



ZAVARIVANJE I

ZAVARENE KONSTRUKCIJE WELDING & WELDED STRUCTURES

God. 70 Vol. 70	Br. 1 No. 1	1-48 1-48	Beograd Belgrade	Srbija Serbia	2025. 2025.
--------------------	----------------	--------------	---------------------	------------------	----------------

ČASOPIS DRUŠTVA ZA UNAPREĐIVANJE ZAVARIVANJA U
SRBIJI I TEHNOLOŠKO-METALURŠKOG FAKULTETA
UNIVERZITETA U BEOGRADU

QUARTERLY REVIEW OF SERBIAN WELDING SOCIETY AND
THE FACULTY OF TECHNOLOGY AND METALLURGY OF THE
UNIVERSITY OF BELGRADE

PERIODIČNOST IZLAŽENJA – ČETIRI PUTA GODIŠNJE
PUBLISHED IN FOUR ISSUES ANNUALLY

IZDAVAČI / PUBLISHERS

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

Grčića Milenka 67, Beograd, Srbija

**TMF - Tehnološko-metalurški fakultet
Univerziteta u Beogradu**
Karnegijeva 4, Beograd, Srbija

Za izdavača / For Publisher

Branislav Lukić, dipl.ing, predsednik DUZS

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)

UREDNIŠTVO / EDITORIAL

Glavni i odgovorni urednik / Editor-in-Chief

Dr Zoran Odanović, dipl.ing.

duzs011@gmail.com, zoranodanovic@gmail.com

Tehnički urednici / Technical Editors

Branislav Lukić, dipl.ing

štampano izdanje / printed edition

Dr Bojan Gligorijević, dipl.ing

internet izdanje / online edition

Redakcijski odbor / Editorial Board

Dr Nenad Radović, dipl.ing.

Dr Radomir Jovičić, dipl.ing.

Dr Srđan Bulatović, dipl.ing.

Dr Stefan Dikić, dipl.ing.

Mr 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

www.wwsjournal.org.rs



CIP - Каталогизacija u publikaciji
Narodna biblioteka Srbije, Beograd
621.791

ZAVARIVANJE i zavarene konstrukcije : časopis Društva za unapređivanje zavarivanja u Srbiji i Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu = Welding & welded structures : Serbian welding society and Faculty of Technology and metallurgy of the University of Belgrade quarterly review / glavni i odgovorni urednik Zoran Odanović. - Vol. 41, no. 1 (1996). - Beograd : DUZS - Društvo za unapređivanje zavarivanja u Srbiji : TMF - Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu, 1996- (Beograd : RIC grafičkog inženjerstva Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu). - 29 cm

Tromesečno. - Je nastavak: Zavarivač = ISSN 0513-8523. - Drugo izdanje na drugom medijumu: Zavarivanje i zavarene konstrukcije (Online) = ISSN 3042-3163 ISSN 0354-7965 = Zavarivanje i zavarene konstrukcije COBISS.SR-ID 105396743

CENE I NARUŽBINA ZA 2025.

Cena pojedinačnog broja 1.150,00 dinara
Godišnja pretplata 3.520,00 dinara
Tekući račun: 325-9500600002588-46

PRICE AND ORDER

Annual subscription: EUR 100

Account No. RS35325960160000041546
OTPVRS22 (VOJVOĐANSKA BANKA AD)
IBAN RS35325960160000041546

ŠTAMPA / PRINT

RIC grafičkog inženjerstva Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu, Karnegijeva 4, Beograd
Tiraž / Circulation: 150

SADRŽAJ

CONTENTS



NAUKA • ISTRAŽIVANJE • RAZVOJ

SCIENCE • RESEARCH • DEVELOPMENT

03

PROCENA I POREĐENJE NOSIVOSTI ZAVARENOG SPOJA SA POLUELIPTIČNOM PUKOTINOM ČELIKA VISOKE ČVRSTOĆE ZAVARENOM RAZLIČITIM TEHNOLOGIJAMA ZAVARIVANJA

ASSESSMENT AND COMPARISON OF THE BEARING CAPACITY OF A WELDED JOINT WITH A SEMI-ELLIPTICAL CRACK OF HIGH-STRENGTH STEEL WELDED USING DIFFERENT WELDING TECHNOLOGIES

Mirza Manjgo, Luka Ferlič, Nenad Gubelj, Tomaz Vuherer



NAUKA • ISTRAŽIVANJE • RAZVOJ

SCIENCE • RESEARCH • DEVELOPMENT

13

UTICAJ PRIMENE RAZLIČITIH ZAŠTITNIH GASOVA SA UNUTRAŠNJE STRANE KORENA SUPER DUPEKS CEVNIH ZAVARENIH SPOJEVA NA OTPORNOST PREMA TAČKASTOJ KOROZIJI

INFLUENCE OF VARIOUS PURGING GASES ON PITTING CORROSION RESISTANCE OF SUPER DUPLEX WELDED PIPES

Željko Potkonjak, Murali Kumar, Fiazal Hussain, Rinshad Rahiman



NAUKA • ISTRAŽIVANJE • RAZVOJ

SCIENCE • RESEARCH • DEVELOPMENT

23

OCENA INTEGRITETA ZAVARENIH SPOJEVA PRIMENOM PARAMETERA MEHANIKE LOMA I ANALIZE RIZIKA

STRUCTURAL INTEGRITY ASSESSMENT OF WELDED JOINTS USING FRACTURE MECHANICS PARAMETERS AND RISK BASED APPROACH

Aleksandar Sedmak, Snežana Kirin, Tamara Golubović



PRAKSA

PRACTICE

29

PROCENA MEHANIČKIH OSOBINA SUČEONO ZAVARENIH SPOJEVA OD KONSTRUKCIONOG ČELIKA IZVEDENIH NA ROBOTU MAG POSTUPKOM

EVALUATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF BUTT-WELDED JOINTS OF STRUCTURAL STEEL PERFORMED BY A ROBOT USING THE MAG PROCESS

Aleksandra Mitić, Djordje Ivković, Dušan Arsić, Srbislav Aleksandrović, Vukić Lazić, Vladimir Milovanović, Anđela Mitrović



OBRAZOVANJE

EDUCATION

39

USAVRŠAVANJE POČETNIKA I MLADIH ZAVARIVAČA ZA POSLOVE ZAVARIVANJA SA OBLOŽENIM ELEKTRODAMA, METODOM POSTEPENOG RAZVIJANJA VEŠTINA I PRELASKA NA VIŠI NIVO

IMPROVEMENT OF BEGINNERS AND YOUNG WELDERS FOR WELDING WORKS WITH COATED ELECTRODES, USING THE METHOD OF GRADUAL DEVELOPMENT OF SKILLS

Saša Pejkić



VESTI

NEWS

22

PRIKAZ UNIVERZITETSKOG UDŽBENIKA RAZVOJ METALURGIJE I PROIZVODNJE ČELIKA U REPUBLICI HRVATSKOJ

44

PROIZVOĐAČI IZ OBLASTI VAZDUHOPLOVSTVA ZAHTEVAJU PRECIZNOST KOJU DINASTY® TIG UREĐAJI OBEZBEĐUJU

46

I6. MEĐUNARODNI SIMPOZIJUM O ADITIVNOJ PROIZVODNJI, 21–23. MAJ 2025, DREZDEN, NEMAČKA

14. MEĐUNARODNI SEMINAR „NUMERIČKA ANALIZA ZAVARLJIVOSTI“ 24. SEPTEMBAR 2025, GRAC – DVORAC SEG AU, AUSTRIJA

24. MEĐUNARODNA IZLOŽBA ZAVARIVAČKIH MATERIJALA, OPREME I TEHNOLOGIJA 7–10. OKTOBAR 2025, CROCUS EXPO, MOSKVA, RUSIJA

47

UPUTSTVO AUTORIMA I SARADNICIMA MARKETING

48



Mirza Manjgo^{1,a}, Luka Ferlič^{1,b}, Nenad Gubelj^{1,c}, Tomaž Vuherer^{1,d}

PROCENA I POREĐENJE NOSIVOSTI ZAVARENOG SPOJA SA POLUELIPTIČNOM PUKOTINOM ČELIKA VISOKE ČVRSTOĆE ZAVARENOG RAZLIČITIM TEHNOLOGIJAMA ZAVARIVANJA

ASSESSMENT AND COMPARISON OF THE BEARING CAPACITY OF A WELDED JOINT WITH A SEMI-ELLIPTICAL CRACK OF HIGH-STRENGTH STEEL WELDED USING DIFFERENT WELDING TECHNOLOGIES

Originalni naučni rad / Original scientific paper

Rad primljen / Paper received

Avgust 2024.

Rad prihvaćen / Paper accepted

Februar 2025.

Adresa autora / Author's address

¹ Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Smetanova ulica 17. 2000 Maribor, Slovenija

Email / ORCID ID

^a / 0009-0009-2944-0820

^b / 0000-0002-3985-4711

^c / 0000-0002-3276-8431

^d tomaz.vuherer@um.si / 000-0002-1866-8266

Ključne reči: S960MC, mehaničke karakteristike, K_{JIC} , SINTAP, FAD.

Keywords: S960MC, mechanical properties, K_{JIC} , SINTAP, FAD.

Rezime

Procena nosivosti zavarenog spoja (svih njegovih zona) čelika visoke čvrstoće ima važnu ulogu za sigurno upotrebu zavarene konstrukcije. Zavareni spoj predstavlja ključni problem zbog heterogenosti, mehaničkih i eksploatacijskih karakteristika, kao i prisustvo greške tipa prsline. Ponašanje zavarenog spoja sa prslinom je nepredvidljivo zbog djelovanja mnogih faktora na njega. Sa ciljem boljeg definisanja ponašanja osnovnog materijala i njegovog zavarenog spoja, potrebno je izvesti odgovarajuća ispitivanja. U ovom radu predstavljeno je određivanje nosivosti zavarene ploče (S960MC) sa polueliptičnom prslinom u zoni uticaja toplote (ZUT) pri čemu su upoređivane dve tehnologije zavarivanja: elektronski i laserski snop. Ekperimentalno je izmerena tvrdoća materijala, nakon čega su određene mehaničke karakteristike materijala primenom korelacijskih jednačina. Korišćenjem standarda ASTM E1820 za savijanje epruvete u tri tačke, dobijeni su rezultati žilavosti materijala. Na kraju, koristeći sve proračune, metodom SINTAP su analitički određene kritične sile, pri kojima bi došlo do pojave loma konstrukcije.

Abstract

Assessment of the bearing capacity of the welded joint (all its zones) of high-strength steel has an important role for the safe use of the welded structure. The welded joint represents a key problem due to heterogeneity, mechanical, and operational properties, as well as the presence of a crack-type defects. The behaviour of a welded joint with a crack is unpredictable due to the influence of many factors. To better understand the behaviour of the base material and its welded joint, it is necessary to carry out appropriate tests. This study presents the determination of the bearing capacity of a welded plate (S960MC) with a semi-elliptical crack in the heat affected zone (HAZ), comparing two welding technologies: electron and laser beam. The hardness of the material was measured experimentally and the mechanical properties of the material were determined using correlation equations. Then, as per ASTM E1820 standard for bending the test specimens in three points, the results of the material toughness were obtained. Finally, using all the calculations, the SINTAP method was used to analytically determine the critical forces that would cause the structure to break.

Rad je u originalnom obliku objavljen u Zborniku radova sa 33. Savetovanja sa međunarodnim učešćem „Zavarivanje 2024“ održanog u Vrnjačkoj Banji, Srbija od 2. do 5. oktobra 2024. godine.



1. Uvod

Procena nosivosti zavarenog spoja čelika visoke čvrstoće ima važnu ulogu za sigurnu upotrebu zavarene konstrukcije. Primena S960MC čelika visoke čvrstoće se odnosi na pouzdane konstrukcije proizvedene tehnologijom zavarivanja poput delova šasije i karoserije železničkih vozila, delova građevinskih strojeva, kranova itd. Zavareni spoj kao najveći koncentrator napona predstavlja ključni problem zbog heterogenosti strukturnih, mehaničkih i eksploatacijskih karakteristika, kao i prisustva grešaka tipa prslina. Dosadašnja iskustva ukazuju da je ponašanje zavarenog spoja sa prslinom nepredvidljivo, s obzirom na delovanje brojnih uticajnih faktora: zaostali naponi pri zavarivanju, geometrijska odstupanja, mikrostrukturna heterogenost i veličina prsline. Prema tome, procena nosivosti zavarene čelične konstrukcije u mnogome zavisi od sveobuhvatne analize zavarenog spoja kao najkritičnijeg mesta u svakoj konstrukciji [1-3]. Cilj ovog rada je procena nosivosti zavarenih spojeva s polueliptičnom prslinom u ZUT-u proizvedenih sa dve različite tehnologije zavarivanja: elektronski i laserski snop (na dijagramima u radu, plava boja će označavati laserski snop, a crvena boja uzorke elektronskog snopa).

■ L – laserski snop ■ E – elektronski snop

Jedna od metoda za procenu nosivosti konstrukcije je SINTAP metoda, odnosno dobijanje FAD dijagrama iz kojeg se procenjuje vrednost kritične sile pri kojoj bi trebalo da se dostigne lom konstrukcije. Procenjena vrednost sile se upoređuje sa eksperimentalom vrednošću sile pri kojoj je došlo do loma, a koja je utvrđena primenom testa na jednoosno zatezanje. Da bi se primenila SINTAP metoda odnosno konstruisao FAD dijagram potrebni su ulazni podaci dobijeni eksperimentalnim putem. Potrebni podaci sumehanička svojstva $R_{p0.2}$ (napon tečenja), R_m (zatezna čvrstoća), K_{JIC} (žilavost loma) i geometrija prsline u zavarenom poju.

Pomenuti čelik S960MC spada u grupu čelika visoke čvrstoće sa visokim $R_{p0.2}$ (700-1300 MPa), zbog čega se mogu opteretiti znatno većim opterećenjima ili se presek profila može smanjiti u odnosu na obične konstruktivne čelike.

2. Eksperimentalni deo

2.1. Osnovni materijal

Osnovni materijal korišten za eksperiment je termomehanički obrađen čelik S960MC, a njegov hemijski sastav i mehanička svojstva su prikazani u Tabeli 1 [4-6].

