserom, zavarivanje vibracijama, infracrveno (IR) zavarivanje i elektromagnetno zavarivanje [4, 7-9].

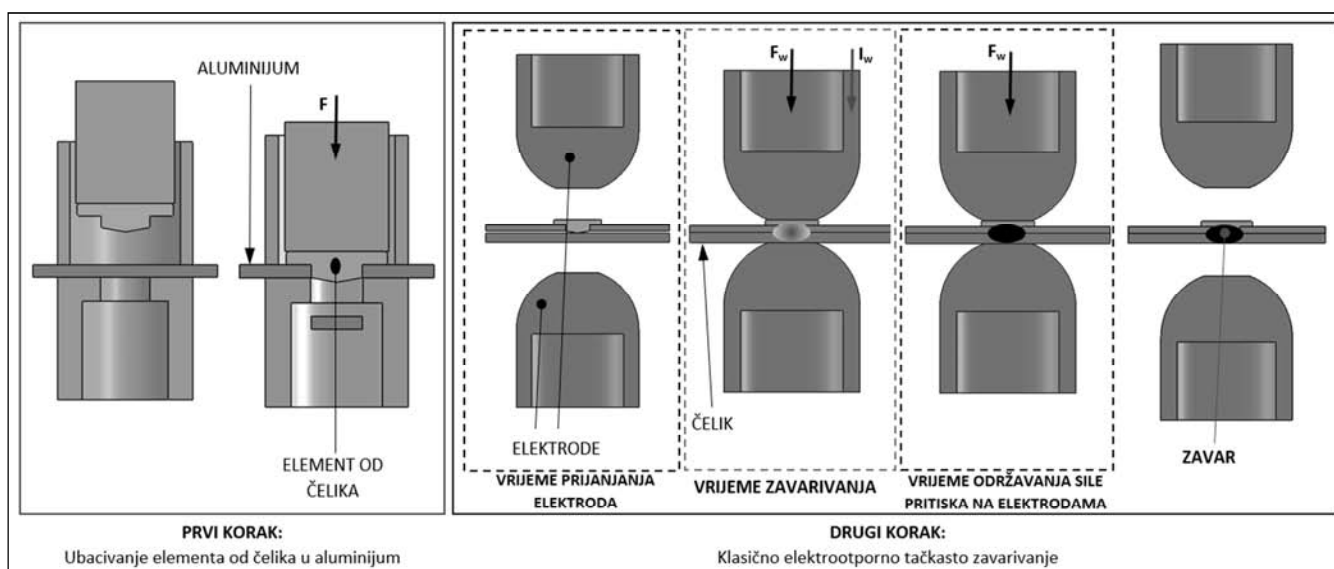
Elektrootporno tačkasto zavarivanje (RSW) je najčešće korištena metoda spajanja limova u automobilskoj industriji, tako jedan automobil ima preko 5000 RSW spojeva [10], a svaka fabrika automobila ima više od 200 izbora struje za zavarivanje navedenim postupkom [11]. Trenutni trend razvoja RSW tehnologija ide u pravcu analize spojeva različitih, tj. raznorodnih materijala, posebno aluminijuma i čelika [12-15]. Zbog materijalne razlike, zavarivanje legure aluminijuma i čelika nailazi na mnoge probleme, najprije zbog razlika u termičkim i fizičkim svojstvima, te zbog pojave lomljivog Fe-Al intermetalnog jedinjenja (*eng. Intermetal compound* - IMC). Postojanje IMC-a značajno utiče na nosivost i kvalitet samog spoja [16-19]. Pouranvari [20] je u svojoj studiji objavljenoj 2017. godine kao jedan od budućih pravaca istraživanja vezanih za spajanje RSW tehnologijom naveo analize vezane za redukciju IMC sloja kao i razvoj alternativnih postupaka zavarivanja/spajanja čelika i aluminijuma.

Jedna od alternativnih tehnologija spajanja elektrootpornom tačkastom zavarivanju je elektrootporno zavarivanje elementima (REW), prvenstveno razvijena za spajanje različitih kombinacija čelika i lakih legura koje su metalurški nespojive i teško se mogu zavarivati zajedno [21, 22]. Elektrootporno tačkasto zavarivanje elementima je postupak koji počinje umetanjem (presovanjem) umetka (elementa) od čelika u aluminijum ili neki drugi laki materijal. Nakon što se element upresuje u laki materijal, slijedi postupak klasičnog elektrootpornog tačkastog zavarivanja.



Šema postupka data je na slici 1. Dodatni element kod REW postupka se naziva zakovica, pa se ovaj postupak još može nazvati elektrootporno tačkasto zavarivanje sa zakovicama odnosno RSR (*eng. Resistance Spot Riveting*) [23]. Osnovna prednost REW postupka je što u poređenju sa RSW postupkom se razlikuje samo za fazu ubacivanja elementa od čelika u aluminijum, što se može jednostavno automatizovati, tako da ovaj način

spajanja ne zahtijeva velika dodatna ulaganja u postojeće fabrike za sklapanje automobila. S druge strane istraživanja koja su do sada obavljena pokazuju da REW spoj aluminijuma i čelika ima bolja integralna mehanička svojstva nego spoj ova dva materijala dobijen RSW tehnologijom spajanja [13, 22-25]. Takođe, životni vijek elektroda značajno je duži kod REW nego kod RSW tehnologije spajanja [25].



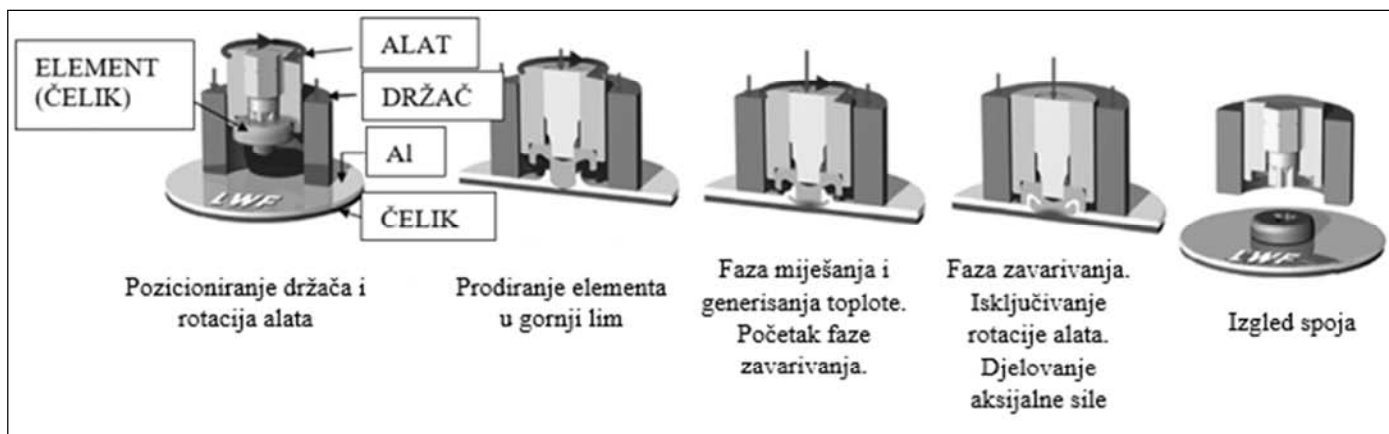
Slika 1. Šema elektrootpornog tačkastog zavarivanja elementima [25]

Figure 1. Scheme of electric resistance element welding [25]

Istraživanja na polju spajanja čelika i legura aluminijuma dominantna su i u pogledu primjene zavarivanja trenjem sa miješanjem (FSW) [26, 27], tačkastog zavarivanja trenjem sa miješanjem (FSSW) [28] i zavarivanja trenjem sa miješanjem pomoću dodatnih elemenata (FEW) [29]. Zavarivanje trenjem sa miješanjem je postupak zavarivanja koji se izvodi pomoću specijalnog alata koji vrši zagrijavanje radnih komada i miješanje materijala dijelova koji se spajaju. Šavno zavarivanje trenjem sa miješanjem (FSW) može se podijeliti u četiri faze: (I) prodiranje trna alata u materijal, (II) miješanje i generisanje toplote – početak procesa zavarivanja, (III) translatorno kretanje alata – zavarivanje, (IV) izlaz alata iz materijala – kraj zavarivanja [30]. Suštinska razlika između šavnog i tačkastog zavarivanja trenjem sa miješanjem (FSSW) je u tome što kod tačkastog zavarivanja nema faze III, tj. alat ne vrši translatorno kretanje, nego se proces sastoji samo od faze prodiranja alata, faze miješanja i generisanja toplote, koja je ujedno i faza zavarivanja, te, na kraju, od faze izlaza alata iz materijala. Long Wan¹ i Yongxian Huang [31] u studiji koja se bavi analiziranjem stanja tehnike

vezanim za spajanje čelika i aluminijuma zavarivanjem trenjem sa miješanjem navode da se ova dva raznorodna materijala mogu spojiti navedenom tehnologijom, ali da postoje brojni izazovi koje treba prevazići prije masovnije upotrebe ovo tehnologije. Navode da se istraživanja u budućnosti trebaju fokusirati na izbor materijala i dizajn oblika alata kako bi se smanjila veličina intermetalne faze koja se pojavljuje pri spajanju čelika i aluminijuma. Takođe, analiza uticaja premaza na habanje alata, kao i mogućnost dodatnog odvođenja toplote pri zavarivanju, prema navodima autora, trebaju biti fokus budućih istraživanja.

Zavarivanje trenjem sa miješanjem pomoću dodatnog elementa (FEW) u suštini predstavlja FSSW postupak koji podrazumijeva da se na alat postavlja dodatni element, kao npr. zakovica, koji nakon procesa zavarivanja ostaje u spoju (slika 2). Ovo način spajanja sličan je REW postupku, a primjenjuje se kako bi se izbjeglo spajanje raznorodnih materijala jer suštinski posmatrano zavarivanje se vrši između dva čelika spajajući tako aluminijumski lim mehanički.



Slika 2. Šema zavarivanja trenjem sa miješanjem pomoću dodatnog elementa [7]

Figure 2. Scheme of friction element welding [7]

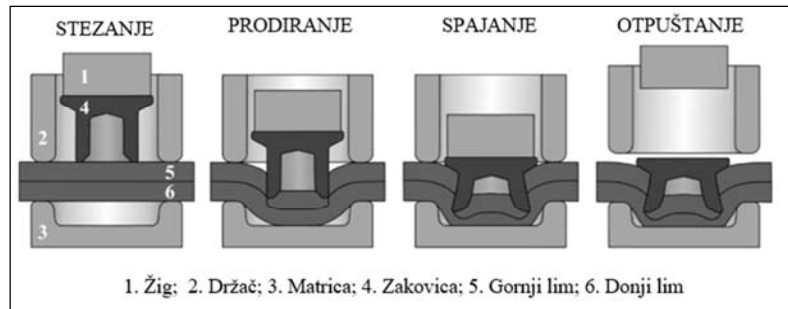
Lasersko zavarivanje je postupak spajanja materijala toplotom dobijenom energijom snopa svjetlosnih čestica. U odnosu na gustinu snage laserskog zavarivanja može se podijeliti na postupak uvarivanja laserom i lasersko zavarivanje topljenjem. Lasersko zavarivanje, zbog velike gustine snage i malog unosa toplote, ima brojne prednosti pri zavarivanju aluminijuma i čelika u odnosu na druge postupke zavarivanja. Međutim, problemi s nastankom defekata i reflektivnošću i dalje postoje u procesu. Kada se aluminijum topi, zbog različite tačke topljenja, čelik ostaje u čvrstom stanju. Brzina apsorpcije laserske energije se povećava značajno kada se tečnost formira na površini aluminijuma i rezultuje stvaranjem laserski indukovane plazme koja vodi do nestabilnosti postupka zavarivanja [32]. Ova metoda spajanja različitih materijala, koja se naziva još i daljinsko lasersko zavarivanje, koristi se za širok spektar automobilskih aplikacija kao što su zatvarači, stubovi i sjedala [33].

Ultrazvučno zavarivanje je postupak spajanja materijala u čvrstom stanju pomoću ultrazvučnih vibracija visokih frekvencija. Generator visoke frekvencije isporučuje električnu energiju koja se piezoelektričnim pretvaračem pretvara u mehaničke vibracije iste frekvencije. Poseban tip ovog postupka je ultrazvučno tačkasto zavarivanje. Kod ovog postupka vibracije prolaze kroz sonotrode i tako omogućavaju stvaranje spoja [33]. Dosadašnje studije o ultrazvučnom zavarivanju aluminijuma i

čelika uglavnom su fokusirane na analizu mehaničkih i metalografskih svojstava spoja tipičnih predstavnika aluminijumskih i čeličnih limova [34, 35].

3. Mehaničke tehnologije spajanja

Mehanička spajanje limova može se podijeliti na spajanje sa dodatnim komponentama i bez dodatnih komponenti [25]. Mehaničko spajanje pomoću dodatnih komponenti u suštini podrazumijeva upotrebu dodatnih spoljašnjih komponenata kao što su zavrtnji i zakovice. S druge strane, kada je riječ o savremenim mehaničkim tehnologijama spajanja pomoću dodatnih komponenti, onda dominantna istraživanja idu u pogledu spajanja materijala samoprobijajućim zakovicama (*eng. Self piercing riveting* - SPR) [36, 37] i samoproduirujućim zavrtnjem (*eng. Flow drilling screws* - FDS) [38, 39]. Samoprobijajuće zakivanje (SPR) ne zahtijeva pretpranje površine ili prethodno bušenje rupa, te tako omogućava kratko vrijeme spajanja i uštede troškova [40]. Šema SPR postupka data je na slici 3. Rezwanul Haque [41] samtra da nedostaje istraživanja u pogledu spajanja više od dva materijala SPR tehnologijom, te takođe preporučuje da buduća istraživanja trebaju još ići i u pravcu uticaja poznatih nezavisnih varijabli (geometrija i materijal matrice, žiga, zakovica i držača) na parametre kvaliteta spoja kao što su širenje zakovice, visinu glave, debljinu dna i efektivna dužina zakovice u donjem limu.

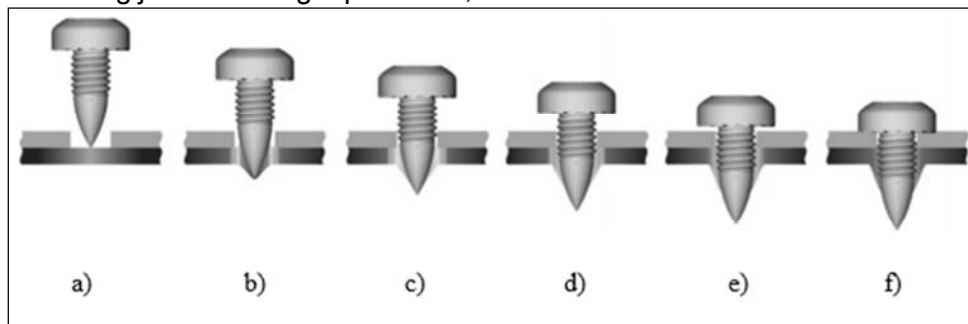


Slika 3. Šema SPR (samoprobijajuće zakivanje) postupka spajanja materijala [42]

Figure 3. Schematic presentation of the SPR (self-piercing riveting) procedure for joining materials [42]

FDS postupak je proces trenja koji koristi vijak kao pričvršćivač i alat. Šema FDS postupka data je na slici 4. Ova tehnologija ima mnoge prednosti,

poput jednostrane pristupačnosti, jednostavne odvojivosti i velike čvrstoće spoja [43].

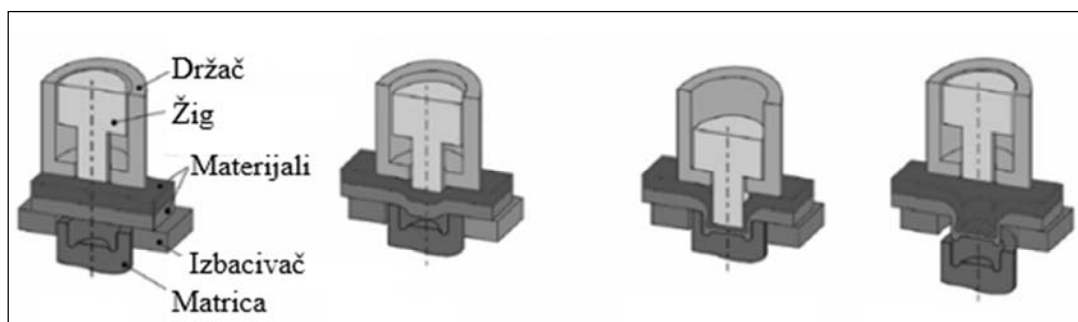


Slika 4. Šema FDS (samoproduirujući zavrtnj) postupka spajanja materijala: a) zagrijavanje; b) penetracija; c) istiskivanje; d) formiranje navoja; e) zavrtnje (potpuno formirana zavrtnajska veza); f) zatezanje [44]

Figure 4. Schematic of the FDS (flow drilling screws) material joining procedure: a) heating; b) penetration; c) extrusion; d) thread formation; e) screwing (fully formed screw connection); f) tensioning [44]

Mehanička tehnologija spajanja koja ne podrazumijeva upotrebu dodatnih spoljnih komponenti je zakivanje bez zakovica (*eng. mechanical chlicing* - MC). Ovaj način spajanja hladnim oblikovanjem izvodi se postupkom lokalnih deformacija uz pomoć oblikača (žiga) i matrice [25]. Prilikom spajanja oblikač (žig) pritiskuje spojene limove unutar šupljina kalupa, tj. matrice, formirajući tako oblik koji te limove spaja. Šema postupka data je na slici 5. Osnovni parametar ovog postupka spajanja je sila kojom žig djeluje na lim, te geometrija žiga i matrice. Ova tehnologija, zbog svoje jednostavnosti, pogodnija je za

automatizaciju u odnosu na druge mehaničke tehnologije spajanja [45]. Pored navedenog, ovog tehnologija ima brojne prednosti, kao što je ušteda energije, jednostavni alati, pogodnost za spajanje raznorodnih materijala, te to da nema potrebe za uklanjanjem zaostalih napona jer ne dolazi do unošenja toplote tokom spajanja [46-48]. Brojni autori istražili su MC spajanje čelika i legura aluminijuma koristeći, analizirajući statičnu nosivost [49-51], dinamičnu nosivost [52, 53], geometriju žiga i matrice [54], te načine odnosno modove otkaza [55].