Tabela 1. Hemijski sastav (mas. %) i mehanička svojstva čelika S960MC [6]

Table 1. Chemical composition (wt.%) and mechanical properties of S960MC steel [6]

Čelik S960MC	C	Si	Mn	P	Al	Nb	V	Ti	B	S
Hemijski Sastav	0.091	0.06	1.11	0.011	0.034	0.002	0.011	0.019	0.005	0.001
	Cu	Cr	Ni	Mo	N					
	0.012	1.1	0.05	0.123	0.005					
Mehaničke karakteristike	Smer valjanja		$R_{p0.2}$ [MPa]		R_m [MPa]		Izduženje preloma (%)		Udarna žilavost na 20°C [J]	
	Uzdužni		≥960		980-1250		≥7		40	
	Poprečni		988		1014		10,9		74	

2.2. Izračunavanje mehaničkih svojstava materijala iz korelacijskih jednačina za merenje tvrdoće

U poslednjim decenijama uloženo je dosta napora da se korelira odnos između izmerene tvrdoće i čvrstoće materijala. Engleski naučnik David Tabor je predložio složen odnos između krajnje sile zatezanja σ_B i mikrotvrdoće H, uzimajući u obzir koeficijent deformacijskog stvrđavanja n. Tako su postavljene korelacijske jednačine kojima se na osnovu izmerene tvrdoće može dobiti napon

tečenja σ_s ($R_{p0.2}$) prema jednačini 2.1 i zatezna čvrstoća σ_B (R_m) prema jednačini 2.2. Challenger i Moteff su dali empirijski izraz za određivanje koeficijenta deformacijskog stvrđavanja (jednačina 2.3), uzimajući u obzir veličine subzrna koja iznosi $\lambda=30 \mu\text{m}$. Vrednost mikrotvrdoće H se računa preko izmerenih vrednosti tvrdoće HV po jednačini 2.4, dok je vrijednost k konstanta i iznosi 0.2 [7, 8].



$$\sigma_s = \left(\frac{H}{3}\right) \cdot (0.1)^n \quad (2.1)$$

$$\sigma_B = \frac{H}{2.9} \cdot \left(\frac{n}{0.217}\right)^n \quad (2.2)$$

$$n \cdot \lambda = k \quad (2.3)$$

$$H = HV \cdot \frac{9.81}{1000} \quad (2.4)$$

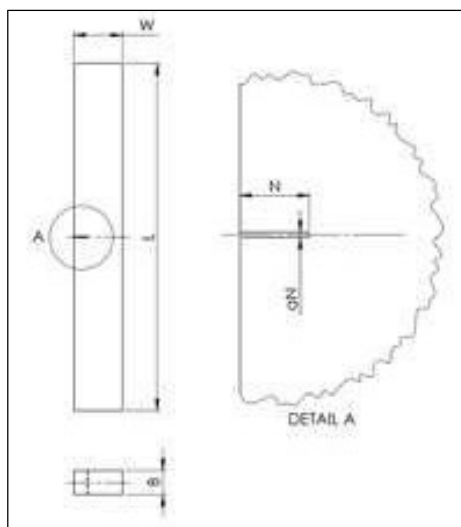
2.3. Određivanje žilavosti materijala prema standardu ASTM E1820

Za procenu integriteta zavarene konstrukcije u eksploataciji potrebno je poznavanje karakteristika loma koji se određuju eksperimentalno, primenom elasto-plastične mehanike loma. Standard ASTM E1820 [9] daje smernice za ispitivanje žilavosti loma savijanjem u tri tačke materijala sa iniciranom pukotinom. Prema odabranoj normalizacijskoj metodi iz pomenutog standarda izrađeni su uzorci (Slika 1, Tabela 2) iz zavarenih ploča sa urezanim zarezom u zoni ZUT-a, kao što je prikazano na Slici 2.

Tabela 2. Dimenzije uzoraka za savijanje u tri tačke

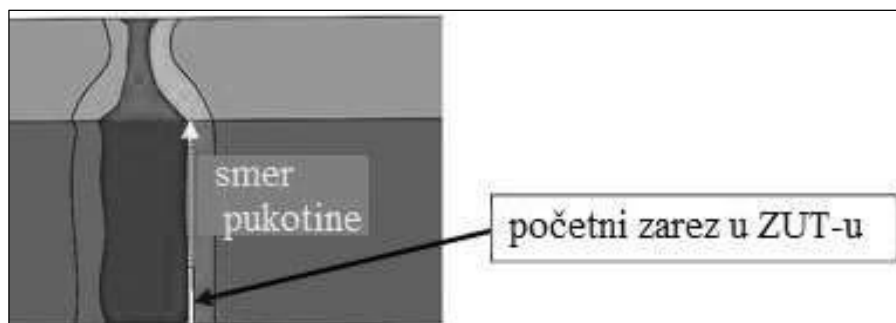
Table 2. Dimensions of three-point bending test specimens

Uzorak	Širina W [mm]	Debljina B [mm]	Dužina L [mm]	Dužina zareza N [mm]	Širina zareza a_N [mm]
EMH	14.09	6.49	100	3.73	0.26
LMH	14.14	7.03	100	4.05	0.27



Slika 1. Crtež SEB uzorka

Figure 1. SEB specimen drawing



Slika 2. Prikaz mesta urezivanja zareza

Figure 2. Notch placement illustration

Normalizacijska metoda procenjuje dužinu pukotine usporedbom izmerenih i normaliziranih F - $CMOD$ podataka korištenjem analitičke normalizacijske funkcije. Svaka vrednost opterećenja do P_i , isključujući maksimalno opterećenje, se normalizira. Sila koja inicira širenje prsline se meri kao funkcija stabilnog rasta prsline, što rezultira J - R i δ - R krivama otpornosti [10].

2.4. Određivanje najveće nosivosti konstrukcije s pukotinom

Predviđanje ponašanja konstrukcije na osnovu parametara mehanike loma može se oceniti na temelju dva kriterija: potpuni lom i plastični kolaps. Jedna od procedura koja primenjuje opisane metode je tzv. SINTAP metoda (eng. Structural Integrity Assessment Procedures for European



Industry). Prema SINTAP Metodi, analiza se može zasnovati na dijagramu procene otkaza – FAD (eng. Failure Assessment Diagram). Parametri loma i kolapsa su K_r i L_r . Parametar K_r (formula 2.5) je omer linearno-elastičnog napreznja faktora intenziteta prema žilavosti loma korištenog materijala. Parametar L_r (formula 2.6) je mera učinka plastičnosti koja meri bliskost s plastičnim popuštanjem konstrukcije. Neophodan kriterijum prihvatljivosti je da se tačka od interesa za procenu nalazi unutar područja omeđenog osama dijagrama procene loma [2, 11, 12]. FAD postupak je izveden po prvom analitičkom nivou za kojeg su poznati granica plastičnosti i zatezna čvrsoća. Prema tome, za proračun funkcije normiranog opterećenja se mogu primeniti jednačine 2.7-2.9.

$$K_r = \frac{K_1}{K_{mat}} \quad (2.5)$$

$$L_r = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_y} \quad (2.6)$$

$$f(L_r) = f(L_r = 1) \times L_r^{\frac{(N-1)}{2N}} \quad (2.7)$$

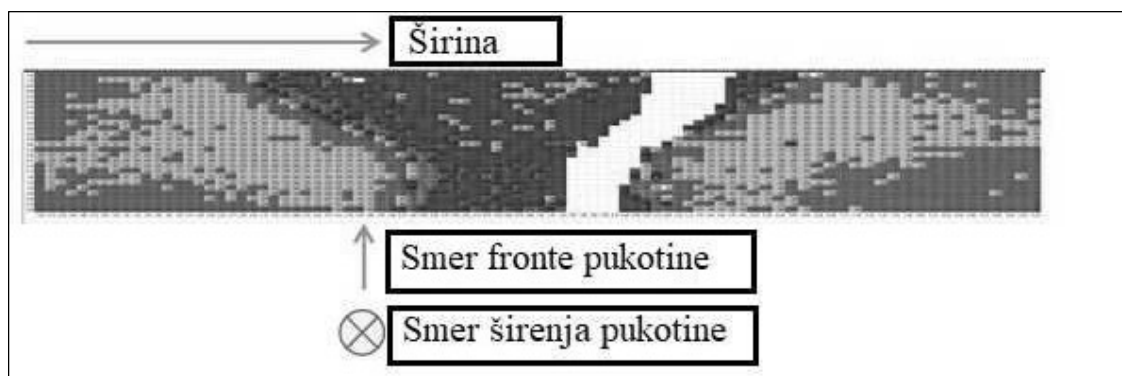
$$N = 0.3 \left[1 - \frac{R_{p0.2}}{R_m} \right] \quad (2.8)$$

$$L_{rmax} = \frac{1}{2} \left[\frac{R_{p0.2} + R_m}{R_{p0.2}} \right] \quad (2.9)$$

3. Rezultati

3.1. Mehanička svojstva materijala dobijenih primenom korelacijskih jednačina nakon merenja tvrdoće

Merenje tvrdoće dato je u dva smera za uzorke LMB6, LMB8, LMB9, EMB4 i EMB5. Na taj način dobijene su vrednosti tvrdoće na površini materijala kao što je prikazano na Slici 3 za uzorak LMB9, na kojoj je osnovni materijal prikazan zelenom bojom, zona ZUT-a plavom bojom i metal šava crvenom bojom. Računom prema jednačinama 2.1-2.4 dobijene su osnovna mehanička svojstva materijala $R_{p0.2}$ i R_m . Rezultati prikazani u Tabeli 3 su prosečne vrednosti svih merenja izvedenih u svakoj zoni posebno.



Slika 3. Rezultati merenja tvrdoće za uzorak LMB9

Figure 3. Hardness measurement results for the LMB9 specimen

Tabela 3. Mehanička svojstva dobijeni na osnovu merenja tvrdoće

Table 3. Mechanical properties obtained from hardness measurements

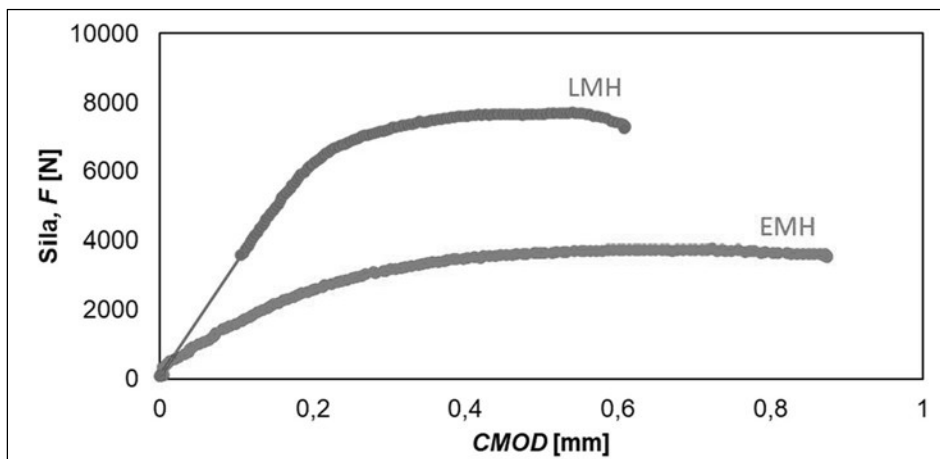
Uzorak	Tvrdoća [HV]			$R_{p0.2}$ [MPa]			R_m [MPa]		
	OM	ZUT	MŠ	OM	ZUT	MŠ	OM	ZUT	MŠ
LMB6	334	388	373	990	1151	1102	1055	1228	1175
LMB8	320	382	363	948	1134	1075	1011	1207	1145
LMB9	320	375	364	949	1108	1079	1011	1191	1149
EMB4	328	388	376	973	1153	1115	1036	1229	1183
EMB5	329	386	377	976	1143	1114	1039	1219	1186



3.2. Rezultati žilavosti loma i krive otpornosti

Prema standardu ASTM E1820 [8], na SEB uzorcima eksperimentalno je izmeren zapis F-

CMOD za uzorke LMH i EMH (Slika 4). Eksperiment je izveden na mašini Instron 1255.

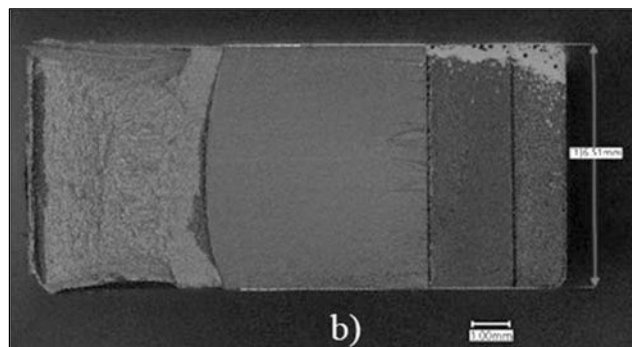
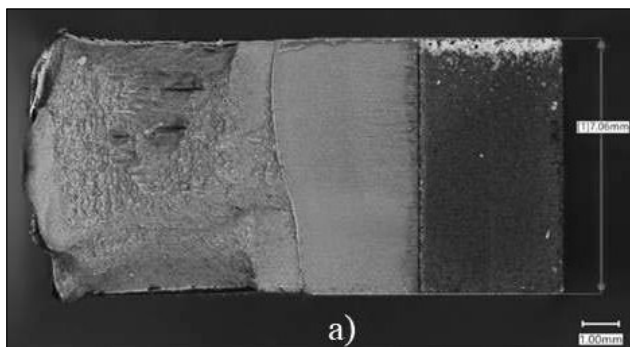


Slika 4. F-CMOD dijagram

Figure 4. F-CMOD diagram

Nakon loma uzoraka, elektronskim mikroskopom slikane su prelomne površine (strane A) uzoraka prikazane na Slici 5, dok su izmerene vrednosti

prirasta prsline prikazane u Tabeli 4, gde su a_0 – početna dužina prsline i a_f – inkrement prsline.