Slika 5. Šema MC (zakivanje bez zakovica) postupka spajanja materijala [45]

Figure 5. Scheme of the MC (mechanical chlicing) material joining procedure [45]



4. Lijepljenje i hibridne tehnologije

Kada je riječ o spajanju raznorodnih materijala, onda se kao najreprezentativniji predstavnik hemijskog postupka spajanja nameće lijepljenje. Poznato je da se postupkom lijepljenja mogu spajati gotovo svi materijali. Ovakav postupak spajanja ima brojne prednosti, a jedna od njih je smanjenje korozije. S druge strane, kada je riječ o nedostacima lijepljenja, tu se prvenstveno misli na smanjena mehanička svojstva, pogotovo u pogledu čvrstoće i krutosti [56]. Pored navedenog, lijepkovi imaju i nedostatak u pogledu potrebne pripreme površina za spajanje, kao i dugog vremena potrebnog za očvršćavanje lijepka. Brock Watson i dr. [57] navode da je trenutni fokus istraživanja zalijepljenih spojeva na analizi mehaničkih svojstava dobijenih ispitivanjem na zatezanje - smicanje. Takođe, autori navode da buduća istraživanja idu u pravcu analize uticaja pripreme površina lijepljenja na tip loma, tj. mod otkaza spoja.

Ljepkovi se često koriste u kombinaciji sa nekim od postupaka spajanja kao što je zakivanje, elektrootporno tačkasto zavarivanje ili elektrootporno tačkasto zavarivanje elementima [58-60]. Ovakav način spajanja naziva se hibridno spajanje. Prednosti kombinovanja lijepkova i tehnologija zavarivanja ili mehaničkih tehnologija spajanja su [61]:

- generalno poboljšanje mehaničkih svojstava (statičkih i dinamičkih);
- povećanje krutosti spoja;
- izrada neprekidnog i nepropusnog spoja;
- nije potrebno fiksiranje spoja tokom procesa očvršćavanja lijepka.

5. Poređenje tehnologija spajanja

G. Meschut i drugi [62] poredili su REW i FEW (zavarivanje trenjem sa miješanjem sa elementom) tehnologije spajanja, te zaključili da bolju zateznu čvrstoću ima FEW spoj u odnosu na REW spoj, kada je riječ o spajanju čelika HDT1200M ZE50/50 (1.5 mm) i legure aluminijuma EN-AW5182 (2.0 mm). Takođe, G. Meschut i drugi [63] su u svojoj studiji prikazali dijagram sila – izduženja za različite spojeve legure aluminijuma AW-6016 (1,5 mm) i čelika 22MnB5 (2 mm), sa kojeg se jasno uočava da je najveću vrijednost sile kidanja pri ispitivanju na zatezanje imao spoj dobijen FEW tehnologijom spajanja, dok je SPR imao najmanju vrijednost sile. Kod REW spoj vrijednosti sile je nešto manji, dok je vrijednost izduženja veća od

RSW spoja dva lima od aluminijuma. S druge strane Junya Naito i Reiichi Suzuki [64] su u svojoj studiji dali dijagram poređenja maksimalne sile dobijene pri ispitivanju na zatezanje za tehnologije spajanja čelika DP 980 i legure aluminijuma A6022. Sa dijagrama se može vidjeti da, u ovom slučaju, spoj dobijen REW tehnologijom ima bolju zateznu čvrstoću u odnosu na FEW spajanje i zakivanje zakovicama. H. Jiang i drugi [65] poredili su mehanička svojstva tri spoja: SPR, lijepljenje i hibridni spoj (SPR i lijepljenje) od čelika DC52D i legure aluminijuma 5052, te su zaključili da je hibridni spoj superioran u odnosu na pojedinačne spojeve.

R. Suzuki i drugi [66] u svojoj studiji poredi tehnologije spajanja raznorodnih materijala prema 6 kriterijuma, a svakom od istih dodjeljuje vrijednosti: odlično primjenljivo/moguće; djelimično primjenljivo/djelimično moguće; nije primjenljivo/nije moguće. Na osnovu analize prikazanih rezultata može se zaključiti da najveći broj ocjena „odlično primjenljivo/moguće“ ima REW tehnologija, dok, sa druge strane, najveći broj ocjena „nije primjenljivo/nije moguće“ ima tehnologija zakivanje bez zakovica.

M. M. Eshtayeh i drugi [67] predstavili su poređenje različitih tehnologija spajanja na osnovu 17 kriterijuma. Ocjenjivanje izvršeno opisno (lingvistički), a na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da su tehnologije spajanja zakivanje bez zakovica i SPR superiorne u odnosu na tehnologiju lijepljenja. Tehnologija lijepljenja zasebno možda nije najpogodnija, ali je već zaključeno da u kombinaciji sa mehaničkim tehnologijama spajanja značajno poboljšava mehanička svojstva spoja.

Probleme rangiranja tehnologija spajanja raznorodnih materijala za potrebe automobilske industrije razmatrali su i autori J. H. Kim i drugi [68]. Ovi autori su u svojoj studiji predstavili aplikaciju pod nazivom Multi-Material Joining Design Explorer koja predstavlja savjetodavni sistem baziran na znanju, namijenjen konstruktorima u ranoj fazi konstruisanja, a sve s ciljem izbora adekvatne tehnologije spajanja koja će se primjenjivati za izradu multimaterijal strukture.



6. Zaključak

Na osnovu sprovedene analize stanja tehnike iz oblasti tehnologija spajanja limova od čelika i legura aluminijuma, mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Odabir adekvatne tehnologije za spajanje limova od čelika i legura aluminijuma zavisi od aspekta posmatranja, odnosno očekivanih rezultata. Sve tehnologije imaju i prednosti i nedostatke, zato je za poređenje tehnologija potrebno odabrati adekvatne kriterijume;
- Elektrootporno tačkasto zavarivanje i dalje je najzastupljenija tehnologija spajanja u masovnog proizvodnji, zato što alternativne tehnologije spajanja kao što su REW, FDS, SPR nisu još uvijek u potpunosti istražene, te ne mogu u cijelosti zamijeniti konvencionalne postupke iako imaju brojne prednosti.
- Kada je riječ o lijepljenju, treba napomenuti da ova tehnologija zasebno nije najpogodnija, ali se na osnovu pregleda literature može zaključiti da u kombinaciji sa drugim tehnologijama spajanja (mehaničko spajanje ili tehnologije zavarivanje) značajno poboljšava mehanička svojstva spoja. Fokus budućih istraživanja treba ići u pravcu analize mehaničkih svojstava hibridnih spojeva (lijepljenje + mehaničke tehnologije ili tehnologije zavarivanja).

Zahvalnost

Ovaj rad je rezultat istraživanja u okviru bilateralnog projekta između Bosne i Hercegovine i Republike Slovenije: "Istraživanje i analiza savremenih tehnologija spajanja raznorodnih materijala koji se primjenjuju pri razvoju lakih konstrukcija" u projektnom ciklusu 2021-2023 (br.projekta 451-03-9/2021-14/200109).

Literatura / References

- [1] Klein, B. (2009), Leichtbau-Konstruktion, Berechnungsgrundlagen und Gestaltung, Vieweg and Reubner.
- [2] Degischer, H. P., Luftl S., Leichtbau, (2012), Prinzipien, Werkstoffauswahl und Fertigungsvarianten, E-Book.
- [3] Albers, A., Burkardt N. (2013), Systemleichtbau Gewichtsreduzierung, u F. Henning, E. Moeller: Handbuch Leichtbau, Hanser Verlag München, 115-132.

6. Conclusion

Based on the analysis of the state of the art in the field of joining technologies of steel and aluminum alloys sheets, the following conclusions can be made:

- The selection of an adequate technology for joining steel and aluminum alloys sheets depends on the aspect of observation, or of the expected results. All technologies have both advantages and disadvantages, so for the comparison of technologies it is necessary to choose adequate criteria;
- Electric resistance spot welding is still the most common joining technology in mass production, because alternative joining technologies such as REW, FDS, SPR have not yet been fully explored, and cannot completely replace conventional procedures, although they have numerous advantages.
- When talking about gluing, it should be noted that this technology alone is not the most suitable, but based on a review of the literature, it can be concluded that in combination with other joining technologies (mechanical joining or welding technology) it significantly improves the mechanical properties of the joint. The focus of future research should be in the direction of analyzing the mechanical properties of hybrid joints (gluing + mechanical technologies or welding technologies).

Acknowledgement

This paper is the result of research within the framework of a bilateral project between Bosnia and Herzegovina and the Republic of Slovenia: "Research and analysis of modern joining technologies of dissimilar materials used in the development of light constructions" in the project cycle 2021-2023 (project no. 451-03-9/ 2021-14/200109).

- [4] Shashank, M., Stevens, M., Chess, M. (2017), Mixed Material Joining Advancements and Challenges, Center for Automotive Research, Ann Arbor, MI.

- [5] Taub, A. I., Luo, A. A. (2015), Advanced lightweight materials and manufacturing processes for automotive application, MRS Bulletin, 40, 1045-1053.

- [6] Tisza, M., Lukács, Z. (2018), High strength aluminum alloys in car manufacturing, International Deep Drawing Research Group 37th Annual



Conference, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 418.

[7] Meschut, G., Janzen, V., Olfermann, T. (2013), Innovative and Highly Productive Joining Technologies for Multi-Material Lightweight Car Body Structures, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 5, 23, 1515-1523.

[8] S. R. -. o. t. r. project (2017), Development and evaluation of advanced, Acronym: InnoJoin, Project nr. 130368.

[9] Tatsuya, S., Gen, M., Yasuaki, N., Kenji, S., Yasunobu, M., Hatsuhiko, O., Tetsuro, N. (2013), Dissimilar Metal Joining Technologies for Steel Sheet and Aluminum Alloy Sheet in Auto Body, *Nippon steel technical report*, 91-98.

[10] Bertin, L. (2014), Tensile Strength of Automotive Aluminum Joints Using Resistance Spot Welding, Self-Piercing Riveting and Adhesive Hybrid Joining -Electronic Theses and Dissertations, University of Windsor,.

[11] Thongchai, A., Kawin, S., Phisut, A., Kreangsak, T. (2014), Resistance Spot Welding Optimization Based on Artificial Neural Network, *International Journal of Manufacturing Engineering*.

[12] Jianbin, C., Xinjian, Y., Zhan, H., Ting, L., Kanglong, W., Ci, L. (2017), Improvement of resistance-spot-welded joints for DP 600 steel and A5052 aluminum alloy with Zn slice interlayer, *Journal of Manufacturing Processes*, 30, 398-405.

[13] Zhanxiang, L., Yang, L., Zhen, L., Sansan, A., Zhanghua, Y., Yunlong, G., Qiang, C. (2017), Microstructure and fatigue behavior of resistance element welded dissimilar joints of DP780 dual-phase steel to 6061-T6 aluminum alloy, *Int J Adv Manuf Technol*, 92, 5-8, 1923-1931.

[14] Hamed, A.-S., Mahmoud, S.-K., Azadeh, N.-B., Seyed, F. K.-B. (2020), Dissimilar resistance spot welding of 6061-T6 aluminum alloy/St-12 carbon steel using a high entropy alloy interlayer, *Intermetallics*, 124.

[15] Shanqing, H., Amberlee, S. H., Yunwu, M., Yongbing, L., Blair, E. C., Zhongqin, L. (2021), Sensitivity of dissimilar aluminum to steel resistance spot welds to weld gun deflection, *Journal of Manufacturing Processes*, 68 A.

[16] Yang, J., Xue S., i dr. (2016), Development of Zn-15Al-xZr filler metals for

Brazing 6061 aluminum alloy to stainless steel, *Materials Science & Engineering A*, 651, 425-434.

[17] Arghavani, M.R., Movahedi, M., Kokabi A.H. (2016), Role of zinc layer in resistance spot welding of aluminium to steel, *Materials & Design*, 102, 106-114.

[18] Nannan, C., Min, W., Hui-Ping, W., Zixuan, W., Blair, E. C. (2018), Microstructural and mechanical evolution of Al/steel interface with Fe₂Al₅ growth in resistance spot welding of aluminum to steel, *Journal of Manufacturing Processes*, 34 A.

[19] Liting, S., Jidong, K., Cheng, Q., Jie, L., Babak, S.-A., Amberlee, S., Blair, E. C. (2022), Role of Fe₂Al₅ in fracture of novel dissimilar aluminum-steel resistance spot welds using multi-ringed domed electrodes, *Materials Science and Engineering: A*, 831.

[20] Pouranvari M. (2017), Critical assessment: dissimilar resistance spot welding of aluminium/steel: challenges and opportunities, *Materials Science and Technology*, 33, 1705-1712.

[21] Manladan, S. M., Yusof, F., Ramesh, S., Zhang, Y., Luo, Z., Ling Z. (2017), Resistance Element Welding of Magnesium Alloy/austenitic Stainless Steel, *Joining and Welding Symposium*, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 238.

[22] Zhanxiang, L., Yang, L., Zhen, L., Yueqiao, F., Zhengmin, W. (2016), Resistance element welding of 6061 aluminum alloy to uncoated 22MnMoB boron steel, *Materials and Manufacturing Processes*, 31, 16, 2174-2180.

[23] Ranfeng, Q., Nannan, W., Hongxin, S., Lihu, C., Longlong, H., Keke Z. (2015), Joining steel to aluminum alloy by resistance spot welding with a rivet, *International Journal of Materials Research*, 106, 1, 60-65.

[24] Đurić, A., Milčić, D., Burzić, Z., Klobčar, D., Milčić, M., Marković, B., Krstić, V. (2022), Microstructure and Fatigue Properties of Resistance Element Welded Joints of DP500 Steel and AW 5754 H22 Aluminum Alloy, *Crystals*, 12, 258.

[25] Đurić, A. (2022), Istraživanje tehnologija spajanja limova od čelika DP500 i legure aluminijuma AW-5754 u cilju razvoja lakih



konstrukcija, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet Niš.

[26] Jimenez, N. M., Jacques, P., Simar A. (2016), Evaluation of the intermetallic fracture toughness in Al-to-steel welds performed by Friction Stir Welding and Friction Melt Bonding, Journées annuelles de la SF2M, Albi, France.

[27] Mohamed Abd Elnabi M., Osman, T.A., El Mokadem, A., Bakr Elshalakany A. (2020), Evaluation of the formation of intermetallic compounds at the intermixing lines and in the nugget of dissimilar steel/aluminum friction stir welds, Journal of Materials Research and Technology, 9, 5, 10209-10222.

[28] Saleh, A., Eslam, R., Seyyed, E. M. (2021), Joining mechanism in pinless FSSW of aluminum-steel with or without Zn and brass interlayers, Materials Characterization, 180.

[29] Chae, L. Y., Warren, D. C., Chen, J., Zhili, F. (2019), Joining of Lightweight Dissimilar Materials by Friction Self-Piercing Riveting, In: Y. Hovanski, R. Mishra, Y. Sato, P. Upadhyay, D. Yan (eds) Friction Stir Welding and Processing X. The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, Cham.

[30] Milčić, M. (2020), Istraživanje uticaja parametara zavarivanja trenjem sa mešanjem na dinamičku izdržljivost zavarenog spoja legure aluminijuma 2024 T351, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet Univerziteta u Nišu.

[31] Long, W., Yongxian, H. (2018), Friction stir welding of dissimilar aluminum alloys and steels: a review, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 99, 1781–1811.

[32] Wang, P., Chen, X., Pan, Q., Madigan, B., Long J. (2016), Laser welding dissimilar materials of aluminum to steel: an overview, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 87, 3081–3090.

[33] Gullino, A., Matteis, P., D’Aiuto F. (2019), Review of Aluminum-To-Steel Welding Technologies for Car-Body Applications, Metals, 9, 315.

[34] Zhao, D., Ren, D., Zhao, K., Pan, S., Guo, X. (2017), Effect of welding parameters on tensile strength of ultrasonic spot welded joints of aluminum to steel—By experimentation and

artificial neural network. J. Manuf. Process, 30, 63–74.

[35] Michael, B., Balle, F. (2021), Multi-Spot Ultrasonic Welding of Aluminum to Steel Sheets: Process and Fracture Analysis, Metals, 11, 5.

[36] Ken-ichiro, M., Yohei, A. (2018), A review on mechanical joining of aluminium and high strength steel sheets by plastic deformation, International Journal of Lightweight Materials and Manufacture.

[37] Zhanpeng, D., Baolv, W., Zhicheng, H., Aiguo, C., Libin, D., Guangya, Z. (2021), Experimental and numerical investigations of aluminium–steel self-piercing riveted joints under quasi-static and dynamic loadings, Thin-Walled Structures, 169.