Slika 5. Prelomne površine SEB uzoraka (strana A): (a) LMH i (b) EMH

Figure 5. Fractured surfaces of SEB specimens (side A): (a) LMH and (b) EMH

Tabela 4. Vrednosti a_0 i a_f

Table 4. Values of a_0 and a_f

Uzorak	a_0	a_f
LMH	7.623	8.182
EMH	9.466	9.682

Zatim su računom određeni parametri mehanike loma prikazani u Tabeli 5 i formirane krive

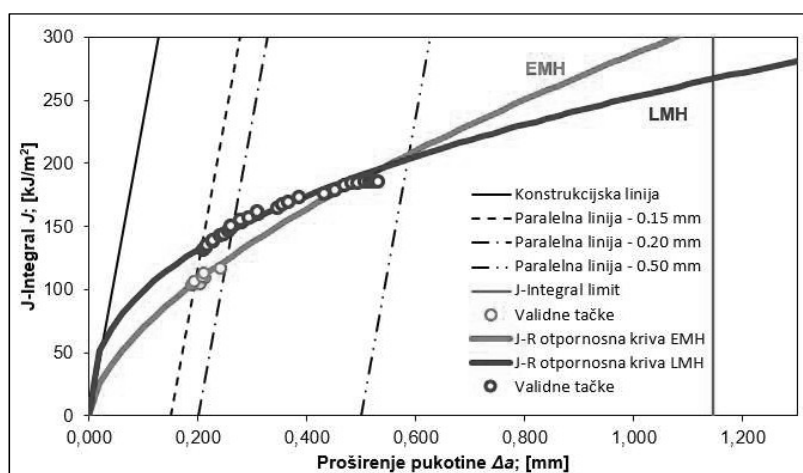
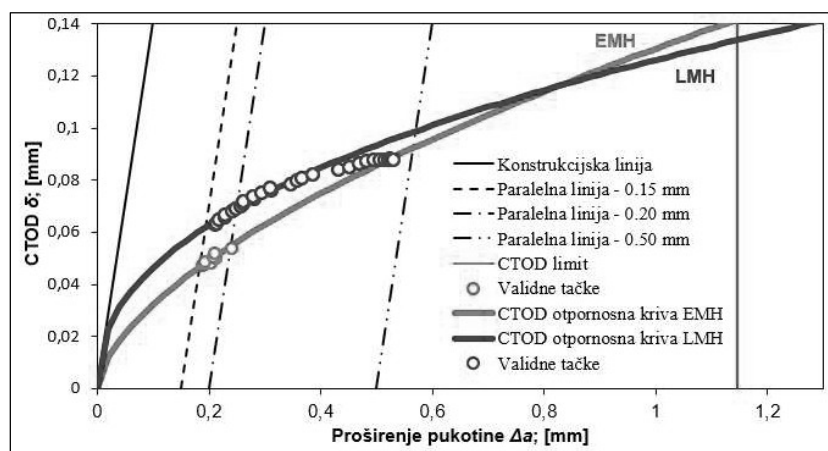
otpornosti $J-\Delta a$ i $\delta-\Delta a$ (Slike 6 i 7) za oba postupka zavarivanja.



Tabela 5. Vredosti parametara mehanike loma

Table 5. Values of fracture mechanics parameters

Uzorak:	J_{IC} [kJ/m ²]	δ_{IC} [mm]	K_{JIC} [MPa·m ^{1/2}]	J_{max} [kJ/m ²]	δ_{max} [mm]
EMH	123,58	0,0548	170,65	208,49	0,0956
LMH	146,7	0,069	185,93	185,23	0,0881

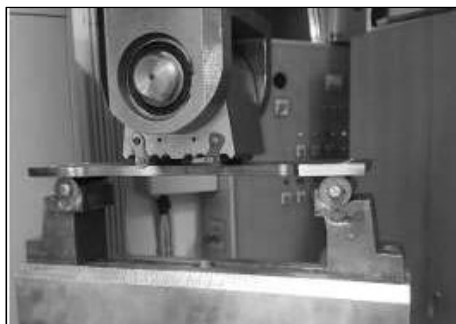
Slika 6. J- Δa krive otpornostiFigure 6. J- Δa resistance curvesSlika 7. δ - Δa krive otpornostiFigure 7. δ - Δa resistance curves

3.3. Odrađivanje nosivosti zavarene ploče

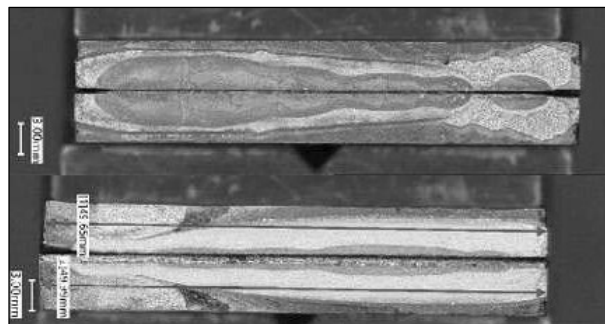
Ploče preseka 50×5 mm (W×B) zavarene su sa različitim postupcima zavarivanja EMC-elektornskim snopom i LMC-laserskim snopom, koje u području ZUT-a sadrže površinsku polueliptičnu prslinu proizvedenu cikličkim zamorom ploče savijanjem u četiri tačke (Slika 8).

Nastale prsline u ispitivanim uzorcima su prikazane na Slici 9, dok je na Slici 10 predstavljena geometrija polueliptične prsline potrebne za proračun po SINTAP metodi. Dimenzije prsline izmerene su mikroskopski i iznosile su

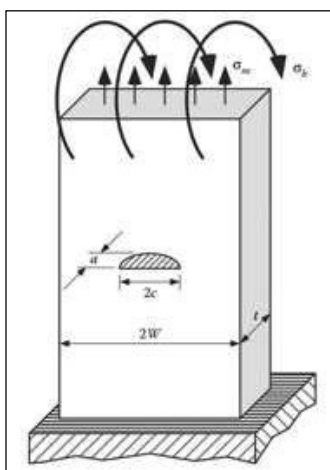
- Za EMC: c=23.79, a=3.69
- Za LMC: c=23.53, a=3.70



Slika 8. Ciklični zamor ploča savijanjem u četiri tačke
Figure 8. Cyclic fatigue of plates under four-point bending



Slika 9. Zamorna polueliptična pukotina za EMC-gore i LMC-dole
Figure 9. Fatigue semi-elliptical crack for EMC(top) and LMC (bottom)



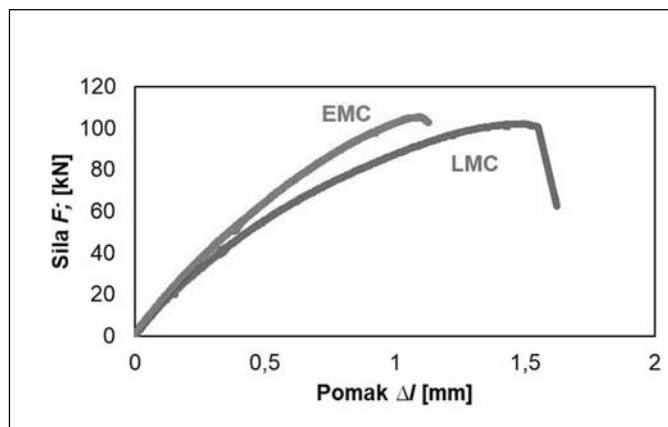
Slika 10. Geometrija polueliptične prsline
Figure 10. Geometry of semi-elliptical crack

Ekperimentalnim ispitivanjem na zatezanje na uzorku sa polueliptičnom prslinom snimano je Aramis sistemom kako bi usporedili silu pri kojoj dolazi do loma sa kritičnom silom koja će se dobiti FAD dijagramom. Ispitivanje EMC uzorka na

zatezanje prikazano je na Slici 11. Rezultati ispitivanja na zatezanje predstavljeni su dijagramom na Slici 12, dok su rezultati dati u Tabeli 6.



Slika 11. Ispitivanje na zatezanje
Figure 11. Tensile testing



Slika 12. Krive zatezanja
Figure 12. Tensile curves

**Tabela 6. Rezultati ispitivanja na zatezanje****Table 6. Tensile testing results**

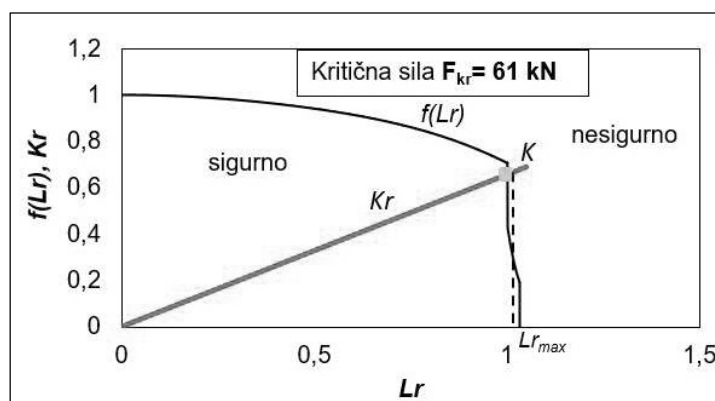
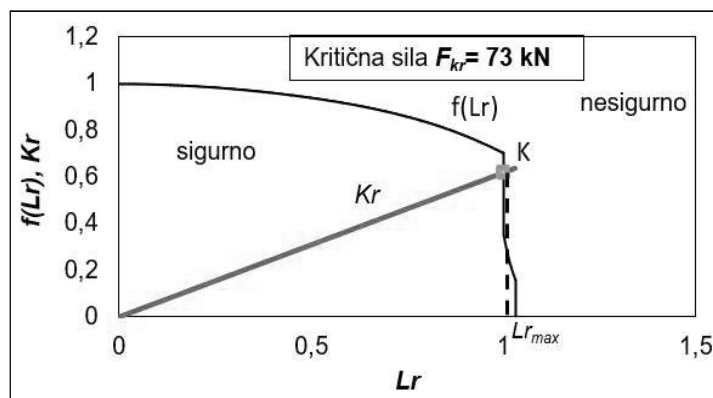
Uzorak	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	F_{max} [kN]
EMC	973	1036	105
LMC	990	1055	102

Za proračun kritične sile odnosno konstrukcije FAD dijagrama prema formulama 2.5-2.9, korišćeni su svi prethodno dobijeni rezultati. Vrijednost $R_{p0,2}$ i R_m su dobijeni iz merenja tvrdoće u području ZUT-a. Dimenzije polueliptične prsline smo dobili

mikroskopskim merenjem, dok je žilavost loma materijala ($K_{mat}=K_{JIC}$) dobijena iz proračuna u poglavlju 3.2. Podaci uzeti za proračun su prikazani u Tabeli 7, a FAD dijagrami sa dobijenom kritičnom silom su prikazani na Slikama 13 i 14.

Tabela 7. Podaci korišćeni za proračun FAD dijagrama**Table 7. Data used for FAD diagram calculation**

Uzorak	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	a [mm]	c [mm]	K_{mat} [MPa·m ^{1/2}]	E [GPa]
EMC	1151	1228	23.79	23.79	170.65	210
LMC	1153	1229	23.535	23.535	185.93	210

**Slika 13. FAD dijagram za EMC****Figure 13. FAD diagram for EMC****Slika 14. FAD dijagram za LMC****Figure 14. FAD diagram for LMC**



4. Zaključak

Za procenu nosivosti konstrukcije potrebno je raspolagati sa dovoljno pouzdanim podacima o materijalu. U ovom radu razmatrano je poređenje zone ZUT-a zavarenog spoja između dva procesa zavarivanja: E-elektronski snop i L-laserski snop. Iz niza eksperimenata koju su bili potrebni za dobijane određenih karakteristika materijala vidno je da su bolji rezultati i ocene kod zavarenog spoja L-laserskim snopom.

Na osnovu vrijednosti iz Tabele 3 vidljivo je da su mehaničke osobine, $R_{p0.2}$ i R_m dobivene iz korelacijskih jednačina iz izmerene tvrdoće, bolje na uzorcima LMB (zavareno laserskim snopom) u području ZUT-a i metala šava.

Na osnovu dijagrama *F-CMOD* (Slika 4), vidljivo je da je kod LMH uzorka (var laserskim snopom) potrebna veća sila (približno dva puta veća sila) za otvaranje pukotine nego kod EMH uzorka (var elektronskim snopom).

Normalizacionim postupkom dobijeni parametri mehanike loma u zoni ZUT-a: J_{IC} , K_{JIC} , δ_{IC} (Tabela 5) su bolji kod uzorka LMH.

Provedenom SINTAP metodom, koja se zasniva na dobijanju FAD dijagrama za procenu otkaza konstrukcije (Slike 13 i 14), dobijena je veća kritična sila na LMC ploči, dok su rezultati dobijeni zateznim eksperimentom (Slika 12) približno jednaki. Takođe, eksperimentalni rezultati su veći od predviđenih vrednosti, što ukazuje na sigurnost procena, tj. da konstrukcija neće da popusti, što je bio i glavni cilj istraživanja.

Literatura / References

[1] Jovanović, A., Bakić, G., Golubović, T., Kirin, S., Sedmak, A., (2023), Integrity and risk assessment of reconstructed steam line, *Structural integrity and life*, 23, 3, 367–371

[2] Elkhodbia, M., Barsoum, I., Negi, A., AlFantazi, A., (2024), Machine Learning Augmentation of the Failure Assessment Diagram Methodology for Enhanced Tubular Structures Integrity Evaluation, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 307, 22 August 2024, 110318.

[3] Mijatović, T., Manjgo, M., Burzić, M., Čolić, K., Burzić, Z., Vuherer, T., (2019), Structural integrity assessment from the aspect of fracture

4. Conclusion

To assess the load-bearing capacity of a structure, it is essential to have reliable material data. This study compared the HAZ of welded joints produced using two different welding processes: E – electron beam welding and L – laser beam welding. Based on a series of experiments conducted to determine specific material properties, it was evident that laser beam welding (L) resulted in superior performance and evaluations of the welded joint.

According to the values presented in Table 3, the mechanical properties $R_{p0.2}$ and R_m , derived from correlation equations based on hardness measurements, are higher in LMB specimens (laser beam welded) within the HAZ and weld metal.

From the *F-CMOD* diagram (Figure 4), it is evident that LMH specimens (laser beam welded) required approximately twice the force to initiate crack opening compared to EMH specimens (electron beam welded).

The normalized fracture mechanics parameters obtained for the HAZ, J_{IC} , K_{JIC} , and δ_{IC} (Table 5) indicated superior performance in the LMH specimen.

Using the SINTAP method, which relies on Failure Assessment Diagram (FAD) calculations to evaluate structural failure (Figures 13 and 14), a higher critical force was obtained for the LMC plate, while the results from tensile testing (Figure 12) were comparable. Additionally, the experimental results exceeded the predicted values, confirming the reliability of the assessments and ensuring that the structure will not fail, which was the primary objective of this research.

[4] *mechanics, Structural integrity and life*, 19, 2, 121–124

[5] Keränen, L., Keskitalo, O. N. M., Javaheri, V., Niskanen, J., Kaijalainen, A., Kurvinen, E., (2022), Mechanical properties of welded ultrahigh-strength S960 steel at low and elevated temperatures, *Journal of constructional steel research*, 198, Nov. 2022, 107517

[6] Hrivnjak, I. (1982), *Završljivost čelika*, IRO Građevinska knjiga, Beograd

[7] Steimbregger, C., Gubelj, N., Vuherer, T., Enzinger, N., Ernst, W., Chapetti, M., (2022), Effect of Welding Procedure on the Fatigue Behaviour of High-Strength Steel Butt-Welded joints, *Engineering fracture mechanics*, 275, Nov. 2022, 108845



[8] Zhu, M. L., Kuan, F. Z., (2010), Correlation between microstructure, hardness and strength in HAZ of dissimilar welds of rotor steels, *Materials Science and Engineering A* 527(16-17):4035–4042-527(16-17):4035–4042,

[9] Naib, S., Stefane, P., De Waele, W., Gubeljak, N., Hertelé, S., (2018), Calibration of Hardness Transfer Functions Based on Micro Tensile and All Weld Metal Tensile Tests of Heterogeneous Welds, 18th International Conference on Experimental Mechanics (ICEM18), Brussels, Belgium, 1–5 July 2018. <https://doi.org/10.3390/ICEM18-05372MIG/MAG> – developments in low heat input transfer modes, TWI, dostupno na <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/mig-mag-developments-in-low-heat-input-transfer-modes-133> (25.08.2022.)

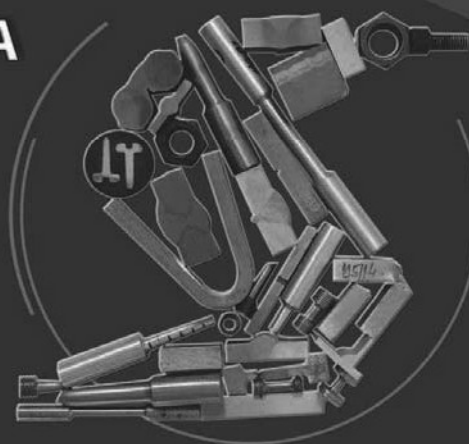
[10] A. S. f. Testing and Materials, ASTM E1820-20ae1: Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness. ASTM, 2020.

[11] Menezes, J. T. O., Ipina, J. E. P., Castrodeza, E. M., (2018), Normalization method for J-R curve determination using SENT specimens, *Engineering fracture mechanics*, 199, Aug. 2018, 658-671

[12] Gubeljak, N., *Celovitost konstrukcij*, Maribor 2006

[13] Aboalriha, W., (2021), Application of Failure Assessment Diagram (FAD) for Steel Welded Connection Based on BS7910 and DNV-RP-108, *EJERS, European journal of engineering and technology research*, Aug. 2021 ISSN: 2736-576X, Vol. 6 , Issue 5

ISPITIVANJE MATERIJALA I ZAVARENIH SPOJEVA



www.sigmalab.rs



064 2142 473



Željko Potkonjak^{1,a}, Murali Kumar^{1,b}, Fiazal Hussain^{1,c}, Rinshad Rahiman^{1,d}

INFLUENCE OF VARIOUS PURGING GASES ON PITTING CORROSION RESISTANCE OF SUPER DUPLEX WELDED PIPES

UTICAJ PRIMENE RAZLIČITIH ZAŠTITNIH GASOVA SA UNUTRAŠNJE STRANE KORENA SUPER DUPELKS CEVNIH ZAVARENIH SPOJEVA NA OTPORNOST PREMA TAČKASTOJ KOROZIJI

Original scientific paper / Originalni naučni rad

Paper received / Rad primljen

August 2024.

Paper accepted / Rad prihvaćen

February 2025.

Author's address / Adresa autora

¹ Drydocks World Dubai, PO. Box 8988, Dubai, UAE

Email / ORCID ID

^a potkonjakz@drydocks.gov.ae / 0009-0004-1360-8418

^b / 0009-0000-3272-0123

^c / 0009-0005-7080-3647

^d / 0009-0003-4403-9388

Keywords: super duplex stainless steel, gas tungsten arc welding, ASTM G48, purging gases, pitting corrosion

Ključne reči: super-dupleks nerđajući čelici, TIG zavarivanje, ASTM G48, tačkasta korozija, zaštitni gasovi

Abstract

Super duplex stainless steel (SDSS) is widely utilized in demanding industries like offshore energy, chemical, and petrochemical sectors due to its exceptional pitting corrosion resistance and mechanical properties. However, welding SDSS presents significant challenge, particularly in meeting stringent pitting corrosion test standards, influenced by various parameters such as consumables, gas combinations, and heat input controls. This study investigated the utilization of different purging gas combinations (100% Ar, 98% Ar + 2% N₂, 100% N₂) during gas tungsten arc welding (GTAW) using the Bohler Thermanit 25/09 welding consumable while keeping a constant shielding gas composition (98% Ar + 2% N₂). Welding was conducted on 6-inch, Sch 80s, ASTM A790, UNS S32750 under identical parameters for all purging gas combinations. The weld root underwent pitting corrosion testing as per ASTM G48, method A, for 24 h at temperatures of 35 and 40°C, with a maximum acceptable weight loss criterion of 4 g/m². Results indicated that only 100% N₂ purging gas achieved corrosion test success at 40°C with minimal weight loss. Furthermore, at 35°C, weight loss decreased significantly across all purging gas combinations. Microstructural analysis of the weld root revealed no significant metallurgical anomalies. The study concludes that 100% N₂ purging gas enhances the pitting resistance of super duplex welded pipes, noting its cost-effectiveness and availability compared to other inert gas mixtures.

Rezime

Super-dupleks nerđajući čelici nalaze široku primenu u zahtevnim oblastima kao što su morska naftna postrojenja, hemijska i petrohemijska industrija zbog njihove izuzetne otpornosti na tačkastu koroziju kao i odličnih mehaničkih osobina. Međutim, zavarivanje super-dupleks čelika predstavlja značajan izazov, posebno vezano za ispunjavanje kriterijuma prihvatljivosti otpornosti na tačkastu koroziju prilikom kvalifikacije procedura zavarivanja. Ovaj rad obrađuje uticaj tri različite kombinacije zaštitnih gasova sa unutrašnje strane za zavarivanje korena zavara (100% Ar, 98% , Ar + 2% N₂, 100% N₂) TIG postupkom na otpornost zavarenog spoja super-dupleks nerđajućih čelika prema tačkasto koroziji. Zavareni uzorci su podvrgnuti testiranju prema standardu ASTM G48 – A Metod, 24 h na 35 i 40°C koristeći kriterijum prihvatljivosti maksimalnog dozvoljenog gubitka težine od 4 g/m². Rezultati su pokazali da samo 100% N₂ postiže zadovoljavajuće rezultate u pogledu gubitka mase na 40°C. Analiza mikrostrukture nije pokazala nikakve vidljive strukturne anomalije u smislu formiranja neželjenih intermetalnih faza.

Studija je pokazala da se korišćenjem 100% N₂ značajno poboljšava otpornost na tačkastu koroziju cevni zavarenih spojeva super-dupleks nerđajućih čelika uz istovremeno značajno smanjenje troškova proizvodnje

The paper was published in its original form in the Proceedings of the 33rd Conference with international participation "Welding 2024" held in Vrnjačka Banja, Serbia from October 2 to 5, 2024.



1. Introduction

SDSSs are widely used across various industries, especially in harsh environments requiring materials with exceptional resistance to corrosion. The term “Super-Duplex” denotes a highly alloyed, high-performance duplex steel with a pitting resistance equivalent¹ (PREN) of >40. Referred to as duplex because of its mixed microstructure with approximately equal proportions of ferrite and austenite. This two-phase microstructure guarantees higher resistance to pitting and stress corrosion cracking in comparison with conventional stainless steels [1].

Cost, availability, and performance are all major factors in material selection [2]. As industry standards evolve, there is an increasing demand for materials suitable for design life requirements extending up to 50 years. SDSS offers a favorable balance between these three criteria making it a strong candidate for such stringent design.

Aside from the excellent corrosion performance of the base material, quality control of SDSS fabrications is another important factor in ensuring localized corrosion resistance at the welded joints. Due to the complex metallurgy of SDSS, welding processes can lead to possible precipitation of undesirable intermetallic phases and compounds inducing a decrease in toughness and/or corrosion resistance [3].

During welding qualifications, the ASTM G48 (Method A) corrosion test is frequently employed to evaluate the localized pitting corrosion resistance of SDSS in chloride-containing environments [4]. Recently, the industry-standard test temperature for this procedure has decreased from 40°C to 35°C, though many end-user specifications still mandate the original 40°C [5]. The primary purpose of the G48 test, in relation to weld metal, is to determine whether intermetallic phases or other corrosion-sensitive defects have formed during the welding process [6, 7].

The primary aim of the G48 test is to simulate the environment within a localized corrosion site on a given stainless-steel surface.

¹PREN = %Cr + (3.3 x %Mo) + (16 x %N) initially derived by K Lorenz, G. Medawar, Thyssenforschung 1, 3 (1969): p. 97-108

As per the Method A test procedure, A corrosion test coupon is exposed to a 6% FeCl₃ solution for a short time (24 h) at a material specific temperature range. At the end of the test, the specimen is examined for weight loss and pitting corrosion against the required acceptance criteria.

Traditionally, 100% argon (Ar) has been used as a purging gas to prevent oxidation of the root pass and minimize the formation of heat tint oxide scales adjacent to the weld. However, fabricators have also utilized gas mixtures such as 98% Ar + 2% nitrogen (N₂) and 100% N₂. Currently, the preferred purging gas in the industry is 100% Ar [8]. However, during welding trials at Drydocks World, some failures were reported during Procedure Qualification Record (PQR) corrosion testing. These failures were like those reported and investigated by others and have been attributed to N₂ loss from the root pass [9]. The extent of nitrogen loss is influenced by the nitrogen concentration gradient between the purge gas and the weld metal [10, 11]. A reduction in N₂ results in a decreased PREN¹, leading to reduced corrosion resistance of the austenitic phase and subsequent preferential corrosion in the weld root during the G48 test [12].

In this study, the corrosion performance of SDSS in the weld root was investigated, particularly in relation to the G48 test, using different purging gases (100% Ar/ 98% Ar + 2%N₂/ 100% N₂).

2. Materials and methods

2.1. Base material and welding consumables

Welding was performed on 6-inch Sch 80S ASTM A790 S32750 pipes using the Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) process. This paper focused on using welding consumable Bohler Thermanit 25/09 (AWS A5.9, ER2594) with a diameter of 2.4 mm. The chemical compositions of the base material and consumable are provided in Table 1.

Table 1. Chemical composition (wt.%) and PREN of parent pipe and weld consumable

Tabela 1. Hemijski sastav (mas.%) i PREN osnovne cevi i dodatnog materijala za zavarivanje

Item	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	W	N	PREN
S32750	0.01	0.36	0.76	0.022	0.001	25.2	7.0	3.79	0.27	-	0.29	>40
Thermanit 25/09	0.01	0.44	0.37	0.021	0.001	25.05	9.41	3.87	0.10	0.02	0.26	42



2.2. Gas combinations and welding parameters

Three purging gas combinations were used:

- 100% Ar (99.995% Ar),
- 98% Ar + 2% N₂, and
- 100% N₂, (>99.9% N₂)

The welding trials were performed in the 5G position. For consistency, the shielding gas composition was kept the same (98% Ar + 2% N₂) throughout the study.

Welding was conducted with controlled heat inputs (maximum of 1.5 kJ/mm) and interpass temperatures kept below 100°C. Cold pass technique was employed, and oxygen content in the purging gas was maintained below 100 ppm. Shielding gas flow rates were maintained between 10 and 15 l/min, while purging gas flow rates ranged from 20 to 25 l/min. Key welding parameters are detailed in Table 2.

Table 2. Welding process parameters used for each welding trial with different purging gases

Tabela 2. Parametri procesa zavarivanja korišćeni za svaki ispitni zavar sa različitim zaštitnim gasovima za zavarivanje korenog zavara

Welding Trial	Purging	Consumable	Amperage (A)	Voltage (V)	Welding speed (mm/min)	Heat Input (kJ/mm)
100Ar.Thr	100% Ar	Thermanit 25/09	81 - 160	9.5 - 13.5	49 - 122	0.54 - 1.11
98Ar.Thr	98%Ar+2%N ₂	Thermanit 25/09	73 - 160	10.4 -13.6	31 - 106	0.78 - 1.39
100N2.Thr	100%N ₂	Thermanit 25/09	86 - 165	10.2 -13.5	51 - 111	0.60 - 1.11

2.3. Post-welding inspection plan

Following the completion of welding trials 100Ar.Thr, 98Ar.Thr, and 100N2.Thr, several inspection tests were completed, including the ASTM G48 test. Details have been provided in following sections.

2.3.1. Visual inspection

All welding trials were visually assessed according to Norsok M-601 Annex B for discoloration.

2.3.2. Radiographic examination

All welding trials underwent radiographic examination in accordance with EN ISO 10675-1 (Level 1).

2.3.3. G48 Pitting corrosion test

As per ASTM G48 Method A, corrosion test coupons were prepared with full wall thickness (25 mm along the weld and 50 mm across the weld) and pickled in a 20% HNO₃ + 5% HF solution at 60°C for 5 minutes. After pickling, the corrosion test coupons were exposed to a 6% FeCl₃ solution for 24 hours at 40°C and 35°C.

2.3.4. Ferrite content examination

Ferrite content was determined using the manual counting method as per ASTM E562. Only

the weld root analysis has been included for the purpose of this study.