[38] Weixue, L., Xuwu, Z., Qiaoying, Z., Hong, H., Jianpeng, L., Congchang, X., Luoxing, Li. (2020), Modeling and simulation of the flow drill screw process of a DP590/Al6061-T6 multi-material joint used for vehicle body, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 110, 1189–1201.

[39] Tae-Young, K., et al. (2022), Study on Effect of Process Variable on Fastening Quality Using Process Monitoring Data of Flow Drill Screwed 590DP Steel/AA5052 combination, Journal of Welding and Joining, 40 3. 256-264.

[40] Dezhi, L., Andreas, C., Imran, P., Geraint, W. (2017), Self-piercing riveting—a review, Int J Adv Manuf Technol, 92, 1777–1824.

[41] Rezwani, H. Quality of self-piercing riveting (SPR) joints from cross-sectional perspective (2018), A review, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 18, 1, 83-93.

[42] Uhe, B., Kuball, M. C., Merklein, M. i dr. (2020), Improvement of a rivet geometry for the self-piercing riveting of high-strength steel and multi-material joints, Prod. Eng. Res. Devel, 14, 417–423.

[43] Carmen, S., Gundolf, K., Horst E. F. (2016), Influence of Corrosive Conditions on the Mechanical Performance of Flow Drill Screw Joints between Light Metals, Materials Science Forum, 879, 1725-1730.

[44] Sønstabø, J. K., Holmstrøm, P. H., Morin, D., & Langseth, M. (2015), Macroscopic strength and failure properties of flow-drill screw



connections. *Journal of Materials Processing Technology*, 222, 1-12.

[45] Mucha, J. (2017), Clinching technology in the automotive industry. *Archiwum Motoryzacji*, 76 2.

[46] Zhang, X., Chen, C. (2022), Experimental investigation of joining aluminum alloy sheets by stepped mechanical clinching. *Journal of Materials Research and Technology*, 19, 566-577.

[47] Peng, H., Chen, C., Ren, X., & Wu, J. (2021), Development of clinching process for various materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 119, 99-117.

[48] Carboni, M., Beretta, S., Monno, M. (2006), Fatigue behaviour of tensile-shear loaded clinched joints. *Engineering Fracture Mechanics*, 73, 2, 178-190.

[49] Jónás, S., et al. (2019), Experimental and numerical study of dissimilar sheet metal clinching. In *AIP Conference Proceedings*, AIP Publishing LLC, 2113, 1.

[50] Wiesenmayer, S., Graser, M., Merklein, M. (2020), Influence of the properties of the joining partners on the load-bearing capacity of shear-clinched joints. *Journal of Materials Processing Technology*, 283, 116696.

[51] Song, Y., et al. (2019), Numerical and experimental study on failure behavior of steel-aluminum mechanical clinched joints under multiple test conditions. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2, 1, 72-79.

[52] Barimani-Varandi, A., Aghchai, A. J. (2020), Electrically-assisted mechanical clinching of AA6061-T6 aluminum to galvanized DP590 steel: effect of geometrical features on material flow and mechanical strength. *Mechanics & Industry*, 21, 5, 529.

[53] Hörhold, et al. (2016), Mechanical properties of an innovative shear-clinching technology for ultra-high-strength steel and aluminium in lightweight car body structures. *Welding in the World*, 60, 3, 613-620.

[54] Tenorio, M. B., Lajarin, S. F., Gipiela, M. L., Marcondes, P. V. P. (2019), The influence of tool geometry and process parameters on joined sheets by clinching. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41, 2.

[55] Lei, L., He, X., Yu, T., Xing, B. (2019), Failure modes of mechanical clinching in metal sheet materials. *Thin-Walled Structures*, 144.

[56] Chastel, Y., Passemard, L. (2014), Joining technologies for future automobile multi-material modules. *Procedia Engineering*, 81, 2104-2110.

[57] Watson, B., et al. (2019), Metallic multi-material adhesive joint testing and modeling for

vehicle lightweighting. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 95, 102421.

[58] Maggiore, S., Banea, M. D., Stagnaro, P., Luciano, G. A (2021), Review of Structural Adhesive Joints in Hybrid Joining Processes. *Polymers*, 13, 22, 3961.

[59] Jeevi, G., Nayak, S. K., & Abdul Kader, M. (2019), Review on adhesive joints and their application in hybrid composite structures. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 33, 14, 1497-1520.

[60] Zvorykina, A., et al. (2020), Dissimilar metal joining of aluminum to steel by hybrid process of adhesive bonding and projection welding using a novel insert element. *Journal of Materials Processing Technology*, 282, 116680.

[61] European Aluminium Association: Aluminium Automotive Manual – Joining, Hybrid joining techniques (www.european-aluminium.eu, pristupljeno 29.03.2022).

[62] Meschut, G., et al. (2017), Process characteristics and load-bearing capacities of joints welded with elements for the application in multi-material design. *Welding in the World*, 61, 3, 435-442.

[63] Meschut, G., et al. (2014), Innovative joining technologies for multi-material structures. *Welding in the World*, 58, 1, 65-75.

[64] Naito, J., Suzuki, R. (2020), Multi-material automotive bodies and dissimilar joining technology to realize multi-material. *Kobelco Technol. Rev*, 38, 32-37.

[65] Suzuki, R., Ryo, C. (2018), Dissimilar metals Joining Process using GMAW has High strength and One side access characteristic, and the Automation robot system. *Arc Welding Processes and Production Systems*. 71ST IIW Annual Assembly, Bali Nusa Dua Convention Center, Bali, Indonesia.

[66] Eshtayeh, M. M., Hrairi, M., Mohiuddin, A. K. M. (2016), Clinching process for joining dissimilar materials: state of the art. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 82, 1, 179-195.

[67] Kim, J. H., et al. (2019), Knowledge based design advisory system for multi-material joining. *Journal of Manufacturing Systems*, 52, 253-263.

[68] Jiang, H., et al., (2021), Comparative study on joining quality of electromagnetic driven self-piecing riveting, adhesive and hybrid joints for Al/steel structure. *Thin-Walled Structures*, 164, 107903



Prikaz monografije

NERĐAJUĆI ČELICI



Monografija Nerđajući čelici autora Zorana Karastojkovića i Radiše Perića u izdanju Inženjerskog društva za koroziju i firme Perić&Perić, nastala je iz činjenice da su u prošlosti naši malobrojni proizvođači nerđajućih čelika od štampanih materijala imali samo prospekte i da je ova tema u udžbenicima iz ovog domena obrađivana u prilično skućenom obimu, tako da na prostorima bivše Jugoslavije nije postojala jedna sveobuhvatna knjiga o nerđajućim čelicima, što je motivisalo autore da je napišu.

U predgovoru monografije autori su napomenuli da među mnogim zaposlenima koji rade sa nerđajućim čelicima je prisutan naziv „prohromski čelici“, koji je prema mišljenju autora prosto neodrživ bez obzira na jezik naroda iz bivše Jugoslavije, jer bi po toj logici nerđajući čelici sa viškom nikla u odnosu na hrom bili „pronikli čelici“ itd., a što je u monografiji razumno objašnjeno.

Sadržaj monografije „Nerđajući čelici“ čine 23 poglavlja, koja obuhvataju teme počev od osobina nerđajućih čelika i legirajućih elemenata, do načina topljenja, plastične prerade, sinterovanja, termičke obrade, zavarivanja, lemljenja, lepljenja, obrade rezanjem, pa do obrade i ukrašavanja površine elektro-hemijskim putem ili laserom. Monografija ima obim od 375 strana, sadži 291 slika, 75 tabela i 245 referenci - literaturnih navoda.

U okviru monografije iznete su osnovne postavke šta to čelike čini nerđajućim, primenom kriterijuma o brzini korozije, uz razjašnjenja o pasivizaciji, oblicima korozije kod ovih čelika i drugim važnim osobinama. Zatim je primenjena savremena podela nerđajućih čelika prema njihovim strukturama, tako da su pored standardnih feritnih, austenitnih i martenzitnih objašnjeni dupleks čelici, kao i precipitaciono otvrdnjavajući (PH) čelici. Strukturni dijagrami su, takođe, našli zasluženo mesto u monografiji. Izloženi su načini topljenja i livenja nerđajućih čelika i osim uobičajenih načina topljenja i livenja, obrađeni su i savremeni postupci kao što su: pretapanje pod šljakom, u vakuumu, legiranje azotom, centrifugalno livenje, izrada preciznog liva, pa do mogućnosti disperzionog ojačavanja nerđajućih čelika primenom čestica Al₂O₃ i dr. Prikazani su načini termičke obrade, obzirom da termička obrada bilo kojih čelika uvek je osetljiv postupak, što važi i za nerđajuće čelike. Pažnja je posvećena reznim alatima koji se ovako obrađuju pojedinačno (kao kuhinjski noževi npr.) ili u traci (kao merne trake ili žileti). Razmatrana je i termička obrada PH čelika koja je posebno interesantna, kao i izdvajanje intermedijatnih ili/ intermetalnih faza u ovim visoko legiranim čelicima.

Navedeni su postupci zavarivanja, metalizacije, lemljenja i lepljenja koji se sve više primenjuju, zbog čega su isti detaljnije obrađeni. Posebna pažnja je posvećena primeni laserskog zavarivanja, navarivanja pa čak i graviranja.



Postupci brušenja i poliranja su zaista malo zastupljeni u stručnoj literaturi o nerđajućim čelicima, a u monografiji je načinjen korak više, pa su razmotreni postupci mehaničkog i (elektro)hemijskog čišćenja i poliranja, do maskiranja prilikom nagrizanja površine. Koroziona otpornost na primeru jednog čelika je razmatrana nakon poliranja prethodno zavarenog nerđajućeg čelika. Poliranje ovih čelika se uveliko primenjuje kod kuhinjskog posuđa ili pribora za jelo, ali je ovde razmotreno i lepovanje, kao najviši kvalitet poliranja, za industrijske potrebe u slučaju pumpe sa leptir elementima.

Bojenje i ukrašavanje površine nerđajućih čelika je, mora se naglasiti, malo zastupljeno kod „običnih“ inženjera, ali postaje sve zastupljenije u praksi, posebno imajući u vidu namena u arhitekturi. To se najviše odnosi na bojenje i ukrašavanje kako u enterijerima tako i u eksterijerima. Posebno je interesantna laserska obrada površine, kada je brzo moguće izraditi čudesne oblike i šare u različitim bojama.

Većina nerđajućih čelika je meka, što znači da nisu otporni na habanje niti na abraziju. Iz tih razloga se sve više koriste metode (elektro)hemijske obrade, elektrostatičkog nanošenja praha, ali i savremenih metoda kao što je fizičko taloženje u parnoj fazi (PVD). Prikazani su primeri iz običnog života kao što su: narukvice na satovima, kopčama, noževima, ali i ventilima SUS motora. PVD metoda je primenljiva za nanošenje platine na žilete, a za smanjenje trenja na žiletima se primenjuje nanošenje tankog teflonskog sloja tako da prilikom brijanja žilet lako „klizi“ po koži.

Monografija Nerđajući čelici autora Zorana Karastojkovića i Radiše Perića, dobila je Povelju od strane Saveza inženjera i tehničara Srbije za najbolju publikaciju Srbije u 2022. godini.

Monografija se može poručiti i nabaviti direktnim kontaktom sa autorima i to:

Zoran Karastojković - Društvo za etičnost i vrednovanje u kulturi i nauci, Beogradska 55, 11000 Beograd, Srbija, ili e-mail: zoran.karastojkovic@gmail.com

Radiša Perić - „Perić&Perić“ d.o.o, Dunavska 114-116, 12000 Požarevac, Srbija ili e-mail: pericradisa@gmail.com

Ispitivanje Materijala I Zavarenih Spojeva

**SIGMA
LAB**

www.sigmalab.rs

Srđan Bulatović¹

ISPITIVANJA ZAVARENIH SPOJEVA NISKOLEGIRANOG ČELIKA POVIŠENE ČVRSTOĆE KLASSE 700 MPa

INVESTIGATION OF WELDED JOINTS OF 700 MPa GRADE HIGH STRENGTH LOW ALLOY STEEL

Stručni rad / Professional paper

Rad primljen / Paper received:

Jun 2023.

Rad prihvaćen / Paper accepted:

Avgust 2023.

Ključne reči: niskolegirani čelici povišene čvrstoće, elektrolučno zavarivanje, mehaničke osobine

Rezime

Zahtevi ekonomične potrošnje energije i sirovina upućuju proizvođače čelika na proizvodnju zavarljivih čelika povišene čvrstoće, a projektante i konstruktore na njihovu primenu u zavarenim konstrukcijama. Primena niskolegiranih čelika povišene čvrstoće (HSLA) u metalnim konstrukcijama je sve zastupljenija pre svega zbog njihovog svojstva oblikovanja gde zavarljivost ima poseban značaj. Stoga se vremenom razvio čitav niz postupaka ispitivanja kojima je cilj da se svojstva zavarenog spoja pomenutih materijala što bolje upoznaju i tako što racionalnije iskoriste. Analizirana svojstva kao što su ispitivanje zatezanjem, udarna žilavost i tvrdoća, daju širu sliku o samim zavarenim spojevima niskolegiranih čelika i njihovim osobinama i upoređuju se sa zahtevima međunarodnih standarda iz oblasti elektrolučnog zavarivanja.

Adresa autora / Author's address:

Institut za ispitivanje materijala a.d. Bulevar vojvode Mišića 43,
Beograd, Srbija

email: srdjan.bulatovic@institutims.rs

Keywords: high strength low alloy steel, arc welding, mechanical properties

Abstract

The requirements of economical consumption of energy and raw materials direct steel producers to the production of weldable steels of high strength, and designers and constructors to their application in welded constructions. The use of high strength low alloy steel (HSLA) in metal constructions is increasingly prevalent, primarily due to their forming properties, where weldability is of particular importance. Therefore, over time, a whole series of test procedures has been developed, the aim of which is to better understand the properties of the welded joint of the mentioned materials and to use them more rationally. The analyzed properties, such as tensile testing, impact toughness and hardness, give a broader picture of the welded joints of high strength low alloy steel and their properties and compared with the requirements of international standards in the field of arc welding.



1. Uvod

1.1 Opšte činjenice o niskolegiranim čelicima povišene čvrstoće

Kako i svi materijali, tako i niskolegirani čelici povišene čvrstoće imaju svoju primenu u savremenim konstrukcijama, uz celokupno prisustvo svih prednosti i mana, pre svega zbog svoje specifičnosti u različitim uslovima opterećenja. Prednosti niskolegiranih čelika povišene čvrstoće u odnosu na ostale konstrukcijske čelike su:

- smanjena masa konstrukcije,
- povećana nosivost,
- povećan vek trajanja konstrukcije i
- manji troškovi izrade, odnosno ekonomičnija proizvodnja.

Pomenuti čelici svoju veliku primenu nalaze u brodogradnji, posudama pod pritiskom, transportnim sredstvima, nuklearnim postrojenjima i nosećim čeličnim konstrukcijama [1]. Zbog svoje cene i nivoa proizvodne tehnologije uz nizak sadržaj ugljenika (od 0.1 do 0.3 %), imaju i nizak sadržaj sumpora, fosfora i drugih primesa, a odlikuju se i povećanom čistoćom u odnosu na gasove i nemetalne uključke [2]. Važno je pomenuti da zbirni sadržaj svi legirajućih elemenata ne prelazi 5 %. Osnovni legirajući elementi koji se dodaju niskolegiranim čelicima povišene čvrstoće su: hrom, mangan, silicijum, nikl, molibden i vanadijum [3].

1.2. Zavarljivost HSLA čelika i udarna žilavost

Kada se govori o legiranju i termomehaničkoj obradi ovih čelika mora da se napomene da nisu svi niskolegirani čelici podjednako pogodni za zavarivanje. Što je čelik više legiran elementima koji obrazuju krte strukture pri zavarivanju (uključujući i ugljenik), to je lošija zavarljivost. Karakteristična je osobina obrazovanja zakaljive strukture u zoni uticaja toplote (ZUT), što povećava sklonost ka pojavi krtog loma [1, 3]. Zbog toga se izbor čelika, od kojih se očekuje izrada sigurnih konstrukcija, ne vrši samo na osnovu pokazatelja čvrstoće osnovnog metala (OM), već se uzimaju u obzir i druga mehaničko-tehnološka svojstva kako OM tako i celog zavarenog spoja.

Spajanje zavarivanjem je vrlo čest postupak oblikovanja metalnih materijala koji ima niz prednosti u odnosu na druge postupke spajanja metala ili izrade konstrukcija. Sve veća primena čelika povišene čvrstoće prilikom izrade savremenih konstrukcija iziskuje poseban osvrt na

ocenu pogodnosti tih materijala za zavarivanje odnosno za ocenu njihove zavarljivosti [3, 4]. Pojam zavarljivosti metala obuhvata sveukupnost karakteristika OM koje su određene njegovim odnosom prema promenama koje se odigravaju pri zavarivanju i sposobnosti da se uz izabrani tehnološki režim obezbedi sigurnost u eksploataciji zavarenog spoja [5]. Pored svojstava OM, zavarljivost je određena i elementima tehnološkog postupka zavarivanja (način zavarivanja, režim zavarivanja, sastav dodatnog materijala za zavarivanje, tip i karakter zaštite i dr.).

Jasno je da od vrste čelika i uslova eksploatacije zavarene konstrukcije zavisi i skup pokazatelja koji definišu zavarljivost. Što je veća čvrstoća čelika i što su složeniji uslovi eksploatacije, to je i veći broj pokazatelja zavarljivosti, pa se samim tim povećava i obim ispitivanja koja treba uraditi [1]. Obim ispitivanja, odnosno izbor metoda za ocenu zavarljivosti čelika zavisi od namene konstrukcije i svojstava osnovnog i dodatnog materijala za zavarivanje. Po pravilu, povećanje stepena legiranja i čvrstoće čelika doprinosi pogoršanju njegove zavarljivosti. Uvođenjem novih postupaka zavarivanja uz napredak u tehnologiji, mnogi materijali loše zavarljivosti su prevedeni u grupu zadovoljavajuće zavarljivosti, ali ostaje činjenica da ukoliko je materijal kvalitetniji, to je i broj podataka koji ocenjuju zavarljivost veći a njihove međusobne zavisnosti složenije. Sigurnost zavarenih spojeva u velikoj meri određuje eksploatacionu sigurnost i ekonomičnost konstrukcije.

Prisustvo grešaka u zavarenim spojevima, neispunjenje traženih svojstava, oblika i homogenosti šava, kao i svojstava i heterogenosti u ZUT, može poremetiti čvrstoću i druge eksploatacijske karakteristike konstrukcije. U uslovima izrade zavarene konstrukcije, greške nastaju dosta često. Broj grešaka je realni pokazatelj racionalnosti primenjenog tehnološkog procesa zavarivanja, pogodnosti i uslova korišćenja materijala koji se koristi u procesu zavarivanja, stručnosti kadra, postojanja neophodnih uslova koje zahteva radno mesto zavarivača kao i opšteg tehničkog nivoa proizvodnje [6]. Svako odstupanje od zahteva definisanih tehničkom dokumentacijom, koje može da se odnosi na bilo koju karakteristiku zavarenog spoja niskolegiranih čelika povišene čvrstoće se podrazumeva pod pojmom greške. Shodno tome, greška može biti unutrašnja (prslina, uključak) i spoljna (nehomogenost i geometrijsko odstupanje oblika i dimenzija). Greške se otkrivaju ispitivanjem bez razaranja, najčešće ultrazvukom,



radiografski, penetrantima i magnetnim fluksom. Takođe, greške u zavarenom spoju se dele na:

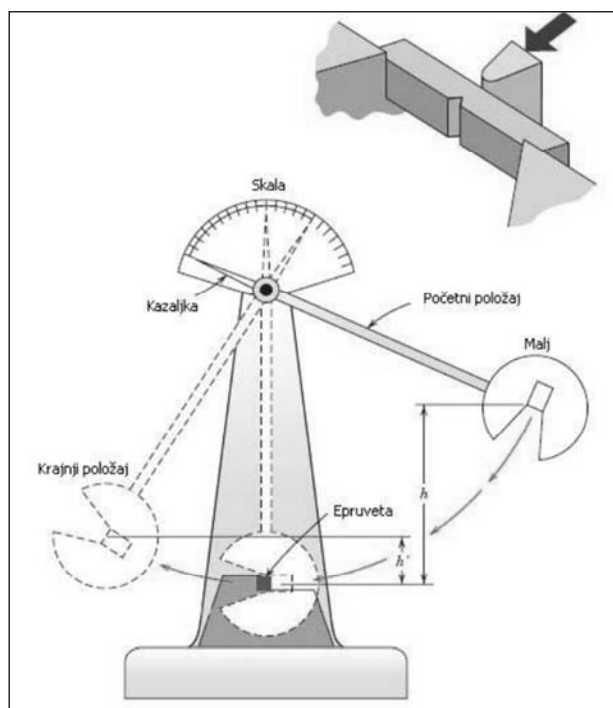
1) greške vezane za metalurške, termičke i hidrodinamičke pojave, koje prate proces rastapanja, formiranja i kristalizacije istopljenog metala i očvršćavanje zavarenog spoja. Među njima spadaju tople i hladne prsline u MŠ i ZUT, poroznost, troska, odstupanje od zahtevane čvrstoće i plastičnosti MŠ i zavarenog spoja, promene u mehaničim, fizičkim i hemijskim svojstvima ZUT.

2) greške formiranja šava (neprovari, zarezi, nepotpuno stapanje, smanjenje dimenzija šava). Nastajanje grešaka je najčešće uslovljeno nepravilnim tehnološkim postupkom, narušavanjem režima rada, niskom stručnošću izvršilaca procesa zavarivanja, lošom pripremom, nepravilnim konstrukcijskim postavljanjem, sastavljanjem i pripajanjem, nepristupačnošću mesta zavarivanja kao i nepravilnim popunjavanjem žleba [1]. Najopasnije greške u zavarenim spojevima su prsline, koje nastaju kao posledica toplotnih i metalurških procesa. Već je pomenuto da se prsline u zavarenim spojevima čelika razvrstavaju na tople (nastaju tokom primarne kristalizacije šava ili pri hlađenju iznad polovine vrednosti temperature topljenja, međukristalnog su tipa), hladne (nastaju u MŠ ili ZUT, najčešće pri kraju hlađenja zavarenog

spoja, ispod 300 °C), laminarne (posledica su dejstva zateznih napona u pravcu debljine zavarenog spoja, nastalih pri termičkom ciklusu zavarivanja) kao i prsline od žarenja (koje nastaju usled ponovnog zagrevanja u ZUT ili MŠ tokom termičke obrade posle procesa zavarivanja legiranih čelika) [7, 8, 9].

Kada je u pitanju udarna žilavost zavarenih spojeva niskolegiranih čelika povišene čvrstoće ona se definiše kao energija koju je potrebno utrošiti da bi se izazvalo razaranje strukture materijala odnosno da bi se ostvario lom.

Ispitivanje udarnim dejstvom sile na epruvetama sa zarezom može da pruži objašnjenje o ponašanju materijala pri ometanom deformisanju odnosno pri prostornom naponskom stanju. Određivanje rada potrebnog za lom pod utvrđenim uslovima ispitivanja najčešće služi za tekuću kontrolu kvaliteta i homogenosti materijala. Ovim postupkom može se utvrditi sklonost ka krtom lomu, odnosno sklonost ka povećanju krtosti u toku eksploatacije [10]. Instrument pomoću kojeg se najmerodavnije vrše udarna ispitivanja je Šarpijevo klatno. Preciznije, klatno je u osnovi fizičko klatno gde se kinetička energija kretanja malja troši na razaranje (lom) epruvete fiksirane na osloncima. Šema klatna je prikazana na slici 1.



Slika 1. Instrumentirano Šarpijevo klatno

Figure 1. Charpy pendulum impact test

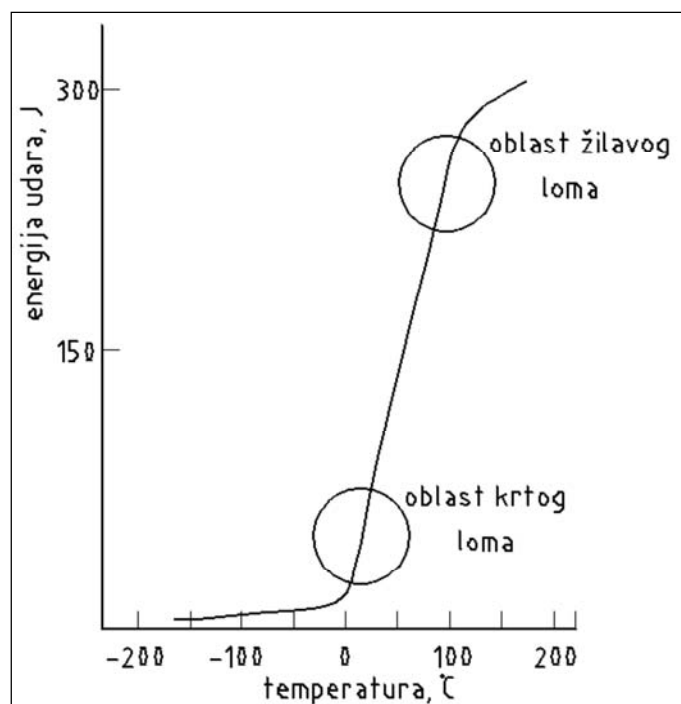


Pomoću instrumentiranja Šarpijevog klatna se veoma precizno rasčlanjuje ukupna energija za lom na udeo energije koji je vezan za otpornost materijala prema stvaranju prsline, i na deo koji se odnosi na širenje prsline. Ispitivanjem epruvete sa zarezom na instrumentiranom klatnu omogućeno je praćenje promene sile sa vremenom, odnosno dobijanje dijagrama sila-vreme. Iz dijagrama sila-vreme moguće je dobiti ukupnu energiju udara, potrebnu za lom uzorka, koja se kasnije rasčlanjuje na deo energije koji se troši za stvaranje prsline i na deo energije za njeno širenje [11].

Najadekvatniji postupak određivanja energije širenja prsline je preko "zamorne prsline", gde se na epruvetama sa "V" zarezom izaziva zamorna prsline, pa se takva epruveta lomi na Šarpijevom klatnu. Energija koja se pri tom utroši za lom je praktično energija širenja prsline. Ukoliko je

poznata vrednost ukupne energije udara ispitivanog materijala onda se može izračunati deo energije potrebne za stvaranje prsline.

Rezultati ispitivanja udarne žilavosti na različitim temperaturama pokazuju da temperatura bitno utiče na udarnu žilavost metala i legura. Na višim temperaturama utrošena energija udara na lom epruvete je velika (materijal pokazuje svojstva plastičnosti, uočava se jako izražena deformacija na mestu prekida epruvete, površina preloma pokazuje sitnozrnu-vlaknastu strukturu tzv. žilavi lom) dok na nižim temperaturama utrošena energija udara za prekid epruvete je mala (materijal je krto, ne uočavaju se znaci deformacije na mestu prekida, površina preloma je krupnozrnaste strukture tzv. krto lom). Na slici 2 je prikazana zavisnost udarne žilavosti od temperature uz prisustvo žilavog i krto loma.



Slika 2. Zavisnost udarne žilavosti od temperature

Figure 2. Dependence of impact toughness on temperature

2. Eksperimentalni deo

Eksperiment je baziran na ispitivanju realnog zavarenog spoja niskolegiranog čelika povišene čvrstoće pod nazivom Nionikral (NN-70) kao primeru heterogene structure. Sprovedena su udarna ispitivanja sva tri konstituenta radi provere žilavosti na različitim temperaturama eksploatacije.

Uz pomenuta ispitivanja izvršena su ispitivanja tvrdoće Vickersovom metodom i ispitivanja zatezanjem.

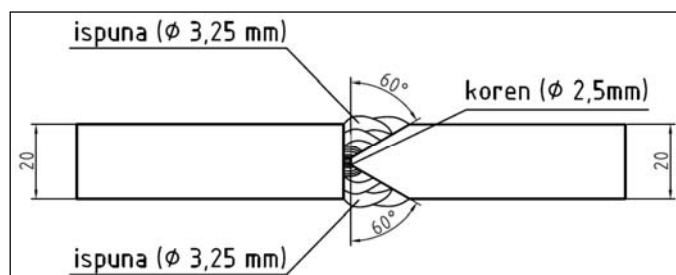
Hemijski sastav čelika Nionikral, koji se koristi za posude po pritiskom i brodske zavarene konstrukcije je dat u tabeli 1.

**Tabela 1. Hemijski sastav čelika NN-70 (u % mase)****Table 1. Chemical composition of NN-70 steel (in mass %)**

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
0.106	0.209	0.220	0.005	0.017	1.258	2.361	0.246
Al	Mo	Ti	As	V	Nb	Sn	Ca
0.007	0.305	0.002	0.017	0.052	0.007	0.014	0.0003
B	Pb	W	Sb	Ta	Co	N	Fe
0	0.0009	0.0109	0.007	0.0009	0.0189	0.0096	ostatak

Eksperimenti su vršeni na pločama debljina 20 mm, koje su zavarene ručno elektrolučnim postupkom iz kojih su kasnije napravljene epruvete

za pomenuta ispitivanja, preciznije u pitanju je šav koje je 'K' obliku, prema standardu SRPS EN ISO 9692-1:2012, što je prikazano na slici 3.

**Slika 3. Izgled "K" žleba****Figure 3. "K" groove**

Kako svojstva metala šava NN-70 mnogo zavise od odabira adekvatne elektrode, u ovom slučaju za popunu K žleba, tj. dodatnog materijala pri zavarivanju, ploče NN-70 su zavarene efektom overmečing uz korišćenje elektrode EVB 75 čiji

hemijski sastav je prikazan u tabeli 2., firme "Elektrode Jesenice" iz Slovenije. EVB 75 je legirana bazična elektroda za zavarivanje sitnozrnih čelika i čelika povišene čvrstoće.

Tabela 2. Hemijski sastav elektrode EVB 75 (u % mase)**Table 2. Chemical composition of EVB 75 (in mass %) electrode**

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Fe
0.06	0.45	1.5	0.45	2.2	0.45	ostatak

Prema podacima proizvođača, upotrebom ove elektrode dobijeni zavareni spojevi su otporni na pojavu prslina i imaju dobru žilavost do -60°C . Zavareni spoj je izrađen elektrodom EVB 75 sa prečnicima od $\text{Ø } 2.5 \text{ mm}$ i $\text{Ø } 3.25 \text{ mm}$. Elektroda prečnika $\text{Ø } 2.5 \text{ mm}$ je iskorišćena za popunjavanje korena K žleba, zbog teže pristupačnosti prilikom zavarivanja, dok je elektroda prečnika $\text{Ø } 3.25 \text{ mm}$ upotrebljena za ispunu K žleba. Temperatura predgrevanja je bila 170°C . Struja zavarivanja korena je iznosila 95 A, a kod ispune je iznosila u dijapazonu od 116 do 118 A. Zavaren je ceo prolaz po dužini, pet do sedam puta u zavisnosti od strane ploče. Podaci o naponu prilikom popunjavanja

korena nisu dobijeni zbog nekontinualnog zavarivanja i viška troske koja se pojavila u samom čošku K žleba. Napon kod zavarivanja korena je iznosio 19 V.

Nakon zavarivanja ploča izrđivani su standardni uzorci za sledća ispitivanja zavarenih spojeva i to:

- tvrdoća kroz zavareni spoj po Vickersu
- ispitivanje zatezanjem
- udarna ispitivanja instrumentiranom klatnu sa osciloskopom.

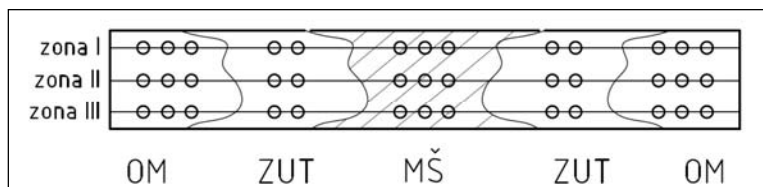


3. Rezultati i diskusija

3.1. Merenje tvrdoće po Vickersu

Nakon zavarivanja, vršeno je merenje je tvrdoće, Vickersovom metodom HV10, sa statičkim dejstvom sile, prema standardu SRPS EN 1043-

1:2007. Tvrdoća je merena linijski u OM-ZUT-MŠ-ZUT-OM, na tri nivoa u poprečnom preseku sa dva do tri otiska u svakoj od zona spoja, kao što je prikazano na slici 4. Rezultati su prikazani u tabeli 3.



Slika 4. Prikaz merenja tvrdoće

Figure 4. Hardness measurement

Tabela 3. Rezultati merenja tvrdoće Vickerskovom metodom HV 10

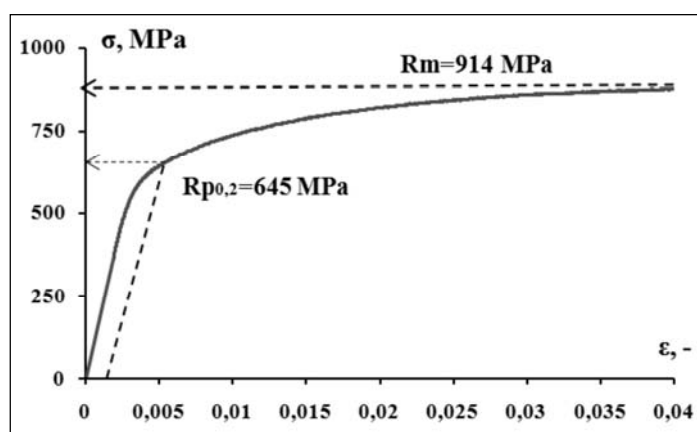
Table 3. Vickers hardness measurement method results HV 10

	OM			ZUT		MŠ			ZUT		OM		
	1	2	3	4	1	6	7	8	9	10	11	12	13
I	253	255	256	277	253	291	294	288	275	273	254	252	250
II	255	258	259	269	255	290	289	294	272	275	259	262	257
III	262	265	258	273	262	294	290	292	273	271	256	259	257

3.2. Ispitivanje zatezanjem

Glatka epruveta je korišćena za određivanje zateznih svojstava zavarenog spoja NN-70 na sobnoj temperature, debljine 7 mm. Ispitivanje je urađeno na univerzalnoj elektromehaničkoj kidalici Schenck Trebel RM100, sa minimalnim opsegom od 0-20 kN i maksimalnim opsegom od 0-100 kN u kontroli izduženja. Brzina uvođenja opterećenja je bila 5 mm/min. Izduženje je registrovano ultrazvučnim ekstenzometrom, čija je tačnost

iznosila $\pm 0,001$ mm. Sa dobijenog dijagrama, prikazanog na slici 5., očitane su vrednosti maksimalne sile, sile koja odgovara početku plastične deformacije, u cilju dobijanja čvrstoće popuštanja i zatezne čvrstoće kao i vrednost procentualnog izduženja epruvete. Ispitivanje zateznih svojstava je urađeno prema standardu SRPS EN ISO 6892-1:2012. Zatezna svojstva zavarenog spoja NN-70 su data u tabeli 4.