2.3.5. Microstructural examination

Specimens were etched in a 40% NaOH solution and then examined under bright microscopic light (50× to 500×). The present study dealt solely with the weld root analysis.

2.3.6. Charpy V-Notch impact test

Charpy impact tests were conducted in accordance with ASTM A370. Only the weld centerline for the 100 N₂ purging gas was assessed.

3. Results and discussion

3.1. Visual examination results

Welding trials 100Ar.Thr, 98Ar.Thr and 100N2.Thr underwent visual examination. The 100% N₂ purging gas welding trials exhibited less heat tinting compared to those welded with 100% Ar and 98% Ar + 2% N₂. The reduced discoloration observed with 100% N₂ could be attributed to its superior inertness, which more effectively displaced oxygen and other reactive gases, thereby minimizing oxidation and heat tinting on the weld surface. In contrast, while both 100% Ar and the Ar-



N_2 mixtures also offered protection against oxidation, they were less effective than 100% N_2 in maintaining a cleaner weld appearance. These findings highlighted the benefits of using 100% N_2 for achieving optimal weld quality and visual aesthetics in highly demanding applications.

3.2. Radiographic examination results

Welding trials *100Ar.Thr*, *98Ar.Thr* and *100N2.Thr* underwent radiographic examination. The examination results were considered acceptable with no indications of porosity. This result demonstrated that the choice of purging gas, whether it is 100% Ar, 98% Ar + 2% N_2 , or 100% N_2 , did not adversely affect the weld quality in terms of defects. Notably, the absence of porosity in the trial welded with 100% N_2 highlighted that, despite its distinct chemical properties, nitrogen provided effective shielding without compromising the integrity of the weld, underscoring the gas's suitability in producing high-quality welded joints.

3.3. G48 Pitting corrosion test results

The ASTM G48 Method A test was completed as detailed in section 2.3.3. Results are detailed below and shown in Figure 1.

3.3.1. Tests at 40°C

Trial 100Ar.Thr exhibited weight loss of 53 g/m² at the 6 o'clock position and 2.29 g/m² at the 9 o'clock position.

Trial 98Ar.Thr showed weight loss of 61.8 g/m² at the 6 o'clock position and 26.04 g/m² at the 9 o'clock position.

Trial 100N2.Thr achieved near-zero weight loss of 0 g/m² at the 6 o'clock position and 0.09 g/m² at the 9 o'clock position, with no visible pits under 20X magnification. This demonstrates the highest pitting resistance among all conditions tested.

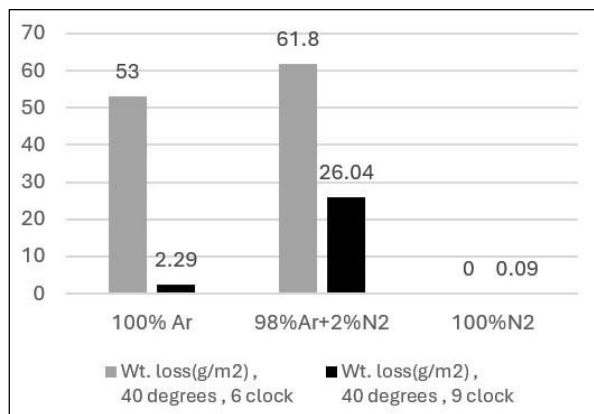
3.3.2. Tests at 35°C

Trial 100Ar.Thr exhibited weight loss of 2.32 g/m² at the 6 o'clock position and 0.14 g/m² at the 9 o'clock position. Minor pitting was observed at the root surface in the 6 o'clock position.

Trial 98Ar.Thr showed weight loss of 8.2 g/m² at the 6 o'clock position and 5.51 g/m² at the 9 o'clock position, with formation of root pits.

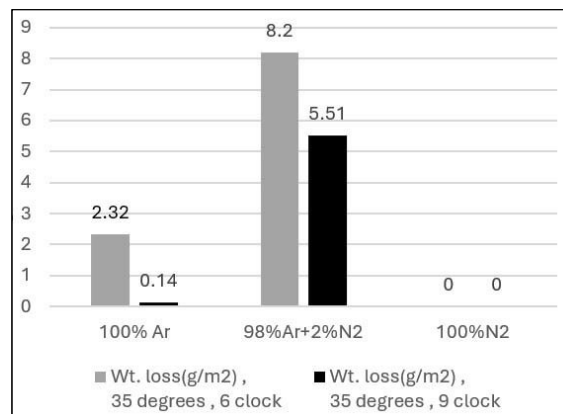
Trial 100N2.Thr achieved negligible weight loss of 0 g/m² at the 6 o'clock position, demonstrating the best corrosion resistance with minimal pitting.

Like the results at 40°C, 100% N_2 purging gas consistently provided the best pitting resistance at 35°C.



(A) Tested at 40°C

(A) Testirano na 40°C



(B) Tested at 35°C

(B) Testirano na 35°C

Figure 1. Summary of G48, Method A, weight loss measurements (g/m²). All tests were made in 6% $FeCl_3$ at 40°C (A) and 35°C (B).

Slika 1. Rezime merjenja gubitka mase (g/m²) prema metodi G48, Metod A. Sva ispitivanja su izvedena u 6% $FeCl_3$ na 40°C (A) i 35°C (B).



3.4. Ferrite examination test results

Ferrite content was evaluated and the results are illustrated in Figure 2.

The examination was performed using the manual counting method in accordance with ASTM E562.

Trial 100Ar.Thr displayed a ferrite content of 53% in both the weld root. The high ferrite content was consistent with the use of 100% Ar as the purging gas, which did not significantly affect the ferrite stability.

Trial 98Ar.Thr displayed a slight reduction in ferrite content, with 51% ferrite in the weld root. The presence of 2% N₂ in the purging gas contributed to a modest decrease in ferrite content, though it remained relatively high compared to the 100% N₂ condition.

Trial 100N2.Thr showed a significant reduction in ferrite content, with values dropping to 34% in the weld root. The drastic reduction was attributed to the role of N₂ as a strong austenite stabilizer, which promotes the formation of austenite and reduces the amount of ferrite in the weld.

The ferrite examination confirmed that the choice of purging gas had a notable impact on ferrite content in super duplex welds. The use of 100% N₂ as a purging gas resulted in a substantial decrease in ferrite content due to its austenite stabilizing effect. This finding supports the conclusion that 100% N₂ not only enhances pitting corrosion resistance but also significantly alters the microstructural properties of the weld metal, aligning with its role as a strong austenite stabilizer.

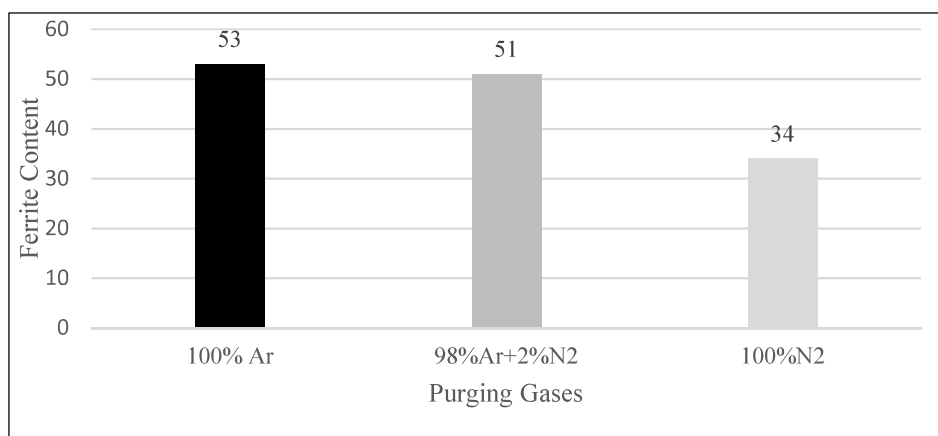


Figure 2. Summary of ferrite content examination of the weld roots using different purging gases.

Slika 2. Rezime ispitivanja sadržaja ferita u korenu zavora pri upotrebi različitih zaštitnih gasova za izavarivanje korenog zavora.

3.5. Microstructural analysis

Microstructural analysis was performed across all welding trials. The findings are presented in in Figures 3A, 3B and 3C.

The microstructure of *Trial 100Ar.Thr* exhibited a combination of ferrite and austenite, along with the presence of secondary austenite. The weld root showed evidence of intermetallic sigma phase, which was confirmed by V2LA etching. Fine and secondary austenite pockets were noted, indicating a generally stable microstructure with some localized phase formation.

The microstructure of *Trial 98Ar.Thr* also revealed a combination of ferrite and austenite, including secondary austenite. No metallurgical anomalies such as carbides, nitrides, or

intermetallic phases were detected in the weld root. Although anomalies were absent in the standard examination, it was noted that the sample failed corrosion testing.

Trial 100N2.Thr displayed a microstructure of ferrite and austenite, including secondary austenite. No metallurgical anomalies such as carbides, nitrides, or intermetallic phases were observed in the weld root. The absence of detrimental phases and the stable microstructural properties aligned with the excellent pitting resistance demonstrated by this welding trial.

The microstructural examinations confirmed that the choice of purging gas affects the microstructure of SDSS weld root. The use of 100% N₂ purging gas resulted in a stable microstructure without significant metallurgical anomalies, consistent with

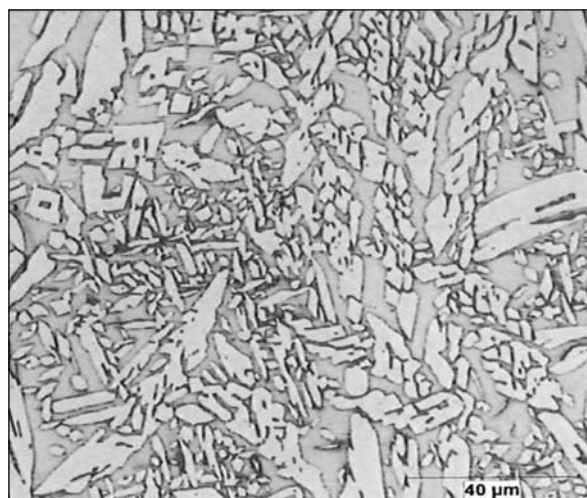


the observed superior pitting corrosion resistance. The presence of secondary austenite and the absence of detrimental phases such as sigma phase or carbides contributed to the overall

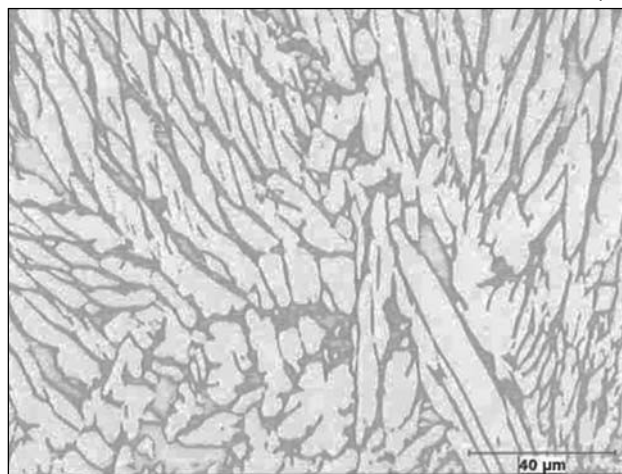
integrity of the weld. Further analysis of the corrosion-failed samples could provide additional insights into the correlation between the microstructure and corrosion performance.



(A) 100Ar.Thr



(B) 98Ar.Thr



(C) 100N2.Thr

Figure 3. Microstructures of weld root runs for the welding trials using different purging gas combinations; including 100% Ar (A), 98% Ar + 2% N₂ (B) and 100% N₂ (C)

Slika 3. Mikrostrukture korena zavara u slučajevima ispitnih zavara izvedenih sa različitim kombinacijama zaštitnih gasova za zavarivanje korenih zavara: (A) 100% Ar, (B) 98% Ar + 2% N₂ i (C) 100% N₂

3.6. Charpy V-Notch impact test results

Given the superior performance in pitting corrosion tests with 100% N₂ purging gas, Charpy impact testing was conducted to assess the impact toughness of the welds at -46°C. The results are summarized in Table 3.

Despite meeting the minimum acceptance criterion of 27 J, the impact toughness results were not as promising as anticipated. Several coupons welded in the 5G position exhibited reduced impact energy, indicating a potential compromise in toughness. This outcome is noteworthy considering

the improved pitting resistance associated with the use of 100% N₂ purging gas.

The observed decrease in impact toughness could be attributed to the high nitrogen content in the weld, which can form chromium nitrides. The formation of these nitrides might contribute to embrittlement and reduced impact energy. Further analysis will be performed to understand the specific effects of nitrogen on the mechanical properties and to determine if there are any correlations between the presence of nitrides and the observed decrease in impact energy.



Table 3. Summary of Charpy impact testing for 100N2.Thr welding trials

Tabela 3. Rezime Charpy ispitivanja udarne žilavosti 100N2.Thr ispitnih zavara

Charpy Impact Trial and sample	WCL 1	WCL 2	WCL 2	Average
100N2.Thr 10x9x55	52 J	47 J	65 J	55 J
100N2.Thr 10x7.5x55	28 J	35 J	35 J	33 J

4. Future directions

While the use of 100% N₂ and 98% Ar + 2% N₂ combinations demonstrates superior pitting corrosion resistance, excessive nitrogen can lead to the formation of chromium nitrides, which might adversely affect toughness properties. Additionally, high nitrogen content can further reduce ferrite levels that typically fall within the commonly accepted range of 30–70%.

To address these issues, future research will focus on the following approaches:

- **Modified Gas Combinations:** Trials will be conducted using 100% N₂ as the purging gas while employing 100% Ar as the shielding gas. This combination aims to reduce nitrogen content and mitigate the formation of chromium nitrides, potentially improving toughness without compromising corrosion resistance.

- **Filler Material Adjustments:** The use of 1.6 mm diameter filler rods will be evaluated for the initial three passes of welding. This adjustment is intended to provide better control over the weld pool and improve overall weld quality, potentially balancing the impacts of nitrogen on both microstructure and mechanical properties.

These modifications will help optimize the balance between corrosion resistance, toughness, and ferrite content, ensuring that the welds meet the required performance standards.