Slika 5. Ispitivanje zatezanjem zavarenog spoja NN-70

Figure 5. Diagram of tensile testing of NN-70 welded joint

**Tabela 4. Rezultati ispitivanja zatezanjem****Table 4. Results of tensile testing**

Granica popuštanja, $R_{p0.2}$, (MPa)	645
Zatezna čvrstoća, R_m , (MPa)	914
Izduženje, A_5 , (%)	22.4

3.3. Udarne ispitivanja

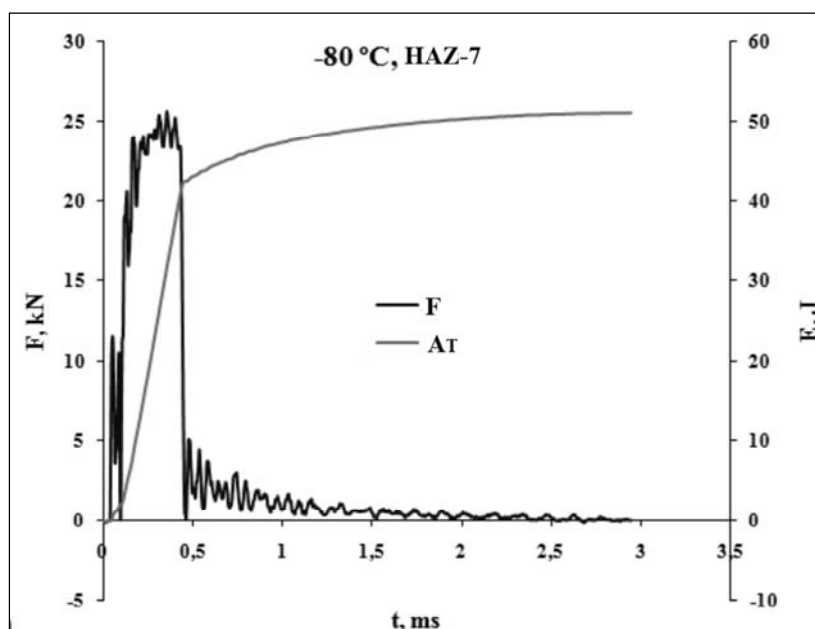
Udarne ispitivanja epruveta sa zarezom za OM, MŠ i ZUT na zavarenom spoju čelika NN-70, su rađena u cilju određivanja ukupne energije udara, njenih komponenti energije stvaranja i energije širenja prsline. Položaj V zareza, od 2 mm dubine, u odnosu na zavareni spoj je definisan standardom EN 875. Epruvete za ispitivanje udarne žilavosti su bile dimenzije 55x10x10 mm. U skladu sa standardom SRPS EN 10045-1 je urađeno ovo ispitivanje na instrumentiranom klatnu sa osciloskopom Schenck Trebel, energije 150-300 J. Osciloskopom je registrovan signal pri lomu epruvete udarom (period 5-12 ms) i posle je povezan na računar zbog obrade signala pri merenju.

Finalno su dobijeni dijagrami sa kojih su pročitani maksimalna sila, energija potrebna za stvaranje i širenje prsline kao i ukupna energija

udara. Preciznije, dobijena su dva tipa dijagrama, sila-vreme i energija-vreme koji su omogućili analizu rezultata ispitivanja, koja se sastojala od ocene uticaja temperature ispitivanja na ukupnu energiju udara, sa svojim komponentama energijom stvaranja i energijom širenja prsline. Udarne ispitivanja konstituenata zavarenog spoja (OM, MŠ i ZUT) čelika NN-70 su urađena na sledećim temperaturama:

- OM na temperaturama: 20 °C, -20 °C, -60 °C, -100 °C,
- MŠ na temperaturama: 20 °C, -40 °C, -80 °C i
- ZUT na temperaturama: 20 °C, -40 °C, -80 °C.

Epruvete na sniženim temperaturama su hladene tečnim azotom radi postizanja željenog temperaturnog stanja. Na slici 6. prikazan je jedan primer dobijenih rezultata dijagrama sila-vreme i energija-vreme za ZUT na -80 °C.

**Slika 6. Udarne ispitivanja zavarenog spoja NN-70 (ZUT na -80 °C)****Figure 6. Impact testing of NN-70 for HAZ at -80 °C**

U tabeli 5. su prikazani neki od rezultata udarnih ispitivanja za sve tri zone zavarenog spoja (OM, MŠ i ZUT) čelika NN-70. U tabeli su prikazani

rezultati ukupne energije udara, energije stvaranja prsline i energije širenja prsline na sobnoj i sniženim temperatureama.

**Tabela 5. Rezultati udarne žilavosti zavarenog spoja NN-70****Table 5. Results of impact toughness of NN-70 welded joints**

Broj epruvete	Temperatura ispitivanja °C	Ukupna energija udara, A_T (J)	Energija stvaranja prsline A_I (J)	Energija širenja prsline A_P (J)
OM-1	20	97.08	39.17	57.90
OM-2	-20	96.89	41.59	55.30
OM-3	-60	60.78	41.44	19.34
OM-4	-100	52.91	46.21	6.7
MŠ-1	20	78.24	24.60	53.64
MŠ-2	-40	53.69	21.85	31.85
MŠ-3	-80	18.28	8.21	10.07
ZUT-1	20	104.88	26.80	78.09
ZUT-2	-40	98.59	32.58	66.01
ZUT-3	-80	51.34	27.99	23.35

4. Zaključak

Iz prikazanih rezultata merenja tvrdoće zavarenog spoja NN-70 po Vickersu, metodom HV10, uočen je skok tvrdoće na liniji OM-ZUT-MŠ. Izmerena tvrdoća metala šava se kretala od 288 do 294 HV, dok kod zone uticaja toplote se kretala od 269 do 277 HV i kod osnovnog metala od 252 do 262 HV.

U slučaju ispitivanja zatezanjem dobijena je mala vrednost čvrstoće popuštanja od 645 MPa i vrednost zatezne čvrstoće od čak 914 MPa. Takođe, dobijena vrednost izduženja od 22.4 % govori o sklonosti materijala ka krtom lomu što nije u saglasnosti sa velikom razlikom između čvrstoće popuštanja i zatezne čvrstoće.

Poređenjem rezultata žilavosti – energije udara, odnosno poređenjem dijagrama sila-vreme i energija-vreme za sve tri zone zavarenog spoja NN-70 na različitim temperaturama proizilazi da su vrednosti ukupne energije udara kao i energije za širenje prsline najveće pri ispitivanjima na 20 °C, što znači da snižavanjem temperature opada i žilavost materijala. Takođe se vidi da mesto urezivanja V-2 zareza bitno utiče na heterogenost strukture samog zavarenog spoja, koju prate različita mehanička svojstva karakterističnih zona zavarenog spoja.

Generalno, izabrana tehnologija zavarivanja u smislu izbora elektrode EVB 75 i predgrevanje od 170 °C su značajno poboljšali žilavost materijala, prevashodno u ZUT kao kritičnoj zoni zavarenog spoja, što je automatski značilo i bolja udarna svojstva.

4. Conclusion

From the presented results of measuring the hardness of the welded joint NN-70 according to Vickers, using the HV10 method, a jump in hardness was observed on the line BM-HAZ-WM. The measured hardness of the weld metal ranged from 288 to 294 HV, while for the heat affected zone it ranged from 269 to 277 HV and for the base metal from 252 to 262 HV.

In the case of tensile testing, a low yield strength value of 645 MPa and a tensile strength value of as much as 914 MPa were obtained. Also, the obtained elongation value of 22.4% indicates the tendency of the material towards brittle fracture, which is not in agreement with the large difference between yield strength and tensile strength.

From the above analysis of the impact tests, the conclusion clearly emerges that at 20 °C (BM, WM and HAZ) the results of total energy and propagation energy are the highest, which confirms the already well-known fact that toughness is lower at lower temperature. The location where the V-2 notch is formed, significantly affects the heterogeneity of the structure of the welded joint itself, which is followed by different mechanical properties of the characteristic zones of the welded joint.

In general, the selected welding technology in terms of EVB 75 electrode selection and preheating of 170 °C significantly improved the toughness of the material, primarily in the HAZ as the critical zone of the welded joint, which automatically meant better impact properties.



Primena niskolegiranih celika povišene čvrstoće uz zahteve ekonomične potrošnje energije i sirovina upućuju proizvođače čelika na proizvodnju zavarljivih čelika povišene čvrstoće, a projektante i konstruktore na njihovu primenu u zavarenim konstrukcijama.

Zahvalnica

Ovo istraživanje je podržano od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (Ugovor br. 451-03-47/2023-01/200012).

Literatura/Reference

[1] V. Grabulov (1986) Prilog definisanju uticaja hemijskog sastava i debljine lima na pojavu prskotina u zavarenim spojevima čelika Nionikral-70, magistarski rad, Tehnološko-Metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu.

[2] High-strength low-alloy steels.// Alloying: Understanding the basics / Ohio, (2001) USA: ASM International, Materials Park, 193-202.

[3] Yue By.X, Lippold J.C, Alexandrov B.T, Babu S.S.(2012) Continuous cooling transformation behavior in the CGHAZ of naval steels. Supplement to the Welding Journal; 88: 67-75.

[4] Lippold J.C, Yue By.X. (2013). Evaluation of heat-affected zone hydrogen-induced cracking in navy steels. Welding Journal, 92: 20-28.

[5] A. Radović (1966). Prilog metode za određivanje zavarljivosti niskolegiranih čelika visoke čvrstoće. Vojnotehnički institut, Beograd.

[6] S. Kastelec-Macura (2011). Istraživanje uticaja parametara zavarivanja na strukturu i karakteristike metala šava legure AlMg4.5Mn, doktorska disertacija, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu.

The application of high-strength low-alloy steels along with the requirements of economical consumption of energy and raw materials direct steel manufacturers to the production of high-strength weldable steels, and designers and constructors to their application in welded constructions

Acknowledgement

This research is supported by the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia (Contract No. 451-03-47/2023-01/200012).

[7] A. Sedmak, V. Šijački-Teravčić, A. Milosavljević, V. Đorđević, M. Vukićević. (2000). Prsline u zavarenim spojevima.//Mašinski materijali-drugi deo/ Beograd: Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Str. 31-37.

[8] M. Smiljanić (2006). Weldable fine grain structural steels-welding and weldability. ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE 4; 155-164.

[9] A. Skumavc, A. Smolej, E. Bjelajac, T. Vuherer (2021) Properties and weldability of high-strength low-alloy s1100ql steel. ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE 4; 168-175.

[10] Z. Burzić. (2005) Primena savremenih tehnologija u oblasti ispitivanja metala razaranjem. Metalurgija-Journal of Metallurgy; 11: 126-140.

[11] M. Dobrojević, A. Sedmak, E. Argob, O. Popović. (2003). The analysis of geometry and welded joint heterogeneity effect on Charpy specimen behaviour. Structural Integrity and Life; 3: 73-83.



76. GODIŠNJA SKUPŠTINA MEĐUNARODNOG INSTITUTA ZA ZAVARIVANJE I MEĐUNARODNA KONFERENCIJA O ZAVARIVANJU I SPAJANJU SINGAPUR, 16 – 21. jul 2023.

Ovogodišnja godišnja, 76. po redu Skupština Međunarodnog instituta za zavarivanje (MIZ ili IIW) je održana, rekli bi u "normalnim uslovima". Nakon 2020. i 2021. godine kada su 73. i 74. godišnja skupština održane "na daljinu" zbog pandemije i 75. Skupštine MIZ-a koja je održana u Tokiju kombinovanim (hibridnim: online i fizičko prosustvo) sistemom. Za takav, rekli bi istorijski događaj, Međunarodni institut za zavarivanje nije mogao da izabere bolju destinaciju od Singapura.

Organizator Skupštine, Singapursko društvo za zavarivanje, je u pozivu za Skupštinu napisao: "Sedamdeset šesta godišnja skupština Međunarodnog instituta za zavarivanje (IIW) i međunarodna konferencija o zavarivanju i spajanju biće održani na vodećoj destinaciji Azije za biznis, razonodu i zabavu, u Hotelu i Kongresnom centru Marina Bay Sands, od 16. do 21. Jula 2023. godine. Ovaj događaj ima za cilj da obezbedi platformu za razmenu znanja i umrežavanje među naučnicima, istraživačima i stručnjacima iz industrije u oblasti zavarivanja i spajanja".

Možda je najbolje na početku potencirati da je domaćin u potpunosti uspeo u svim aspektima organizacije i ostvarivanju postavljenih ciljeva. Od same organizacije koja je besprekorno funkcionisala na visokom tehnološkom nivou, komfora i povezanosti smeštaja, restorana, radnih prostorija i parkova za šetnju do preglednosti i sistema informisanja i obaveštavanja. Naravno, tome je doprineo kompleks Marina Bay Sands, koji osim izvanrednih smeštajnih kapaciteta (Hotel Marina Bay Sands – simbol modernog građevinarstva) ima "toplu vezu" sa Kongresnim centrom i ostalom infrastrukturom.

Kao što je najavljeno, godišnja skupština i međunarodna konferencija su održane u periodu od 16. - 21. jula 2023. godine. U radu godišnje skupštine IIW je učestvovalo preko 650 učesnika iz oko 40 zemalja članica IIW u svojstvu delegata, eksperata, posmatrača u radu tehničkih Komisija IIW, radnih grupa, raznih radnih tehničkih tela kao i značajan broj učesnika koji su bili prisutni samo na međunarodnoj konferenciji. Na ovaj broj treba dodati i više od par stotina predstavnika izlagača na izložbi o zavarivanju kao i znčajan broj pratećih osoba. Najbrojnije delegacije, kao i uvek, su bile delegacije Kine, Nemačke, Japana i SAD. Nažalost delegacija iz Srbije se svela na jednog člana. Ilustracije radi, iz regiona je bilo još po dva predstavnika iz Slovenije i Rumunije i četiri iz Grčke. Ipak, slika masovnog skupa posvećenog zavarivanju sa učesnicima iz čitavog sveta, nakon tri godine, ponovo je obišla svet.

Kako je uobičajeno, na ceremoniji otvaranja koja je održana 16. jula, pored pozdravnih govora i informacija vezanih za dobrodošlicu, najupečatljiviji je bio deo koji se tiče dodele godišnjih priznanja IIW. Jedno do njih je i priznanje IIW za regionalnu aktivnost, priznanje koje nosi ime po Chris Smallbone-u, a dodeljuje se za poseban doprinos pojedincu na povezivanju zemalja regiona i šire u oblasti unapređenja zavarivanja. Sponzori ovog priznanja su zavarivačke asocijacije iz Bugarske, Rumunije i Srbije. Ove godine to priznanje je pripalo dr Solomonu Edebiri-u iz Nigerije, predsedniku Nigerijskog instituta za zavarivanje (2006–2022.) i članu IIW Borda za tehnička pitanja (2013–2015.). Kako stoji u obrazloženju, dr Edebiri je predsedavao komitetu koji je uspostavio plan razvoja zavarivanja i srodnih tehnologija u regionu koji obuhvata Nigeriju, Ganu, Sao Tome i Principe, Ekvatorijalnu Gvineju, Kamerun, Ugandu i Siera Leone. Priznanje "Chris Smallbone" je u ime IIW-a dr Solomonu Edebiri-ju uručio dr Vencislav Grabulov, član Borda diektora IIW i predstavnik Srbije.



Dr Solomon Edebiri prima "Chris Smallbone Award"



AKTIVNOSTI IIW RADNIH JEDINICA

Skupština IIW

Redovna generalna skupština IIW je održana 16. jula u prisustvu predstavnika oko 40 delegacija, dok su četiri članice IIW ovlastile drugog člana IIW da ih zastupa na skupštini. Na skupštinskoj sednici su usvojeni izveštaji o radu svih tela IIW-a, donete rezolucije o daljim aktivnostima, usvojen finansijski izveštaj i plan budžeta za sledeću godinu.

Među najznčajnijim odlukama je to što je usvojena strategija razvoja IIW za period 2023–2028. godine. Pri tome se uzelo u razmatranje da je završetak strategije koja je bila usvojena 2018. godine, bio pogođen globalnom pandemijom i nekim unutrašnjim izazovima (promena sekretarijata IIW). Ipak, zaključak je da je postignut napredak u oblastima: IIW organizaciona struktura, Industrijska relevantnost IIW-a, unapređenje IIW sistema obrazovanja, kvalifikacija i sertifikacije i poboljšanje IIW vidljivosti i uticaja kroz komunikaciju i marketing. Novom strategijom su obuhvaćeni ciljevi koje je postavila svaka IIW Grupa, pre svega IAB i TMB.

Kadrovska problematika:

S obzirom da vršiocu dužnosti predsednika Međunarodnog instituta, gospodinu Sorin Keller-u, završava mandat za budućeg predsednika IIW je izabran dr Thomas Bollinghaus iz Nemačke. Pored toga mandat je istekao i potpredsedniku IIW, blagajniku, predsedniku tehničkog komiteta IIW, predsedniku IAB grupe kao i četvorici članova Borda direktora, među njima i dr Vencislavu Grabulovu. Na sednici generalne skupštine našem delegatu dr Vencislav Grabulovu je dodeljena plaketa “za značajan doprinos u radu i razvoju Borda Direktora IIW”.



Priznanje–plaketu Dr Vencislavu Grabulovu su uručii novoizabrani i dosadašnji Predsednik IIW Thoms Bollinghaus i Sorin Keller

Izabrani su novi potpredsednik, blagajnik i četiri člana Borda Direktora IIW, kao što je potvrđeno i imenovanje novih predsednika Tehničkog komiteta i IAB grupe. Usvojen je kalendar budućih aktivnosti i regionalnih Kongresa IIW i potvrđeno da će organizatori narednih skupština biti: Rodos - Grčka 2024. i Denova – Italija 2025.godine.