5. Conclusions

- *Optimal pitting corrosion resistance* – The use of 100% N₂ as a purging gas, combined with a shielding gas of 98% Ar/2% N₂, delivers the best pitting corrosion performance for super duplex stainless steel welded pipes, meeting ASTM G48 Method A test requirements at both 40 and 35°C.
- *Variation in weight loss* – Weight loss observed in corrosion tests was notably higher at the 6 o'clock position of the weld coupon compared to the 3 o'clock and 9 o'clock positions. This variation is attributed to the start/stop points of welding and the relatively higher oxygen content during the initial phases of welding.
- *Performance of other gas combinations* – While 100% Ar and 98% Ar/2% N₂ purging gas combinations also provide acceptable pitting corrosion resistance, they are more suitable for applications where the corrosion test temperature is limited to 35°C.
- *Impact on ferrite and austenite content* – The use of 100% N₂ as a purging gas significantly reduces ferrite content and increases austenite in the weld root. This change contributes to enhanced corrosion resistance, highlighting the benefits of nitrogen in stabilizing austenite.
- *Radiographic evaluation* – No evidence of porosity was detected in radiographic evaluations of welds made with 100% N₂ purging gas, indicating that the use of nitrogen does not adversely affect the quality of the weld.

5. Zaključci

- *Optimalna otpornost na tačkastu koroziju* – Upotreba 100% N₂ kao zaštitnog gasa za zavarivanje korenog zavara u kombinaciji sa zaštitnim gasom 98% Ar/2% N₂, je ostvarila najbolju otpornost na tačkastu koroziju kod zavarenih cevi od super-dupleksnog nerđajućeg čelika, ispunjavajući zahteve ASTM G48 (Metod A) testa na temperaturama od 40 i 35°C.
- *Varijacije u gubitku mase* – Gubitak mase tokom korozionih ispitivanja bio je znatno veći na poziciji 6 sati na zavarenom uzorku u poređenju sa pozicijama 3 i 9 sati. Ova varijacija je pripisana početnim i završnim tačkama zavarivanja, kao i relativno višem sadržaju kiseonika u početnim fazama zavarivanja.
- *Performanse drugih gasnih kombinacija* – Iako su kombinacije zaštitnih gasova za zavarivanje korenog zavara 100% Ar i 98% Ar/2% N₂ takođe obezbedile prihvatljivu otpornost na tačkastu koroziju, one su ipak pogodnije za primene gde je temperatura korozionog testa ograničena na 35°C.
- *Uticaj na sadržaj ferita i austenita* – Upotreba 100% N₂ zaštitnog gasa za zavarivanje korenog zavara je značajno smanjila sadržaj ferita i povećala udeo austenita u korenu zavara. Ova promena poboljšava otpornost na koroziju, ističući prednosti azota u stabilizaciji austenita.
- *Radiografska evaluacija* – Nisu otkriveni znaci poroznosti u radiografskim analizama zavara izvedenih sa 100% N₂ kao zaštitnim gasom za ispiranje, što ukazuje na to da azot ne utiče negativno na kvalitet zavara.

References / Literatura

[1] MOA, (2014), Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless Steels, London, 3rd Edition

[2] Schulz, Z., Wachowiak, D., W, T., (2014), Availability and Economics of Using Duplex Stainless Steels, CORROSION 2014, San Antonio, USA

[3] Byrne, G., Schulz, Z., (2014), Optimisation of the Corrosion Resistance of Pipe Butt Welds in Super Duplex Stainless Steels (SDSS), Proc. Conf. European Federation of Corrosion, Pisa, Italy Paper 7805

[4] ASTM G48 (2020), Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by Use of Ferric Chloride Solution, ASTM

[5] Norsok M-601 (2016), Welding and Inspection of Piping, Norsok, Norway

[6] TWI publication No. 5632/19/93, Recommended practice for pitting corrosion testing of duplex stainless steel weldments by the use of ferric chloride solutions, TWI, UK.

[7] Mathiesen, T., Andersen, A., (2014), Challenges in Pre-Qualification Corrosion Testing of CRAs based on ASTM G48, CORROSION 2014, San Antonio, USA



[8] Valiente, M.A., Karlsson, L., (2015), Effect of shielding gas on welding performance and properties of duplex and superduplex stainless steel welds, *Welding in the World*, 59, 239–249

[9] Marco, M., Palombo, M., (2019), What's Wrong with ASTM G48 Qualification Test in Duplex SS welds? *NACE CORROSION 2019*, Houston, Texas, USA

[10] Holloway, G.B., Zhang, Z., Gough, P.C., (2010), Corrosion Testing of Duplex and Superduplex Weld Metal, *Duplex World Conference*, Beaune, France

[11] Byrne, G., (2019), Important Factors in Pipe Butt Welding of Super Duplex Stainless Steel (SDSS) UNS S32760 Using the GTAW Welding Process, *Materials Performance & Welding Technologies Conference 2019*

[12] Westin, E.M., Johannson, M.M., (2014), Effect on microstructure and properties of super duplex stainless steel welds when using backing gas containing nitrogen and hydrogen, *Welding in the World*, 58, 347–354

Vesti

News

4. Međunarodna konferencija o procesima zasnovanim na trenju – 2025

6–8. septembar 2025, IIT Tirupati, Indija

Indijski institut za tehnologiju Tirupati (IITT), zajedno sa Indijskim institutima za tehnologiju u Patni (IITP) i Dharvadu (IITDh), kao i Indijskim institutom za nauku u Bangalore-u (IISc), organizuje 4. Međunarodnu konferenciju o procesima zasnovanim na trenju (ICFP 2025) od 6. do 8. septembra 2025. godine na IITT. Ova konferencija, sa tradicijom dugom 10 godina (od 2014.), predstavlja globalnu platformu za najnovija dostignuća u proizvodnim procesima zasnovanim na trenju, koji se primenjuju u različitim materijalima i industrijama. Obuhvata širok spektar naučnih tema – od osnovnih mehanizama deformacije materijala do industrijskih primena inženjerskih materijala. Fokus je na naprednim metodama trenja u metaloprerađivačkoj industriji, zavarivanju trenjem, linearnom zavarivanju trenjem, aditivnoj proizvodnji zasnovanoj na trenju i srodnim procesima. Konferencija će okupiti istraživače, inženjere i stručnjake iz industrije, čime će doprineti jačanju saradnje između industrijskih kompanija, istraživačkih laboratorija i akademskih institucija. Izvor: <https://www.iitdh.ac.in/4th-international-conference-friction-based-processes-2025-iit-tirupati-india-during-6-8-september>

Bojan Gligorijević

7. Međunarodna konferencija o zavarivanju i ispitivanju bez razaranja i

25. Nacionalna konferencija o zavarivanju i inspekciji i

14. Nacionalna konferencija o NDT i

3. Nacionalna konferencija o aditivnoj proizvodnji

Iranski institut za zavarivanje i ispitivanje bez razaranja (IWNT) organizuje „7. Međunarodnu konferenciju o zavarivanju i ispitivanju bez razaranja“ u saradnji sa Univerzitetom Malek Ašar. Ova konferencija je jedno od vodećih međunarodnih okupljanja posvećenih inovativnim i fundamentalnim dostignućima u oblasti nauke i inženjerstva zavarivanja, kao i ispitivanja bez razaranja. Cilj konferencije je pružanje foruma za naučnike, inženjere i studente iz akademske i industrijske zajednice širom sveta kako bi predstavili svoja istraživanja, podelili najnovija naučna i tehnička dostignuća, razmenili ideje i iskustva, uspostavili poslovnu ili istraživačku saradnju i pronašli globalne partnere za buduće projekte. Pored konferencijskih sesija, događaj će uključivati radionice, izložbe, panel diskusije, kao i takmičenja u tehničkim i fotografskim disciplinama, a u organizaciji stručnjaka iz akademske i industrijske sfere. Izvor: <https://www.icwndt.ir/en/index.php>

Bojan Gligorijević



Prikaz univerzitetskog udžbenika

Razvoj metalurgije i proizvodnje čelika u Republici Hrvatskoj

U izdanju Hrvatskog društva kemijskih inženjera i tehnologa (HDKI), Metalurškog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i Sveučilišta Sjever iz Koprivnice u martu 2024. godine štampan je univerzitetski udžbenik autora prof. dr. sc. Mirka Gojića, redovnog profesora u trajnom izboru, pod naslovom: Razvoj metalurgije i proizvodnje čelika u Republici Hrvatskoj. Udžbenik je u tvrdom povezu, ima 280 stranica formata B5 u boji i štampan je u 800 primeraka. Podeljen je na četiri poglavlja i sadrži ukupno 144 slika i dijagramskih prikaza, kao i 53 tabele i 246 referenci.



Prvo poglavlje se odnosi na crnu i obojenu metalurgiju te na livarstvo, kao posebne segmente. Opisan je početak izgradnje, razvoj i modernizacija proizvodnje nekadašnjih respektabilnih metalurških privrednih subjekata: TEF Šibenik, Tvornica karbida i ferolegura – Dalmacija Dugi Rat, Željezara Sisak, Željezara Split, Tvornica aluminija Lozovac (TAL) itd. Takođe je u udžbeniku obrađen razvoj i proizvodnja Al-proizvoda (primarni i sekundarni aluminijum, limovi, trake, folije itd.) u nekadašnjem TLM-u Šibenik, današnjem Impol-TLM d.o.o. U segmentu livarstva u udžbeniku je dat opšti prikaz livačkih legura i proizvodnja odlivaka, predstavljena je svetska proizvodnja odlivaka u prve dve decenije 21. veka, te proizvodnja odlivaka u Republici Hrvatskoj od druge polovine 20. veka do danas uz prikaz proizvodnog asortimana najvažnijih livnica.

U drugom poglavlju prikazan je razvoj naučne oblasti metalurgije: nastavna, naučna i stručna delatnost u Republici Hrvatskoj u razdoblju 1919.- 2020. godine. Prikazan je i doprinos drugih visokoškolskih i naučnih institucija, te strukovnih društava (Društvo inženjera i tehničara Željezare Sisak, Hrvatsko metalurško društvo, Hrvatsko udruženje za ljevarstvo, itd.), kao i časopisa (Metalurgija, Ljevarstvo, Strojarnstvo, Zavarivanje, Kemija u industriji itd.) u razvoju polja metalurgije.

Treće poglavlje obuhvata proizvodnju čelika u svetu i u Republici Hrvatskoj, kao najvažnijeg metalnog materijala. Dato je značenje i uloga čelika u nacionalnoj privredi, te svetska proizvodnja sirovog gvožđa, čelika (1900.- 2020.), proizvoda direktne redukcije, potrošnje tj. recikliranje čeličnog otpada itd. Objasnjene su najvažnije hemijske reakcije pri proizvodnji čelika (oksidacije ugljenika, silicijuma, mangana, fosfora, odsumporavanje itd.). Obrađena je proizvodnja sirovog gvožđa i čelika u Republici Hrvatskoj od 1938. do 2020. godine uključujući i prikaz privrednih subjekata za proizvodnju sirovog gvožđa i čelika (Talionica Caprag, Željezara Sisak, Željezara Split), asortiman čeličnih proizvoda u razdoblju 1954. – 2020., proizvodnja i potrošnja čelika u razdoblju 1992.-2020., današnja moderna proizvodnja elektročelika (pretapanje čeličnog otpada u elektrolučnoj peći, postupci sekundarne metalurgije: lonac-peć, vakuumska degazacija) u ABS Sisak d.o.o., te nastavna, naučno-istraživačka, stručna i izdavačka delatnost iz proizvodnje čelika.

U četvrtom poglavlju je ukratko opisano osam bivših najistaknutijih osoba koje su najviše doprinele industrijskom razvoju metalurgije i proizvodnje čelika u Republici Hrvatskoj.

Udžbenik ne samo da je namenjen studentima iz područja tehničkih nauka na kojima se obrađuju materijali (posebice metalni materijali), kao i ostalim zainteresovanim iz realnog privrednog sektora iz metalurgije i metalnih materijala. Navedeni udžbenik se može naručiti od Hrvatskog društva kemijskih inženjera i tehnologa (HDKI), Berislavićeva I/6, 10000 Zagreb (e-mail: hdki@hdki.hr ili kui@hdki.hr), po ceni od 25 € po primerku (+ poštarina) uplatom na račun HDKI-ja: IBAN: HR5323600001101367680, opis plaćanja: Knjiga-Razvoj MPC.

Prof. dr. sc. Mirko Gojić, redovni profesor Metalurškog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i Sveučilišta Sjever



Aleksandar Sedmak ^{1,a}, Snežana Kirin ^{2,b}, Tamara Golubović ^{2,c}

OCENA INTEGRITETA ZAVARENIH SPOJEVA PRIMENOM PARAMETERA MEHANIKE LOMA I ANALIZE RIZIKA

STRUCTURAL INTEGRITY ASSESSMENT OF WELDED JOINTS USING FRACTURE MECHANICS PARAMETERS AND RISK BASED APPROACH

Stručni rad / Professional paper

Rad primljen / Paper received

Avgust 2024.

Rad prihvaćen / Paper accepted

Februar 2025.

Adresa autora / Author's address

¹ Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Kraljice Marije 16, Srbija

² Inovacioni centar Mašinskog fakulteta, Beograd, Kraljice Marije 16, Srbija

Email / ORCID ID

^a asedmak@mas.bg.ac.rs / 0000-0002-5438-1895

^b / 0000-0002-2176-3969

^c / 0000-0001-8283-1104

Ključne reči: integritet konstrukcije, zavareni spojevi, parametri mehanike loma, matrica rizika

Keywords: structural integrity, welded joints, fracture mechanics parameters, risk matrix

Rezime

Prikazana je procena integriteta zavarenih spojeva, na osnovu proračuna parametara mehanike loma i analize rizika korišćenjem matrice rizika, sa ciljem poboljšanja bezbednosti zavarenih konstrukcija. Kao studija slučaja prikazana je posuda pod pritiskom, sa defektima tipa prsline, neprihvatljivim prema standardu. Parametar linearne elastične mehanike loma, faktor intenziteta napona, K_I , određen je konzervativnim i pojednostavljenim postupkom, dok je njegova kritična vrednost, žilavost loma, preuzeta iz prethodnih eksperimentalnih istraživanja. Plastični kolaps je takođe uzet u obzir da bi se konstruisao dijagram procene loma i procenila verovatnoća loma, tako da se matrica rizika može dobiti znajući posledice loma.