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 17. do 20. 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 "Napredak u zavarivanju, spajanju i aditivnoj proizvodnji" održana je 20. i 21. jula. Na tri plenarne i sedam usmenih sesija prezentovano je preko 80 radova, dok je putem postera predstavljeno još 40 radova.



IZLOŽBA ZAVARIVANJA

Sponzori 76. Skupštine IIW su iskoristili mogućnost da predstave svoje proizvode na izložbi koja je organizovana u okviru Kongresnog centra.

AKTIVNOSTI DELEGACIJE SRBIJE

Na 76. 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 predstavnici člana IIW, Zavoda za zavarivanje iz Beograda, 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. Dr Grabulov je učestvovao u radu Skupštine IIW, ali kao član radnog predsedništva, odnosno član Borda direktora IIW. Kao član Borda Direktora, u skladu sa Statutom IIW, nije imao mogućnost da istovremeno bude i delegat Srbije na Skupštini.

Pored učešća u radu na samoj sednici Skupštine, najznačajnija aktivnost je bila učešće u radu IAB Grupe A (održana 17.07.2023.), IAB Grupe B (18.07.2023.) i predstavnika članica IAB grupe (19.07.2023.). Na ovim sednicama su razmatrane izmene i dopune dokumenata za realizaciju kurseva za obrazovanje kadrova u zavarivanju kao i primena istih. Potvrđeno je da će poseta tima ocenjivača radi reocenjivanja ANB-a i ANBCC-a za Srbiju obaviti tokom 2024.godine. Određen je i vodeći ocenjivač, g-din Horia Dascau (Rumunija). Sastanak radne grupe za regionalnu saradnju održan je 20. jula. Sastanak Komisija za obrazovanje na kome je prisustvovao i naš predstavnik je održan 20.jula.

Dr Vencislav Grabulov je imao više bilateralnih susreta, kao na primer sa predsednikom IIW-a u prošlom mandatu g-dinom Douglas Lucian-om, vršiocem dužnosti predsednika IIW u tekućem mandate, g-nom Sorin Kellerom, predstavnicima Evropske zavarivačke federacije, predsednikom grupe A, g-dinom Horia Dascau-om, grupe B Stefano Morra-om kao i sa izvršnim direktorom IIW-a Dr Luca Costa. Naravno, sastanci sa predstavnicima delegacija iz regiona su bili malobrojni, s obzirom da većina članica IIW nisu imali predstavnike. Održani su sastanci sa predstavnicima Rumunije, Slovenije i Grčke. Dr Vencislavu Grabulovu je tokom ove godišnje Skupštine isticao mandat u Bordu Direktora IIW. Po funkciji je imao niz obaveza kao što su razgovori sa eksponiranim članovima IIW, najviše u polju regionalne saradnje, lokalnim zvaničnicima koji su u vezi sa mašinskim tehnologijama i slično. Pored priznanja za doprinos u radu IIW kao član Borda direktora, dobio je i značku za preko 20 učešća na Skupštinama IIW.

Završni sastanak Borda direktora u ovom sastavu je održan 21. Jula. Primopredaju zaduženja dr Vencislav Grabulov je iskoristio da se zahvali svim saradnicima iz vrhovnog rukovodstva IIW i radnih grupa IIW, kao i odlazećim članovima Borda direktora na podršci i razumevanju koju su mu pružali, a novoimenovanim rukovodiocima da poželi uspešan rad.



Članovi tekućeg i novog Borda direktora, predsednik IIW i Izvršni direktor IIW

Na kraju se 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 praćenje 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 definitivno zavisi i od brojnosti naše delegacije koja prisustvuje u radu stručnih tela.

Dr Vencislav Grabulov dipl.ing.IWE/EWE



Detalj sa otvaranja



Detalj sa gala večere



Na večeri za članove Borda Direktora: izabrani predsednik IIW – Thomas Bollinhaus, CEO IIW Luca Costa, predsednik IIW Sorin Keller i predsednik u prošlom mandatu Douglas Luciani sa V.Grabulovim



Članovi sekretarijata IIW na čelu sa direktorom IIW dr Luca Costa i V. Grabulov



Radno predsedništvo- bord direktora na Skupštini IIW



Članovi Borda direktora sa Plaketama



Konferencija JOINTRANS 2024

Mađarsko udruženje za tehnologiju zavarivanja i ispitivanje materijala (MHtE) i SLV Halle GmbH zajednički organizuju JoinTrans konferenciju. Konferencija će se održati u Budimpešti od 8 - 9. maja 2024, kako je prvobitno planirano i okupiće stručnjake iz oblasti zavarivanja i projektovanja železničkih vozila. Dodatne informacije o konferenciji mogu se naći na veb stranici konferencije: <https://vvv.slv-halle.de/veranstaltungen/tagungen/>

6. Međunarodni kongres (IC-2024) - Napredak ka održivom i zelenom zavarivanju

Međunarodni kongres "Napredak ka održivom i zelenom zavarivanju", održava se od 22-24. Januara 2024 u Bancaloreu u Indiji. Tema „Napredak ka održivom i zelenom zavarivanju“ je izuzetno aktuelna potreba. Iako je tehnologija zavarivanja pretrpela fenomenalnu promenu tokom poslednjih pet decenija, atmosfera ili naše okruženje su i dalje pod velikim rizikom kroz aktivnosti zavarivanja, uključujući globalno zagrevanje. Za prevazilaženje takve situacije potrebno je "Zeleno zavarivanje", odnosno proces sa manje opasnih isparenja i gasova. Ovaj kongres će pružiti dinamičan forum za profesionalce iz industrije, akademske zajednice i istraživačkih instituta. Kongres se održava u Međunarodnom izložbenom centru u Bangaloru (BIEC) koji je najveća i najsofisticiranija destinacija u Indiji za izložbe, sastanke i događaje. Rasprostranjen po bujnoj prirodi od 57 hektara, BIEC ima 77.200 kvadratnih metara vrhunskog izložbenog prostora i 5.600 kvadratnih metara najsavremenijih konferencijskih objekata za do 15.000 osoba. Više informacija na linku: <https://ic2024india.com/>

Međunarodno takmičenje u zavarivanju 2023. - Arc Cup

Takmičenje u razvoju veština i tehnoloških inovacija BRICS-a - Međunarodno takmičenje u zavarivanju Arc Cup (u daljem tekstu: Takmičenje u zavarivanju u Arc Cup-u) biće održano u novembru 2023. godine, sa ciljem da se uspostavi međunarodna platforma za razmenu iskustava profesionalaca u razvoju veština i tehnoloških inovacija u zavarivanju, promovišući razvoj veština zavarivanja i tehničku razmenu u cilju povećanja niva tehničkih veština zavarivanja. Više informacija na web sajtu <https://www.awf-online.org/index.php/free-extensions/event-awf>

18. Međunarodni simpozijum o cevnim konstrukcijama (ISTS18)

Nakon uspeha na prethodnih 17 konferencija održanih širom sveta, predstojeći 18. Međunarodni simpozijum o cevnim konstrukcijama (ISTS 18) biće održan u Peking, Kina, od 17. do 20. oktobra 2023. Namera konferencije je da obezbedi forum za diskusiju o dosadašnjim uspesima i napredku u istraživanju, projektovanju i primeni cevni konstrukcija. Simpozijum će biti od interesa za istraživače, akademsku zajednicu, proizvođače šupljih profila ili relevantnih građevinskih proizvoda, arhitekta, trgovinska udruženja, inženjere za projektovanje, proizvođače čelika, vlasnike ili programere cevni konstrukcija i postdiplomske studente. Više informacija može se naći na sledećem linku: <http://www.ists18.civil.tsinghua.edu.cn/>



Stjepan Kožuh¹, Mirko Gojić^{1,a}, Ivana Ivanić¹, Aleš Nagode², Kristijan Jerković³

ZAVARIVANJE CIJEVI IZ NISKOUGLJENIČNOG ČELIKA TIG POSTUPKOM

WELDING OF PIPES FROM LOW-CARBON STEEL BY TIG PROCEDURE

Stručni rad / Professional paper

Rad primljen / Paper received:

Avgust 2022.

Rad prihvaćen / Paper accepted:

Maj 2023.

Adresa autora / Author's address:

¹ Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Aleja narodnih heroja 3, 44000 Sisak, Republika Hrvatska

² Univerza v Ljubljani Naravoslovnotehniška fakulteta, Aškerčeva 12, 1000 Ljubljana, Republika Slovenija

³ Termoelektrana Toplana, TE - TO ZAGREB, HEP - Proizvodnja, Kuševačka 10A, 10000 Zagreb, Republika Hrvatska

email: ^a gojic@simet.unizg.hr

Ključne reči: zavarivanje, niskougljenični čelik, mikrostruktura, tvrdoća

Keywords: welding, low-carbon steel, microstructure, hardness

Rezime

U ovom radu prikazani su rezultati zavarivanja cijevi iz niskougljičnog čelika St 35.8 (Č.1214, DIN17175, W. Nr. 1.0305, EN-P235GH) TIG postupkom. Nakon zavarivanja provedena je analiza mikrostrukture pomoću optičkog mikroskopa. Mikrostrukturna analiza je provedena na osnovnom materijalu, zoni utjecaja topline i zoni taljenja. Utvrđeno je da osnovni materijal ima feritno-perlitnu mikrostrukturu s tvrdoćom 148,3 HV10, dok je u zoni utjecaja topline prisutna također feritno-perlitna mikrostruktura s mjestimično prisutnim Widmanstattenovim feritom i tvrdoćom 176,0 HV10. U zoni taljenja zamijećena je lijevana mikrostruktura koja se sastoji od ferita i bainita s tvrdoćom (228,7 HV10).

Abstract

In this work the results of welding the pipes from low-carbon steel St 35.8 (Č.1214, DIN17175, W.Nr. 1.0305, EN-P235GH) by TIG procedure were shown. After welding, the microstructure analysis by means of optical microscope was performed. Microstructural analysis out on the base material, heat affected zone and melting zone was carried. It was found that the base material has ferrite-pearlite microstructure with hardness 148 HV10, while in the heat affected zone is present ferrite-pearlite microstructure with Widmanstatten ferrite in some places with hardness 176 HV10. A cast microstructure consisting of ferrite and bainite was observed in the melting zone with hardness 228.7 HV10.

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



1. Uvod

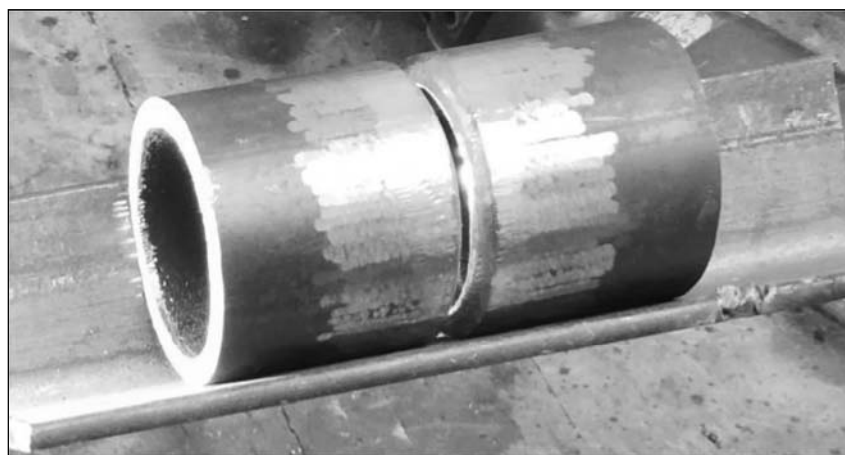
Zavarivanje je najčešća i gotovo univerzalna tehnologija spajanja istorodnih i/ili raznorodnih materijala taljenjem ili pritiskom, sa ili bez dodatnog materijala [1-3]. Cilj zavarivanja je dobijanje homogenog zavarenog spoja koji se može narušiti greškama (pukotine, uključci, poroznost itd.). Najvažniji uvjeti za zavarljivost čelika su: povoljan kemijski sastav (uz što manji sadržaj ugljika), dobra žilavost osnovnog materijala, itd. [4].

Greške u zavarenom spoju su uvijek moguće, s obzirom na veliki broj utjecajnih faktora [2]. Brojni su postupci zavarivanja, od kojih se često koristi i postupak zavarivanja netaljivom elektrodom (TIG-postupak) [4-5]. To je elektrolučni postupak zavarivanja u zaštitnoj atmosferi inertnih plinova (argon, helij) ili smjesi plinova. Ovim se postupkom mogu, osim čelika, zavarivati i obojeni metali bilo ručno, poluautomatski ili automatski. Postupak je pogodan za zavarivanje tankih limova (do debljine 6 mm). Zavarivanje TIG postupkom se često koristi u automobilskoj industriji, konstrukcijama, posebno je povoljan za korijenske zavare cijevi itd. Osnovne prednosti TIG postupka su: uska zona utjecaja topline, minimalno rasprskavanje, nastaje minimalna količina troske i štetnih plinova, mogućnost zavarivanja u svim položajima, pogodnost za reparaturna zavarivanja, estetski izgled zavarenog spoja itd. Osnovni nedostaci TIG

postupka su: mala brzina zavarivanja, mali depozit dodatnog materijala, relativno visoka cijena opreme i zaštitnih plinova, otežanost izvođenja zavarivanja na otvorenim prostorima, itd. Najvažniji element, sa stajališta zavarljivosti kod ugljičnih konstrukcijskih čelika je ugljik, čiji sadržaj je najčešće od 0,1 do 0,6 mas. %. Ugljični čelici sa sadržajem ugljika ispod 0,20 mas. % tj. $C_E \leq 0,45$ i debljinom materijala ispod 25 mm ne zahtijevaju predgrijavanje [1]. U okviru ovog rada prikazani su rezultati zavarivanja cijevi od niskougljičnog čelika, te je provedena mikrostrukturalna karakterizacija i mjerenje tvrdoće, počevši od osnovnog materijala, preko zone utjecaja topline do zone taljenja.

2. Eksperiment

Zavareni spoj je pripremljen u obliku V-spoja uz otklanjanje nečistoća i produkata oksidacije brušenjem. Kao osnovni materijal korištena je valjana cijev (slika 1) vanjskog promjera 45 mm uz debljinu stijenke 4 mm iz niskougljičnog čelika kemijskog sastava: do 0,17 % C; 0,10-0,35 % Si; do 0,40 % Mn; 0,05 % Pmax; 0,05 % S max (mas. %). Zavareni spoj je postignut u tri prolaza. Kao dodatni materijal za zavarivanje cijevi (korijen, popuna i završni sloj) korištena je žica oznake AWS A5.28 ER70S-A1 kemijskog sastava: 0,12 % C, 1,3 % Mn, 0,025 % P, 0,025 % S, 0,3-0,7 % Si (mas. %).



Slika 1. Fotografski snimak pripremljenog osnovnog materijala (cijevi) za zavarivanje

Figure 1. Photography of the prepared base material (pipe) for welding

Uzorci za metalografsku analizu i mjerenje tvrdoće zavarenog spoja izrezani su na uređaju Isomet Buehler. Brušenje i poliranje, tj. metalografska priprema uzoraka provedena je strojno na uređaju Phoenix Beta Buehler. Za brušenje je korišten brusni papir (SiC) gradacije 120, 240, 400 i 600 uz konstantno hlađenje vodom. Brzina brušenja uzorka je bila 150 o/min., pod

tlačnom silom od 30 N. Vrijeme brušenja je iznosilo 5 minuta za svaku gradaciju papira. Poliranje se provodilo na posebnoj podlozi od "filca" uz dodatak vodene otopine glinice ($0,3 \mu\text{m Al}_2\text{O}_3$). Vrijeme poliranja uzorka nakon brušenja je iznosilo oko 10 minuta. Poslije poliranja uzorak je nagrižen otopinom nitala (otopina azotne kiseline u alkoholu) u trajanju od 2 sekunde. Za metalografsku analizu

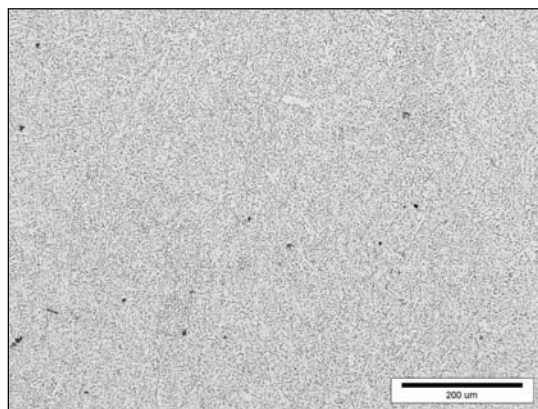


korišten je optički mikroskop Olympus BX 61 s mogućnošću povećanja od 50 puta do 1000 puta, koji je opremljen integriranom kamerom i povezan s računalom. Tvrdća uzoraka ispitivana je Vickersovom metodom (HV10).