Abstract

Structural integrity assessment of welded joints is presented, based on calculation of fracture mechanics parameters and risk analysis by using risk matrix, with an aim to improve safety of welded structures. As a case study, pressure vessel is presented, with crack-like defects, non-acceptable according to standard. Linear elastic fracture mechanics parameter, the stress intensity factor, K_I , was determined by the conservative and simplified procedure, whereas its critical value, the fracture toughness, was taken from previous experimental investigations. Plastic collapse was also taken into account to construct the Failure Assessment Diagram and to estimate failure probability, so that risk matrix can be obtained knowing also the consequence of failure.

Rad je u originalnom obliku objavljen u Zborniku radova sa 33. Savetovanja sa međunarodnim učešćem „Zavarivanje 2024“ održanog u Vrnjačkoj Banji, Srbija od 2. do 5. oktobra 2024. godine



1. Uvod

S tačke gledišta integriteta konstrukcija zavareni spojevi su suštinske važnosti za bezbedan rad zavarenih konstrukcija jer su kritična mesta sa smanjenom otpornošću na nastanak i rast prslina u odnosu na osnovni metal. Stoga se procena integriteta zavarenih konstrukcija svodi na procenu integriteta zavarenih spojeva, odnosno primenu parametara mehanike loma [1]. Postoje mnogobrojne metode primene parametara mehanike loma na procenu integriteta konstrukcija [1-4], od inženjerskih procedura, zasnovanih na jednostavnim empirijskim izrazima za određivanja parametara mehanike loma, do sofisticiranih postupaka koji uključuju i detaljnu analizu naponskog stanja komponente sa prslinom, po pravilu metodom konačnih elemenata [5].

U ovom radu će biti primenjena jednostavna inženjerska procedura, zasnovana na primeni dijagrama analize loma (Failure Analysis Diagram – FAD), koja može na konzervativan način da proceni integritet komponente jednostavne geometrije kao što je cevovod, odnosno cilindrična posuda pod pritiskom. Ova procedura je uvedena i detaljno opisana u doktorskoj disertaciji trećeg autora [6], a uz dodatnu analizu rizika, koji daje celinu potrebnu menadžmentu za donošenje odluke kada se pojavi problem grešaka u zavarenim spojevima koje su neprihvatljive po standardu, kao što je pokazano na primeru posuda za komprimovani vazduh u

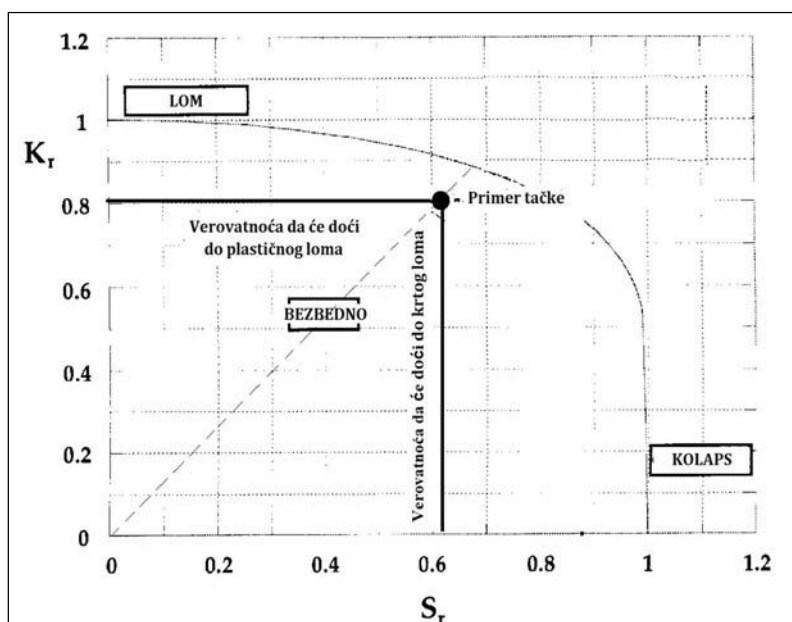
reverzibilnoj hidroelektrani Bajina Bašta (RHE BB) [7]. U ovom radu je navedena inženjerska procedura primenjena na napojni cevovod u RHE BB, kao ilustracija mogućnosti njene upotrebe u kontroli stanja opreme pod pritiskom posle dugotrajne eksploatacije. Potreba za ovakvom analizom proističe iz činjenice da je cevovod napravljen od niskolegiranog čelika povišene čvrstoće Sumiten 80P debljine 47 mm, sa smanjenim stepenom sigurnosti [2,8], što je zahtevalo procenu spremnosti za upotrebu (fitness-for-purpose) u fazi projektovanja, kao preteču procene integriteta [2].

2. Primena parametara mehanike loma na procenu integriteta konstrukcija i verovatnoće događaja

Dijagram analize loma se konstruiše definicijom bezdimenzionih promenljivih $S_r = \sigma_n / \sigma_c$ i $K_r = K_i / K_{ic}$, a nakon primene Dagejlovog modela tečenja trake [9] se dobija granična kriva (Slika 1):

$$K_r = S_r \left[\frac{8}{\pi^2} \ln \sec \left(\frac{\pi}{2} S_r \right) \right]^{-1/2} \quad (1)$$

gde σ_n predstavlja napon u neto preseku, σ_c kritični napon (obično poluzbir napona tečenja i zatezne čvrstoće), K_i faktor intenziteta napona ($K_i = Y \sigma \sqrt{\pi a}$, gde su Y i a poludžina prslina i geometrijski parametar) i K_{ic} žilavost loma.



Slika 1. Dijagram analize loma (FAD)

Figure 1. Failure analysis diagram (FAD)



Primena FAD se zasniva na određivanju koordinata radne tačke (S_r , K_r), pri čemu njen položaj u odnosu na graničnu krivu definiše integritet. Ako je materijal potpuno žilav, konstrukcija se lomi plastičnim kolapsom pri $S_r \geq 1$, dok se krti lom konstrukcije dešava pri $K_r \geq 1$. U ostalim slučajevima postoji međudejstvo plastičnog i krtog ponašanja materijala, tako što je integritet konstrukcije obezbeđen ukoliko je radna tačka „ispod“ granične krive. U slučaju da je radna tačka „iznad“ granične krive, moguć je mešoviti lom.

Takođe, FAD pruža mogućnost kvantifikacije verovatnoće loma, kao što je prikazano na primeru radne tačke ucrtane na Slici 1. Naime, očigledno je

da što je tačka bliže graničnoj krivoj tim je i verovatnoća loma bliža 1, tako da je njen položaj u odnosu na graničnu krivu takođe i merilo verovatnoće, što će biti korišćeno u ovom radu, a detaljnije je opisano u [5, 10].

3. Procena rizika

Rizik može da se jednostavno odredi na osnovu verovatnoće neželjenog događaja i njegove posledice, primenom matrice rizika [5, 11]. U Tabeli 1 je definisano kako se kvantifikuje posledica, a određivanje verovatnoće je već prikazano u prethodnom poglavlju. Primer korišćenja matrice rizika je dat u sledećem poglavlju na primeru napojnog cevovoda RHE BB.

Tabela 1. Matrica rizika [12]

Table 1. Risk matrix [12]

	Posledice				Verovatnoća događaja				
	Ljudi	Imovina	Životna sredina	Reputacija	1	2	3	4	5
					Zanemarljiva	Mala	Umerena	Srednja	Velika
0	Nema povreda	Nema gubitka	Nema oštećenja	Nema povreda					
1	Beznačajne povrede	Gubitak do 10 hiljada EUR	Malo oštećenje okoline	Beznačajne posledice. Postoji svest među zaposlenima i stanovništvu.		MALI RIZIK			
2	Male povrede	Gubitak 180.000 do 540.000 EUR	Umerene posledice. Manje oštećenje okoline. Manji trosak.	Male posledice. Postoji zabrinutost na lokalnom nivou.					
3	Ozbiljne povrede	Gubitak od 540.000 do 1,8 miliona EUR	Srednje posledice. Ograničeno oštećenje okoline (finansijska investicija).	Umerene posledice. Postoji zabrinutost na regionalnom nivou			SREDNJI RIZIK		
4	Permanentna nesposobnost	Gubitak od 1,8 do 50 miliona EUR	Velike posledice. Ozbiljne štete za okolinu. Velike investicije.	Srednje posledice. Postoji zabrinutost na nacionalnom nivou.					
5	Smrt	Gubitak preko 50 miliona EUR	Ogromne posledice. Dugotrajno i značajno oštećenje okoline. Ogroman trošak.	Ogromne. Postoji zabrinutost i reakcija na međunarodnom nivou.			VELIKI RIZIK		



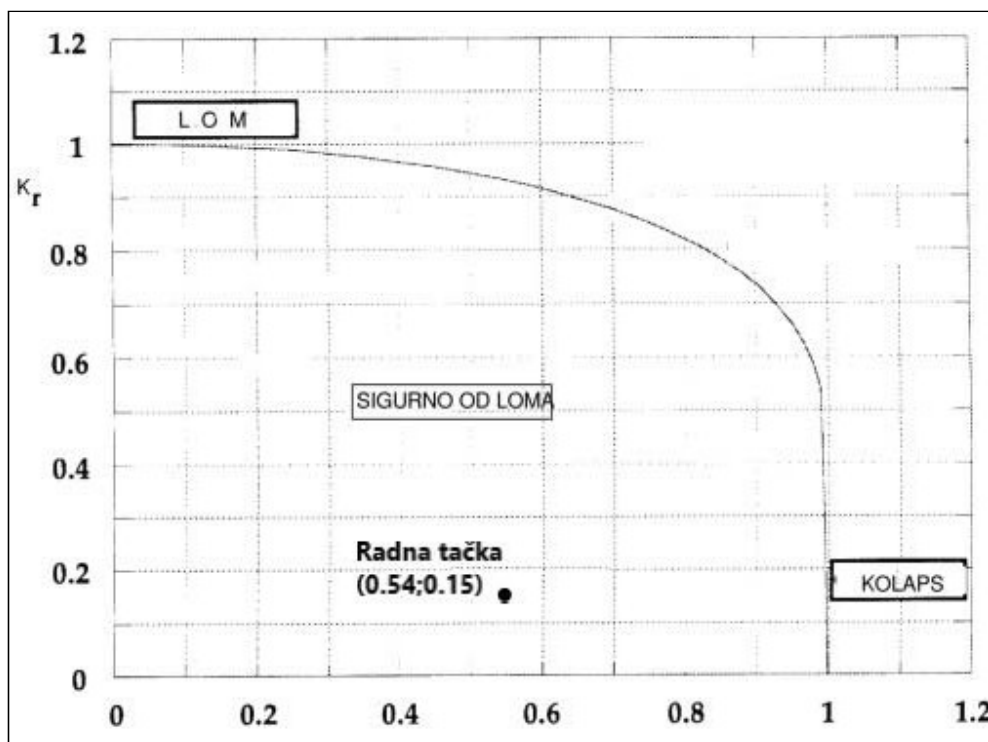
4. Rezultati i diskusija

Napojni cevovod je analiziran detaljno u [2, 8], tako da se u ovom radu navode samo osnovni podaci koji su korišćeni za procenu verovatnoće i posledice.

Eventualnu posledicu je relativno jednostavno proceniti jer se svakako radi o kategoriji 5, pošto bi lom cevovoda mogao da izazove sve što je navedeno u Tabeli 1 za tu kategoriju. Za procenu verovatnoće merodavne veličine su:

- Obimski napon 402 MPa (prečnik 4200 mm, pritisak 9 MPa, debljina 47 mm), napon tečenja metala šava 700 MPa i zatezna čvrstoća 800 MPa (poluzbir 750 MPa). Ako se pretpostavi neprovar debljine 4 mm, kao tipična greška za podužne zavarene spojeve velike debljine koji se rade u nekoliko prolaza, onda se za X koordinatu dobija $S_r = \sigma_r / \sigma_c = 402 / 750 = 0.54$.
- $K_{Ic} = 212 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ za metal šava ($K_{Ic} = 255 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ za osnovni metal), $K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a} = 31.6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ($Y=1$ za centralnu prslinu), pa se za Y koordinatu dobija $K_I / K_{Ic} = 0.15$.

Radna tačka sa koordinatama (0.54, 0.15) je prikazana na sl. 2, a na osnovu čega je verovatnoća procenjena kao umerena (0.55).



Slika 2. Radna tačka u FAD

Figure 2. Assessment point in the FAD

Na osnovu podataka za verovatnoću (umerena) i posledicu (kategorija 5) napravljena je matrica rizika (Tabela 2) koja ukazuje na veliki rizik pri radu

cevovoda sa greškom tipa neprovar veličine 4 mm po celoj dužini šava.

**Tabela 2. Matrica rizika za cevovod RHE BB****Table 2. Risk matrix for RHE BB pipeline**

		Verovatnoća				
		1	2	3	4	5
		Zanemarljiva	Mala	Umerena	Srednja	Velika
Posledica	1					
	2					
	3					
	4					
	5			Cevovod RHE BB		

Na osnovu procenjenog rizika odluku o daljem postupku donosi menadžment vlasnika opreme, imajući u vidu i mogućnosti zamene, popravke i posledice zastoja u ta dva slučaja. U već pomenutom slučaju posuda za komprimovani vazduh u RHE BB [10], odluka je bila da se nastavi sa radom kod srednjeg rizika, a da se posebnim postupkom smanji veliki rizik na srednji, kao što je opisano u [13].

Treba naglasiti da je značaj ove procedure u pripremi potrebnih analiza za redovni remont i primenu IBR fokusiranu na greške koje mogu da budu kritične. Prikazani primer je fiktivan, dok je stvarna analiza neprihvatljivih grešaka, utvđenih na osnovu IBR ispitivanja, prikazana u slučaju posuda za komprimovani vazduh u RHE BB [14]. Ova procedura može da se primeni i u fazi projektovanja da bi se unapred znalo kakav je stvarni uticaj neprihvatljivih grešaka, imajući u vidu da je klasično projektovanje izrazito konvencionalno.