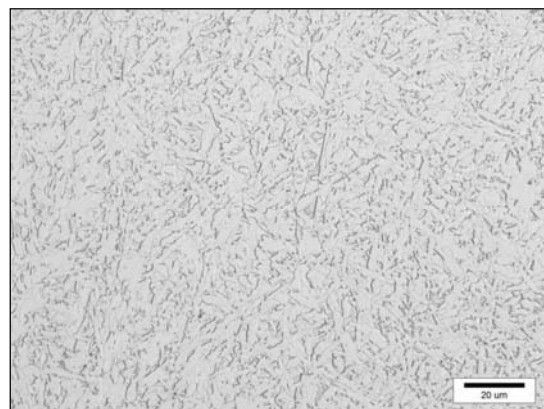
3. Rezultati i diskusija

Na slikama 2-4 prikazane su optičke mikrografije osnovnog materijala, zone taljenja i zone utjecaja topline pri različitim povećanjima (200 -1000 puta) i pri različitim pozicijama [6]. Analizom dobivenih mikrografija može se uočiti feritno-perlitna mikrostruktura osnovnog materijala sa zrnima izduženim u smjeru valjanja (slika 2). Budući da istraživani čelik pripada skupini podeutektoidnih niskougličnih nelegiranih čelika u mikrostrukturi je zamijećen znatno veći udio ferita nego perlita. Tijekom hlađenja čelika najvažnije reakcije se odnose na raspad iz austenitnog područja kod različitim brzina hlađenja. Sporo hlađenje

podeutektoidnog čelika karakterizira da na temperaturi iznad 800 °C čelik ima austenitnu mikrostrukturu. Na temperaturi iznad 723 °C mikrostruktura istog čelika se sastoji od ferita i austenita. Međutim, na temperaturi ispod 723 °C austenit se pretvara u perlit, pa se mikrostruktura sastoji od ferita i perlita. Pritom perlit predstavlja eutektoidnu mješavinu ferita i cementita. Lamelarna struktura perlita sastoji se od bijele feritne osnove ili matrice (koja čini većinu eutektoidne mješavine) i tankih pločica cementita. Zona utjecaja topline (slika 4) pokazuje također feritno-perlitnu mikrostrukturu s mjestimično prisutnim Widmanstattenovim feritom po granicama primarnih austenitnih zrna. U zoni utjecaja topline nije zamijećena značajna promjena (porast) veličine zrna. Nasuprot tome, u zoni taljenja zamijećena je lijevana mikrostruktura koja se sastoji od ferita i bainita (slika 3).

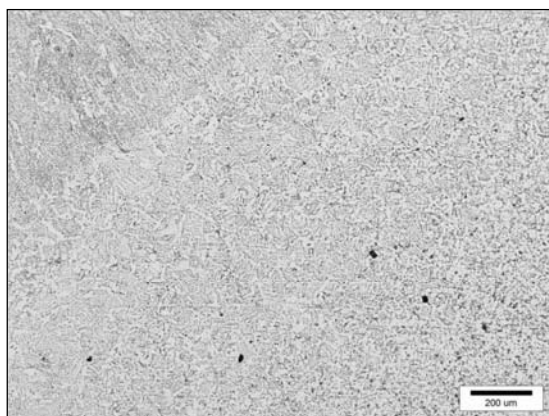


(a)

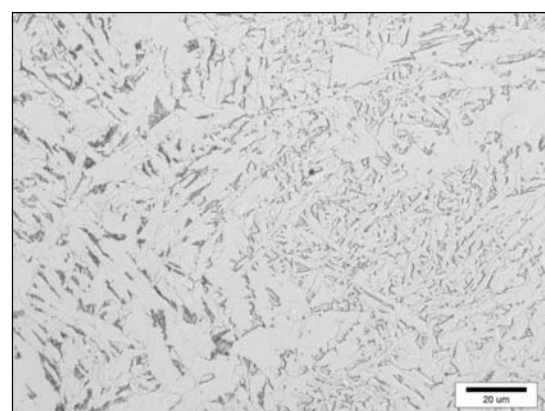


(b)

Slika 3. Optičke mikrografije zone taljenja pri različitim povećanjima a) povećanje 200 puta, b) povećanje 1000 puta
Figure 3. Optical micrographs of the melting zone at different magnifications a) magnification 200 times, b) magnification 1000 times



(a)



(b)

Slika 4. Optičke mikrografije zone utjecaja topline pri različitim povećanjima a) povećanje 200 puta, b) povećanje 1000 puta
Figure 4. Optical micrographs of the heat-affected zone at different magnifications a) magnification 200 times, b) magnification 1000 times



U tabeli 1 prikazane su srednje vrijednosti mjerenja tvrdoće. Tvrdoća je izmjerena na tri dijela zavarenog spoja: na osnovnom materijalu, zoni taljenja i zoni utjecaja topline. Analizom dobivenih rezultata može se uočiti najmanja vrijednost tvrdoće kod osnovnog materijala (148 HV10). Zona taljenja je pokazala najveće vrijednosti tvrdoće (229 HV10), dok je tvrdoća zone utjecaja topline između vrijednosti tvrdoće osnovnog materijala i zone

taljenja te je iznosila 176 HV10. Može se zaključiti da je do porasta tvrdoće u zoni utjecaja topline došlo zbog unosa topline uslijed zavarivanja. Budući je tijekom zavarivanja zona taljenja bila u rastaljenom stanju te je tijekom hlađenja došlo do njenog skrućivanja i nastanka lijevane mikrostrukture (ferit i bainit) bilo je za očekivati da će ona imati i najveću tvrdoću.

Tabela 1. Srednje vrijednosti rezultata mjerenja tvrdoće [6]

Table 1. Mean values of hardness measurement results [6]

Dio zavarenog spoja	Srednja vrijednost tvrdoće, HV10
Osnovni materijal (OM)	148
Zona utjecaja topline (ZUT)	229
Zona taljenja (ZT)	176

4. Zaključak

Na temelju provedene analize mikrostrukture i tvrdoće zavarene cijevi iz niskougličnog čelika St 35.8 (Č.1214, DIN17175, W. Nr. 1.0305, EN-P235GH) može se zaključiti sljedeće:

1. Optičke mikrografije ukazuju na feritno-perlitnu mikrostrukturu osnovnog materijala.
2. Feritno-perlitna mikrostruktura s mjestimično prisutnim Widmanstattenovim feritom po granicama primarnih austenitnih zrna uočena je i u zoni utjecaja topline.
3. Zonu taljenja karakterizira lijevana mikrostrukturu koja se sastoji od ferita i bainita.
4. Zona taljenja je pokazala najveće vrijednosti tvrdoće (229 HV10), dok je tvrdoća zone utjecaja topline između vrijednosti tvrdoće osnovnog materijala (148 HV10) i zone taljenja te je iznosila 176 HV10.

Literatura / References

- [1] Gojić, M. (2003), Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Sisak.
- [2] Lancaster, J. F. (1980), Metallurgy of welding, George Allen & Unwin, London.
- [3] Gil, O. (2016), Welding engineering, Research World, New York.

4. Conclusion

Based on the microstructure and hardness analysis of the welded pipe made of low carbon steel St 35.8 (Č.1214, DIN17175, W. Nr. 1.0305, EN-P235GH), the following can be concluded:

1. Optical micrographs indicate the ferrite-pearlite microstructure of the base material.
2. Ferrite-pearlite microstructure, with locally present Widmanstatten ferrite at boundaries of the primary austenite grains was observed also in the heat-affected zone.
3. The melting zone is characterized by a cast microstructure consisting of ferrite and bainite.
4. The melting zone showed the highest hardness values (229 HV10), while the hardness of the heat affected zone between the hardness value of the base material (148 HV10) and melting zone and was 176 HV10.

[4] Horvat, M., Kondić, V., Brezovečki, D. (2014), Teorijske i praktične osnove TIG postupka zavarivanja, Tehnički glasnik, 8, 4, 426-432.

[5] Samardžić, I., Bogovac, D., Jorgić, T., Kovačić, K. (2015), Primjena TIG postupka zavarivanja u spajanju pozicija, Tehnički glasnik, 9, 2, 202-208.

[6] Jerković, K. (2021), Mikrostruktura i tvrdoća zavarenog niskougličnog čelika, završni rad, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Sisak.



Namik Džibrčić^{1,a}, Sead Avdić¹, Resul Hamzić¹

SANACIJA PUKOTINE NA NOSIVOM PRSTENU ROTACIONE PEĆI CEMENTARE KAKANJ

CRACK REPAIR ON THE BEARING RING OF THE ROTARY KILN OF THE KAKANJ CEMENT PLANT

Stručni rad / Professional paper

Rad primljen / Paper received:

Septembar 2022.

Rad prihvaćen / Paper accepted:

April 2023.

Adresa autora / Author's address:

¹Institut za zavarivanje d.o.o. Tuzla, Bosne Srebrene br.6,
75000 Tuzla, BiH

email: ^a : namik.dzibric@izz-bh.ba

Ključne reči: sanacija, pukotina, cementara, rotaciona peć, nosivi prsten.

Keywords: repair, crack, cement factory, kiln, bearing ring.

Rezime

U ovom radu je izložena problematika osiguranja integriteta konstrukcije - rotacione peći za proizvodnju cementa, nakon katastrofalnog otkazivanja integriteta uslijed zamornog loma nosivog prstena. Zbog nemogućnosti nastavka proizvodnje, a predugo potrebnog vremena za zamjenu nosivog prstena novim, jedino moguće rješenje je reparaturno zavarivanje. Ukupno 26 dana (24/7) bez prestanka se radilo, u svim vremenskim uslovima od +25°C do -15°C, suncu, kiši, snijegu, ledu i vjetru. Potrebno je bilo preko 550 kg dodatnog materijala (elektrode i žice) da bi se sanirala pukotina u nosivom prstenu dimenzija Ø5400x900x370 mm koji je izrađen od čelika 100CrMn6 kao odlivak i starosti od preko 40 godina. Posebna pažnja se posvetila unosu toplote, temperaturi predgrijavanja i međuslojnoj temperaturi, kako bi se spriječile dodatne deformacije i zaostali naponi. Poslije mjesec dana intenzivnog rada, rotaciona peć je puštena ponovo u pogon, tako da je Tvornica Cementa d.d. Kakanj ponovo mogla da odgovori potražnji tržišta za klinkerom i cementom za građevinsku sezonu.

Abstract

This paper presents the issue of ensuring the integrity of structure - rotary kiln, after a catastrophic failure of integrity due to fatigue fracture of the bearing ring. Due to the impossibility of continuing production and the time required to replace the bearing ring with a new one, the only possible solution was repair welding. A total of 26 days (24/7) were worked non-stop in all weather conditions from + 25 ° C to -15 ° C, sun, rain, snow, ice and wind. It took over 550kg filler material (electrodes and wires) to repair the crack in the bearing ring in dimensions of Ø5400x900x370 made of casted steel 100CrMn6 over 40 years old. Special attention was paid to heat input, preheating temperature, interlayer temperature to prevent additional deformations and avoid remaining stresses after welding. After a month of intensive work, the rotary kiln was put back into operation condition, so that the Cement Factory d.d. Kakanj can again respond to the market requests for clinker and cement for the upcoming construction season.

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



1. Uvod

Rotaciona peć predstavlja ključno postrojenje za proizvodnju cementa. Od prve rotacione peći izumljene krajem 18-tog stoljeća pa sve do danas spadaju u kategoriju najvećih i najtežih okretnih industrijskih postrojenja. Ukupna proizvodnja cementa zavisi od kapaciteta i učinka rotacione peći, te je od vitalnog značaja kontinuiran rad sa što manje neplanskih zastoja, jer direktno utiče na proizvodnju klinkera/cementa. Temeljito pravilno održavanje i kontrola ključnih elemenata rotacione peći mora biti u redovnim intervalima vršeno kako bi se obezbijedio integritet i funkcionalnost postrojenja. Nemogućnost redovnog održavanja i pregleda vitalnih dijelova rotacione peći zbog ogromne konstantne potražnje tržišta, za posljedicu je imalo otkazivanje nosivog rotacionog prstena peći te momentalnog zaustavljanja rada rotacione peći.

Nabavka novog nosivog rotacionog prstena i zamjena iziskuju mnogo vremena i sredstava te se zbog nedostatka istih pristupilo jedinom mogućem rješenju – reparaturno zavarivanje na licu mjesta. Reparaturno zavarivanje u idealnim uslovima – radioničkim uslovima nakon demontaže predstavlja

izuzetno kompleksan poduhvat, ali u ovom slučaju reparatura je zbog svih okolnosti morala biti izvršena na licu mjesta (visina, zimsko godišnje doba, izuzetno mali prostor za rad) te se morala posvetiti maksimalna pažnja i dosljednost u svakoj fazi sanacije kako bi reparatura bila uspješna i obezbijedio ponovo integritet postrojenja.

2. Eksperiment - definisanje problema

Rotaciona peć cementa je cilindrična peć za kontinuirane procese proizvodnje u procesnom inženjerstvu, koja se tokom normalnog rada neprekidno rotira oko sopstvene ose brzinom od oko 2 rpm. U kombinaciji s blagim nagibom ose rotacije, rotacijski pokret osigurava transport materijala od ulaza do izlaza peći. Od trenutka izuma 1857 godine, pa sve do danas, proizvodnja klinkera u rotacionoj peći predstavlja tehnologiju za proizvodnju najkvalitetnijeg klinkera. Rotaciona peć minimalno se sastoji od: plašta rotacione peći; vatrostalne opeke; prstena i valjaka peći; pogona peći i plamenika [1]

Rotaciona peć u Tvornici Cementa d.d. Kakanj po kapacitetu i gabaritima spada u klasu većih rotacionih peći (l=70m, Ø4500mm, 100T/h) i izgled peći prikazan je na slici 1.



Slika 1. Rotaciona peć – Tvornica cementa d.d. Kakanj

Figure 1. Rotary kiln - Tvornica cementa d.d. Kakanj

Peći novijih generacija imaju i druge elemente koji pospješuju proces proizvodnje klinkera. Nosivi prsteni rotacionih peći nose težinu peći sa materijalom te je od krucijelne važnosti održavanje i ispravnost istih. Nosivi prsteni se izrađuju raznim tehnologijama, dok je u konkretnom slučaju prsten proizveden tehnologijom livenja, od materijala 100CrMn6. Rotaciona peć sa svim elementima je u eksploataciji preko 40 godina, te su na svim elementima rotacione peći vidljivi tragovi eksploatacije. Nosivi prsteni se oslanjaju na valjke koji služe kao oslonci. Broj prstenova sa pripadajućim parom valjaka direktno ovisi od dužine

rotacione peći, te se taj broj u zavisnosti od dužine peći kreće od 0 do 8 nosivih prstenova. Nosivi prsteni su u toku rada ciklično opterećeni na pritisak i istezanje u zavisnosti od položaja prilikom rotacije peći i oslanjanja na valjke. Uslijed ogromnih cikličnih opterećenja prilikom rotacije peći, uobičajena su oštećenja kontaktnih površina te se blagovremenim manjim intervencijama mogu spriječiti havarije većih razmjera [1]. U konkretnom slučaju, u Tvornici Cementa d.d. Kakanj desio se najgori scenario, u toku rada došlo je do loma nosivog prstena.



Slika 2. Prslina na nosivom prstenu

Figure 2. A crack on the bearing ring

Lom nosivog prstena je ustanovljen momentalno (lom praćen praskom i bukom) te je prema radnom uputstvu zaustavljen rad rotacione peći uz prethodno pražnjenje kompletnog sadržaja (sirovine i klinker) kako bi se rasteretila peć. Detaljnim pregledom ustanovljeno je da je lom zahvatio kompletan poprečni presjek, te je bilo nemoguće nastaviti normalan rad zbog opasnosti havarije većih razmjera. Na slici 2. prikazan je izgled prslina na nosivom prstenu peći.

S obzirom da je vrijeme čekanja na isporuku novog nosivog prstena i zamjene havarisanog sa novim prstenom do 12 mjeseci, reparaturno zavarivanje se nametnulo kao jedino moguće rješenje.

Reparature ovakvih razmjera, elemenata koji su u eksploataciji preko 40 godinama sa ogromnim opterećenjima, predstavljaju izuzetno kompleksnu oblast, gdje se svi bitni faktori moraju uzeti u obzir prilikom određivanja tehnologije sanacije. U toku sanacije bio je potreban konstantan nadzor kako bi

se pridržavalo maksimalno propisanoj tehnologiji. Prostora za greške u bilo kojem segmentu reparature nije bilo, sa obzirom da svaki dan zastoja rotacione peći predstavlja ogromni finansijski gubitak za preduzeće. Dimenzije nosivog prstena su $\text{Ø}5500 \times 900 \times 370$ te je prema proračunima ustanovljeno da će biti potrebno oko 250kg dodatnog materijala kako bi se reparirao prsten. Period sanacije, lokacija i vremenski uslovi nisu išli u prilog reparaturi. Početak radova je bio 20.12.2021. na improvizovanoj skeli, na visini od 15 metara, u zimskom periodu u najgorim uslovima 24/7.

2.1. Tehnologija reparaturnog zavarivanja i priprema šava za zavarivanje

Reparature ovakvih razmjera iziskuju temeljitu analizu materijala prstena, te je uvidom u dokumentaciju ustanovljeno da se radi o odlivku 100CrMn6, koji je bio preko 40 godina u eksploataciji. Hemijski sastav čelika 100CrMn6 prikazan je u Tabeli 1.

Tabela 1. Hemijski sastav čelika 100CrMn6 prema DIN 17230 sadašnji 100Cr6 prema EN ISO 683-17 u (mas. %)

Table 1. Chemical composition of steel 100CrMn6 according to DIN 17230 current 100Cr6 according to EN ISO 683-17 in (mass. %)

ELEMENT	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Fe [%]
SADRŽAJ	0,95-1,05	0,40-0,70	0,95-1,25	0,030	0,030	1,35-1,60	ostatak

Za reparature na ovkavim elementima, odličnim se pokazao dodatni materijali na bazi Ni bez kojih su ozbiljne reparature postale nezamislive.

Korištena je elektroda Xuper NucleoTec 2222 ($\text{Ø}3,2/4,0$ mm) i žica EnDOtec® DO*622 S ($\text{Ø}1,6$ mm) proizvođača Castolin. Nakon odabira lokalnog

izvođača radova, pristupilo se pripremi mjesta rada i početku reparature.

Nosivi prsten je ukrućen sa obje bočne strane sa po 2 ukrute dimenzija $800 \times 200 \times 65$ od čelika P355GH, te je peć rotirana kako bi zona reparature bila u normalnom položaju.



Mjesto rada je obezbijeđeno, postavljeni su termoelementi i pristupilo se predgrijavanju na temperaturu od 150°C (Slika 3a). Kada je ispunjen uslov temperature predgrijavanja, pristupilo se

žlijebljenju zone reparature (Slika 3b). Strogo se vodilo računa da se tokom cijelog postupka žlijebljenja i zavarivanja ne odstupa od 150°C +/- 20°C [2].



a)



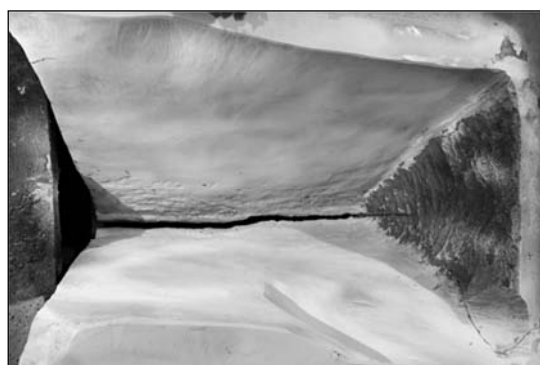
b)

Slika 3. Predgrijavanje a) i početak žlijebljenja b)

Figure 3. Preheating a) and start of grooving b)

Tehnologijom je određeno da pripremljen šav bude u obliku slova U, koliko god je moguće. Poslije žlijebljenja pristupljeno je brušenju površina šava do metalnog sjaja, kako bi se uklonio zakaljen

materijal i ostale nesavršenosti u osnovnom materijalu. Odrađeno je ispitivanje penetrantima kako bi se uočile eventualne nesavršenosti zaostale u šavu, Slika 4.



Slika 4. Ispitivanje penetrantima i pripremljeno ½ šava

Figure 4. Penetrant testing and prepared ½ seam

Izuzetno teško je pripremiti adekvatno površinu šava, da se dovede do metalnog sjaja, s obzirom da se radilo o odlivku koji je bio u eksploataciji preko 40 godina. Uočeno je mnogo poroznosti, uključaka i novih manjih pukotina. Nesavršenosti ustanovljene ispitivanjem penetrantima iziskivale su dodatno žlijebljenje/brušenje. Onog trenutka kada je potpuno pripremljen šav, ustanovile su se prave razmjere reparature te se povećao obim radova od predviđenog utroška od 250 kg dodatnog materijala na oko 500 kg dodatnog materijala. Veličina šava ilustrivna je na Slici 5.



Slika 5. Razmjere šava

Figure 5. Dimensions of the seam

2.2. Zavarivanje

Sam tok zavarivanja odvijao se u nekoliko faza sa kombinacijom dva postupka zavarivanja. Donja zona šava (1/3) zavarena je REL postupkom, kao i zidovi šava (Slika 6). Kako bi se ubrzao postupak zavarivanja, istovremeno su u teškim uslovima zavarivala dva zavarivača pri tome strogo vodeći računa da se ne odstupa od propisane tehnologije reparature.



Slika 6. REL zavarivanje – 1/3 šava

Figure 6. MMA welding of the 1/3 seam

Poslije svakog prolaza, potrebno je bilo opuštanje zaostalih napona sa pneumatskim čekićem i detaljno čišćenje šava od šljake elektrode. Kada je završeno zavarivanje REL postupkom, pristupilo se MAG zavarivanju sa praškom punjenom žicom, što je uveliko ubrzalo proces zavarivanja (Slika 7). Kao i kod REL postupka, posebna pažnja se posvetila pravilnom zavarivanju, opuštanju zaostalih napona pneumatskim pištoljem, čišćenjem pri tome strogo poštujući međuprolaznu temperaturu [3].

3. Rezultati i diskusija

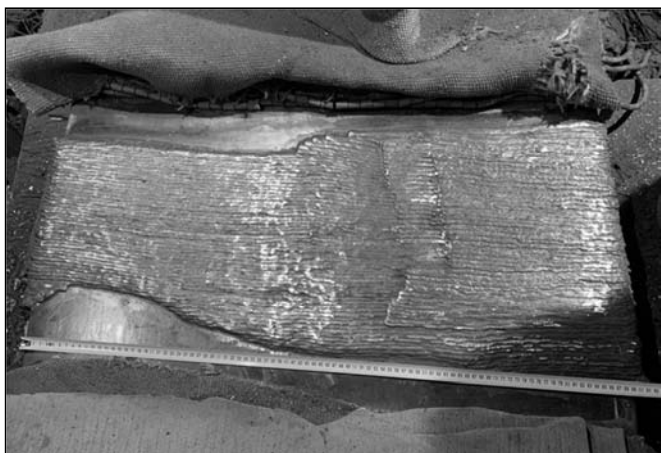
Tehnologijom reparaturnog zavarivanja ostvaren je očekivani i jedino prihvatljivi rezultat – uspješna sanacija oštećenog prstena koja zadovoljava sve zahtjeve te je uspostavljen ponovo proces proizvodnje sa optimalnim parametrima. Maksimalnim poštivanjem propisane tehnologije sanacije pukotine, postignut je rezultat koji



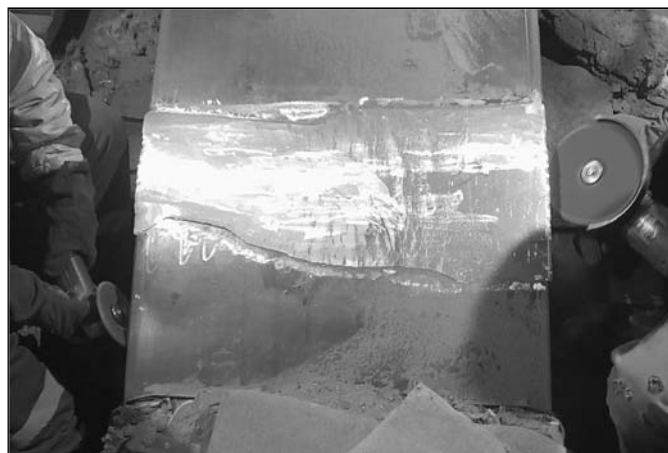
Slika 7. MAG zavarivanje

Figure 7. MAG welding

produžava životni vijek prstena i dozvoljava nastavak neometane proizvodnje klinkera/cementa. Neuspješna reparatura predstavljala bi ogroman rizik po poslovanje tvornice cementa, jer od trenutka pokretanja postupka nabavke novog prstena do puštanja u pogon potrebno je čak i do 12 mjeseci. Ukupno je bilo potrebno 26 dana bez pauze (20.12.2021. – 14.01.2022.), 550 kg dodatnog materijala, 1000 grafitnih elektroda za žlijebljenje. Rad u svim vremenskim uslovima, po vjetru, kiši, snijegu i temperaturama do -15°C kako bi se ponovo uspostavio proces proizvodnje. Naknadnim ispitivanjem bez razaranja (VT, PT, UT) nisu ustanovljena oštećenja na prstenu i na reparaturi, te je isti i dalje u funkciji. Izgled poslednjih faza sanacije i završni izgled saniranog nosivog prstena rotacione peći prikazan je na Slikama 8 a-c, a izgled nosivog prstena rotacione peći nakon 6 mjeseci uspješne upotrebe prikazan je na Slici 8 d.



a)



b)



c)



d)

Slika 8. Saniran nosivi prsten rotacione peći: a-b) poslednje faze snacije, c) izgled saniranog prstena, d) izgled nosivog prstena rotacione peći nakon 6 mjeseci upotrebe

Figure 8. Repaired bearing ring of the rotary kiln: a-b) final stages of repair, c) appearance of the repaired ring, d) appearance of the bearing ring of the rotary kiln after 6 months of use

4. Zaključak

Reparaturno zavarivanje predstavlja vrlo kompleksan tehnološki postupak koji je često jedini način za ponovno uspostavljanje neometanog rada postrojenja nakon havarije nekog od vitalnih elemenata. U vremenima kada se svi elementi i postrojenja maksimalno eksploatišu zbog ostvarivanja maksimalnog profita, postaje jasno da je reparaturno zavarivanje jedino brzo i efikasno rješenje problema kako bi se ponovo uspostavio integritet konstrukcije - postrojenja. Od ključne važnosti je da izvođač radova bude maksimalno dosljedan propisanoj tehnologiji jer u suprotnom nastaju problemi većih razmjera i puno veći troškovi od planiranih.

Literatura / References

[1] Dominik Načinović, (2017), "Vođenje cementne peći", Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.

[2] Atef Badr, (2018), MESSER Eutectic Castolin, "Repair of Fractured Kiln Tyre", Egipat.

4. Conclusion

Repair welding is a very complex technological procedure, which is often the only way to restore the uninterrupted operation of the plant after the failure of one of the vital elements. In times when all elements and plants are exploited to the maximum for the sake of achieving maximum profit, it becomes clear that repair welding is the only quick and effective solution to the problem in order to re-establish the integrity of the structure - the plant. It is of crucial importance that the contractor be as consistent as possible with the prescribed technology, because otherwise problems of a larger scale and much higher costs than planned arise.

[3] Juraga, I., Živčić, M., Gracin, M., (1994), "Reparaturno zavarivanje", Zagreb.

UPUTSTVO AUTORIMA I SARADNICIMA

Časopis **ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE (ZZK)** je naučno-stručni časopis čiji je zadatak afirmacija naučnih istraživanja, razmena stručnih saznanja i praktičkih iskustava, kontinualno obrazovanje i sveobuhvatno informisanje svih onih koji imaju interesovanje za tehniku i tehnologiju zavarivanja, termičkog rezanja i lemljenja. Autorski radovi podležu recenziji i mogu da budu svrstani u jednu od sledećih kategorija:

Originalni naučni rad (Original scientific paper) je neobjavljeni rad koji doprinosi naučnom saznanju ili shvatanju, a omogućava da se na osnovu datih informacija može: ponoviti eksperiment i postići prikazane rezultate sa istom tačnošću ili unutar granica eksperimentalne greške prema navodima autora i ponoviti autorova zapažanja, proračune ili teorijske navode i doneti slične zaključke.

Prethodno saopštenje (Preliminary communication) je rad koji sadrži nova naučna saznanja ili rezultate čiji karakter zahteva hitno objavljivanje. Rad obavezno sadrži jedan ili više novih podataka, naučnih informacija, ali bez dovoljno pojedinosti koje bi omogućile čitaocu proveru iznesene informacije na opisan način.

Pregledni rad (Review) izveštava o nekom posebnom pitanju o kome je već objavljivana informacija, samo je to ovde sakupljeno, analizirano, pogodno prikazano i raspravljeno. Autor preglednog rada dužan je da se u tekstu poziva na svu literaturu koju je koristio u svom radu, i da literaturu navede redosledom onako kako se pojavljuje u tekstu.

Stručni rad (Professional paper) rad sadrži korisne priloge iz područja čija problematika nije vezana za izvorna istraživanja. Materija ne mora da predstavlja novost u svetskim okvirima. To se npr. odnosi na reprodukciju u svetu poznatih istraživanja, koja predstavljaju vredan materijal za širenje znanja, i prilagođavanja izvornih istraživanja potrebama industrije.

Sadržaj rukopisa

Priredjen za štampu rukopis treba da sadrži: naslov rada (na srpskom i engleskom jeziku); podatke o autoru: puno ime prezime autora i koautora, zvanje, adresa ustanove-preduzeća u kojoj je zaposlen, grad, telefon / e-mail, navođenje projekta na kojem se zasniva tema rada, i ko je finansirao projekat (obavezno kod projekata koje finansira Ministarstvo za nauku i tehnologije); predlog autora za kategorizaciju rada; ključne reči (na srpskom i engleskom jeziku); izvod (na srpskom i engleskom jeziku); integralni tekst rada.

Naslov rada treba da je po mogućnosti što kraći, i da jasno odražava suštinu rada.

Autor je idejni tvorac i nosilac aktivnosti u izradi rada. Kod navođenja koautora treba se ograničiti na one koautore koji su direktno učestvovali u stvaranju rada.

Ključne reči (Key words) su reči koje su najkarakterističnije za rad i koje ukazuju na samu suštinu rada. Obično je dovoljno navođenje tri do šest ključnih reči.

Izvod (Abstract) treba da je kratak i informativan i može da sadrži najviše 500 slovnih mesta. On upozorava na zaključke za svaku novu informaciju koju donosi rad. Za radove koji ne daju bitno nove rezultate (pregledni radovi, referativni radovi) dovoljno je napisati indikativni izvod u kojem se kratko opisuje predmet rada. Preko izvoda čitalac treba da lako i brzo oceni da li ga taj rad zanima. Izvod, kao i integralni tekst, se pišu u trećem licu.

Uvod - Iznosi se predmet, svrha i cilj rada, sa kratkim uvidom u materiju prethodnih, objavljenih istraživanja.

Eksperimentalni deo - Eksperimenti i merenja moraju da budu opisani tako da se rezultati mogu reprodukovati. Kada se radi o komercijalnim ili ranije opisanim aparatima ili standardom određenim uređajima, treba navesti odgovarajuću literaturu (standard) i uslove (merila) pod kojima se eksperimentisalo. Ako je razrađen sopstveni eksperimentalni postupak treba ga opisati sa svim detaljima i dati jasne slike ili skice konstruisanog aparata. To se isto odnosi i na oblik i mere eksperimentalnih uzoraka i epruveta za ispitivanje.

Rezultati - Rezultate treba dati pregledno, u obliku tabela ili dijagrama. Suvišno je koristiti oba načina prikaza rezultata. Na dijagrame treba uneti sve rezultate dobijene eksperimentima. Preporučuje se da se rezultati obrade statistički. Ilustrovanje rezultata fotosima (npr. fotosi mikrostrukturnih analiza) treba ograničiti na karakteristične primere, značajne za zaključak ili za poređenje stanja. Poželjno je da autor tekstovi uz tabele i slike daje dvojezično, na srpskom i engleskom.

Diskusija - Analiziraju se dobijeni rezultati, upoređuju sa ranije publikovanim podacima, pronalaze se zakonitosti i granično područje zakonitosti, komentarišu se greške i tačnosti merenja. Daju se eventualne sugestije za dalja istraživanja.

Zaključak - Zaključak sadrži kratak rezime najvažnijih rezultata. Treba ga pisati tako da čitalac koji pročita samo zaključak može dobiti opštu sliku o vrednosti i zanimljivosti rada i za šta ga može koristiti.

Literatura - Literatura se citira hronološkim redom. Na literaturu se poziva navođenjem u uglastoj zagradi rednog broja pod kojim je navedena. Radovi koji nisu objavljeni (interni izveštaji, pravila, procedure) ne mogu da budu navedeni kao reference. Literatura se daje na jeziku originala odgovarajuće reference i mora da bude navedena prema ISO 690:

Citiranje časopisa: prezime autora, zarez, inicijal imena autora (ako ih ima više odvajaju se zarezom) tačka, zarez, dvotačka, ime časopisa ili njegova internacionalna skraćena, razmak (bez zareza), volumen (boldiranim fontom), broj (u lučnoj zagradi boldiranim fontom), zarez, godina (u lučnoj zagradi), stranica (početna/ završna), tačka.

Citiranje knjige: navođenje autora kao u prethodnom slučaju, dvotačka, naslov knjige, zarez, izdavač, zarez, mesto izdanja, zarez, godina izdanja, zarez, kratica str., zarez, broj stranice, tačka.

Citiranje zbornika radova naučnih skupova: navođenje autora kao u prethodnom slučaju, dvotačka, naziv zbornika radova, mesto i godina održavanja skupa, broj stranice, tačka.

Tehnička priprema

Autori su dužni da tekst rada pripreme prema uputstvu i dostave elektronskom poštom u MS Word (docx) i Adobe (pdf) formatu na e - mail adresu duzs011@gmail.com.

Opis izgleda teksta - Obim teksta je do 8 strana formata A4 sa veličinom fonta 9 pt. Tekst i tabele, bez slika, uraditi kao fajl u Word document. U tekstu naznačiti mesto slika, sa rednim brojem i nazivom. Sve stranice teksta moraju biti označene. Stil slova je Arial (za naslove svih nivoa Arial Black). Slike visoke rezolucije (pod nazivom i rednim brojem kao u tekstu) *obavezno uraditi kao poseban fajl*, u JPG ili TIF formatu. Veličina znakova i slova na slici i u tabeli treba da u završnoj formi odgovara veličini 8 pt.

Uredništvo časopisa Zavarivanje i zavarene konstrukcije

ČASOPIS ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE**Cenovnik oglasnog prostora u četiri uzastopna broja 2023**

	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%.
- Objavljivanje 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 2023

	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

MESSER TEHNOGAS
REFIT INŽENJERING
YASKAWA SLOVENIJA
HONEX
ELIMP
NEMINIK
SIGMA LAB
EDC D.O.O. HRVATSKA

1. ČLANARINA DUZS za 2023. godinu **3.500 dinara**
Članovima DUZS **GRATIS** godišnje izdanje časopisa "ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE"
2. ČASOPIS "ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE" - 2023. 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 2021. godinu 500 dinara
 - cena pojedinačnog broja za prethodne godine..... 250 dinara
 - b) beneficirane cene za članove DUZS:
 - cena pojedinačnog broja za 2022. 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