5. Zaključak

Na osnovu prikazanih rezultata može da se zaključiti sledeće:

- Jednostavna inženjerska procedura procene integriteta daje realne rezultate i korisne podatke ako se primeni na zavarene konstrukcija jednostavnog oblika i naponskog stanja, kao što je napojni cevovod RHE BB.
- Procena rizika daje dobru osnovu za donošenje odluka o daljem postupanju u slučaju da se metodama IBR utvrde neprihvatljive greške u zavarenim spojevima.

5. Conclusion

Based on the presented results, the following conclusions can be drawn:

- A simple engineering integrity assessment procedure provides realistic results and useful data when applied to welded structures with simple geometries and stress states, such as the RHE BB feed pipeline.
- Risk assessment serves as a solid foundation for decision-making regarding further actions if NDT methods identify unacceptable defects in welded joints.



Literatura / References

- [1] Sedmak, A. (2003), Primena mehanike loma na integritet konstrukcija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Srbija
- [2] Sedmak, A., Sedmak, S., Milović, Lj., (2011), Pressure Equipment Integrity Assessment by Elastic-Plastic Fracture Mechanics Methods, Society for Structural Integrity and Life, Belgrade
- [3] N. Gubelj, J. Predan, I. Rak, D. Kozak, (2009), Integrity assessment of HSLA steel welded joint with mis-matched strength, Structural Integrity and Life, 9(3), 157-164
- [4] Anderson, T.L., (2017), Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications 4th Edition, CRC Press
- [5] Martić, I., (2018), Uticaj ispitivanja probnim pritiskom na nastanak i rast prslina u zavarenim spojevima opreme pod pritiskom, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Srbija
- [6] Golubović, T., (2018), Integracija ljudskih i organizacionih faktora u model procene rizika i integriteta opreme pod pritiskom, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, Srbija
- [7] Jovičić, R., Jeremić, L., Milošević, N., Sedmak, A., Milovanović, N., (2021), Repair welding of pressure equipment with unacceptable defects, Structural Integrity and Life, 21(2), 163-167
- [8] Jeremić, L., (2020), Procena integriteta zavarenih konstrukcija projektovanih sa smanjenim stepenom sigurnosti, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Srbija
- [9] Dugdale D.S., (1960), Yielding in Steel Sheets Containing Slits. J Mech Phys Solids, 8(2), 100–104
- [10] Golubović, T. et al., (2018), Novel Risk Based Assessment of Pressure Vessels Integrity, Tehnički vjesnik, 25(3), 803-807
- [11] Đorđević, P., Kirin, S., Sedmak, A., Džindo, E., (2011), Analiza rizika integriteta konstrukcija, Structural Integrity and Life, 1(2), 134-138
- [12] Vučetić, I. et al., (2018), Risk Analysis in the Case of Air Storage Tank Failure at RHPP Bajina Bašta, Structural Integrity and Life, 18(1), 3-6
- [13] Vučetić, T. et al., (2022), Stiffener as a special design solution for pressure vessel repair, Structural Integrity and Life, 22(2), 263-266
- [14] Sedmak, A. et al., (2021), How to deal with cracked welded structure – Application of Fracture Mechanics parameters to Structural Integrity Assessment, ASR International Conference "Welding 2021", Resice, Czech Republic

**Članstvo u strukovnoj asocijaciji DUZS
je referenca za Vaš profesionalni status**
Odlukom Skupštine DUZS članarina za 2025. godinu iznosi
5.000,00 dinara

**Uplatom članarine stičete pravo na GRATIS godišnje izdanje
časopisa "ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE"**

Tekući račun DUZS: 325-9500600002588-46

Informacije

+ 381 (11) 2420-652

duzs011@gmail.com





Aleksandra Mitić ^{1,a}, Djordje Ivković ^{1,b}, Dušan Arsić ^{1,c}, Srbslav Aleksandrović ^{1,d}, Vukić Lazić ^{1,e}, Vladimir Milovanović ^{1,f}, Andjela Mitrović ^{1,g}

PROCENA MEHANIČKIH OSOBINA SUČEONO ZAVARENIH SPOJEVA OD KONSTRUKCIONOG ČELIKA IZVEDENIH NA ROBOTU MAG POSTUPKOM

EVALUATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF BUTT-WELDED JOINTS OF STRUCTURAL STEEL PERFORMED BY A ROBOT USING THE MAG PROCESS

Stručni rad / Professional paper

Rad primljen / Paper received

Septembar 2024.

Rad prihvaćen / Paper accepted

Januar 2025.

Ključne reči: S235JR, robotsko zavarivanje, ispitivanje zatezanjem, udarna žilavost

Rezime

Cilj ovog rada je da se prikažu rezultati mehaničkih ispitivanja ugljeničnog konstrukcionog čelika S235JR i njegovih sučeono zavarenih spojeva koji su izvedeni na robotu AG postupkom. Za zavarivanje pripremljen je jedan par ploča dimenzija 200x500 mm, debljine 12 mm. Priprema ploča sastojala se iz laserskog sečenja i pripreme žleba za zavarivanje. Za zavarivanje, shodno debljini osnovnog materijala pripremljen je V žleb mašinskom obradom na CNC glodalici. Za zavarivanje je takođe pripremljena i posebna bakarna podloška. Kao dodatni materijal odabrana je elektrodna žica prečnika 1.2 mm, standardne oznake G42 4 C/M 3Si1 prema EN ISO 14341-A. Za usvojeni dodatni materijal odabrani su parametri zavarivanja korenog zavara i ostalih zavara popune. Po završetku zavarivanja sprovedena su ispitivanja bez razaranja (IBR) i to vizuelno ispitivanje, ispitivanje penetrantima i ispitivanje ultrazvukom. Ispitivanja su pokazala da je zavarivanje uspešno izvedeno. Po završetku zavarivanja iz osnovnog materijala i njegovih zavarenih spojeva, pripremljeni su odgovarajući uzorci i izvršena su ispitivanja zatezanjem i ispitivanja udarne žilavosti. Dobijeni rezultati su analizirani, a u radu je takođe data i ocena pogodnosti primene robotskog zavarivanja za ovaj tip osnovnog materijala i pripremljenu geometriju spoja (iz aspekta mehaničkih osobina i kvaliteta zavarenog spoja). Osim eksperimentalnih rezultata u radu su prikazani detaljno opisani postupci pripreme delova za zavarivanje, uzoraka za ispitivanje kao i samih ispitivanja sa i bez razaranja.

Adresa autora / Author's address

¹ Faculty of engineering, Sestre Janjić 6, 34000, Kragujevac, Srbija

Email / ORCID ID

^a /0009-0008-6443-0014

^b djordje.ivkovic@fink.rs / 0000-0002-5747-7876

^c / 0000-0003-0326-0898

^d / 0000-0001-5068-5560

^e / 0000-0001-9362-7184

^f / 0000-0003-3071-4728

^g / 0009-0008-5300-5653

Keywords: : S235JR, robot welding, tensile testing, impact toughness

Abstract

The aim of this paper is to present the results of mechanical testing of the carbon structural steel S235JR and its butt-welded joints, which were performed using a robot (MAG process). One pair of plates with dimensions 200x500 mm and a thickness of 12 mm was prepared for welding. The preparation involved laser cutting and groove preparation for welding. A V-groove was machined on a CNC milling machine, in accordance with the thickness of the base material. Additionally, a special copper backing strip was prepared for welding. The filler material selected was electrode wire with a diameter of 1.2 mm, designated G42 4 C/M 3Si1 according to EN ISO 14341-A. Welding parameters were selected for both the root weld and the filler welds based on the chosen filler material. After welding, non-destructive testing (NDT) was conducted, including visual inspection, penetrant testing, and ultrasonic testing. The tests confirmed that the welding was successfully performed. Upon completion of welding, samples were prepared from the base material and its welded joints and tensile and impact toughness tests were conducted. The obtained results were analyzed, and the paper also provides an assessment of the suitability of robotic welding for this type of base material and the prepared joint geometry (in terms of mechanical properties and weld quality). In addition to the experimental results, the paper presents detailed descriptions of the procedures for preparing parts for welding, testing samples, as well as the testing itself, both destructive and non-destructive.

Rad je u originalnom obliku objavljen u Zborniku radova sa 33. Savetovanja sa međunarodnim učešćem „Zavarivanje 2024“ održanog u Vrnjačkoj Banji, Srbija od 2. do 5. oktobra 2024. godine.



1. Uvod

Zavarivanje čelika, legure gvožđa i ugljenika, predstavlja složeni fizičko-metalurški proces u kojem dolazi do spajanja dva ili više predmeta. Kako bi se dobio kvalitetan zavareni spoj, potrebno je uložiti veliki napor i izvršiti temeljne pripreme, kako u pogledu izbora i pripreme šava, izbora dodatnog materijala i parametara zavarivanja, tako i izbora adekvatne tehnike zavarivanja prema tipu spoja i njeno pravilno izvođenje. Takođe, ovde treba naglasiti da dobri zavarivači u najvećem broju slučajeva nemaju problema sa pravilnim izborom tehnike i njenim izvođenjem. U savremenim industrijskim postrojenjima, zbog razvoja računara i elektrotehnike, sve češće se ljudski rad zamenjuje radom robota. Uzroci ove pojave su brojni, od kojih se ističu veća produktivnost robota kao i mogućnost robota da rade u otežanim uslovima, koji ne odgovaraju ljudima (visoke i niske temperature, toksične sredine i sl.).

Zavarivanje u ovom slučaju ne predstavlja izuzetak, a u poslednjih par godina postoje veliki naponi da se rad ljudi potisne radom robota. Potrebno je naglasiti da primena robotskog zavarivanja ima brojne prednosti (pravolinijsko vođenje, konstantna brzina zavarivanja, velika produktivnosti itd.), ali i nedostatke. Kao glavni nedostatak može se navesti to da robot za razliku od zavarivača, nema sopstveni vid te mu izostaje sposobnost vizuelnog praćenja procesa zavarivanja, donošenje zaključka o topljenju i mešanju materijala kao i korekcije putanje usled neadekvatno pripremljenog žleba. Ideja autora ovog rada je da proveri mehaničke osobine sučeono zavarenih spojeva dobijenih MAG zavarivanjem ploča od konstrukcionog čelika, pri čemu je zavarivanje izvedeno na robotu. [1, 2]

2. Eksperiment

2.1 Plan eksperimenta

U okviru eksperimentalnih ispitivanja koja se sprovode radi ocene mehaničkih osobina zavarenih spojeva čelika S235JR izvedena su ispitivanja na zatezanje osnovnog materijala i zavarenih spojeva, kao i ispitivanje udarne žilavosti osnovnog materijala na sobnim i sniženim temperaturama kao i nekih karakterističnih zona samog zavarenog spoja takođe na sobnim i sniženim temperaturama.

2.2 Priprema

Za potrebe sprovođenja eksperimentalnih ispitivanja neophodno je izvršiti temeljne pripreme. U pripremnom procesu spremljen je jedan par ploča dimenzija 200x500 mm, debljine 12 mm, od čelika S235JR. Hemijski sastav i mehaničke osobine čelika prikazane u tabelama 1 i 2. Na osnovu sadržaja ugljenika kod ovog čelika može se zaključiti da pripada grupi zavarljivih čelika tj. može se uspešno zavariti bez prethodnog predgrevanja i naknadne termičke obrade.

Priprema ploča podrazumevala je seču ploča na laseru i njihovu mašinsku obradu kako bi se dobio žleb odgovarajuće geometrije. U ovom slučaju pripremljen je tzv V-žleb, s obzirom na debljinu ploča koje treba zavariti. Budući da je pripremljene ploče trebalo sučeono zavariti, pripremljena je i tzv. podložna ploča od bakra. Njena uloga je da omogući dobijanje korena odgovarajućih karakteristika. Njene dimenzije su 60x10 mm dužine 520 mm. Na slici 1 prikazan je process pripreme ploča i podložne ploče.

Tabela 1. Hemijski sastav čelika S235JR prema EN10025-2 [3]

Table 1. Chemical composition of steel S235JR according to EN 10025-2 [3]

Hemijski element	C	Mn	P	S	N	Cu
Hemijski sastav, (mas. %)	max 0.2	max 1.4	max 0.04	max 0.04	max 0.012	max 0.55

Tabela 2. Mehaničke osobine čelika S235JR prema EN10025-2 [3]

Table 2. Mechanical properties of steel S235JR according to EN 10025-2 [3]

Mehaničke karakteristike	ReH, MPa	Rm, MPa	A, %	KV, J (+20°C)
	min 235	360-510	17	min 27



a)



b)

Slika 1. Mašinska obrada ploča za zavarivanje (a) podložne bakarne ploče (b)

Figure 1. Machining of plates for welding (a) backing copper plates (b)

2.3 Izbor dodatnog materijala i parametara za zavarivanje

Po završetku mašinske obrade, usledio je odabir odgovarajućeg dodatnog materijala. Budući da je reč o MAG zavarivanju, dodatni materijal je elektrodna žica.

U ovom slučaju odabrana je elektrodna žica proizvođača Elektroda Zagreb d. d. komercijalne oznake SG-2 tj. standardne oznake prema EN ISO 14341-A: G 42 4 C/M 3Si1. prečnika $d = 1.2$ mm. Hemijski sastav elektrodne žice, kao i njene mehaničke osobine prikazane su u tabelama 3 i 4.

Tabela 3. Hemijski sastav elektrodne žice SG-2 [4]

Tabela 3. Chemical composition of filler material SG-2 [4]

Hemijski sastav, mas. %	C	Mn	Si	Cu
Oznaka žice prema EN ISO 14341-A	0.06-0.13	1.4-1.6	0.7-1.0	≤ 0.3

Tabela 4. Mehaničke karakteristike elektrodne žice SG-2 [4]

Table 4. Mechanical properties of filler material SG-2 [4]

Mehaničke karakteristike	R_{eH} , MPa	R_m , MPa	A, %	KV (-20°C), J
Oznaka žice prema EN ISO 14341-A	min 430	500-640	min 22	min 47

Za odabrani dodatni materijal, njegov prečnik i tip spoja definisani su parametri zavarivanja koji su prikazani u tabeli 5. Potrebno je naglasiti da su

definisani posebni parametri za prvi/koreni prolaz i za ostale prolaze popune.

Tabela 5. Parametri zavarivanja

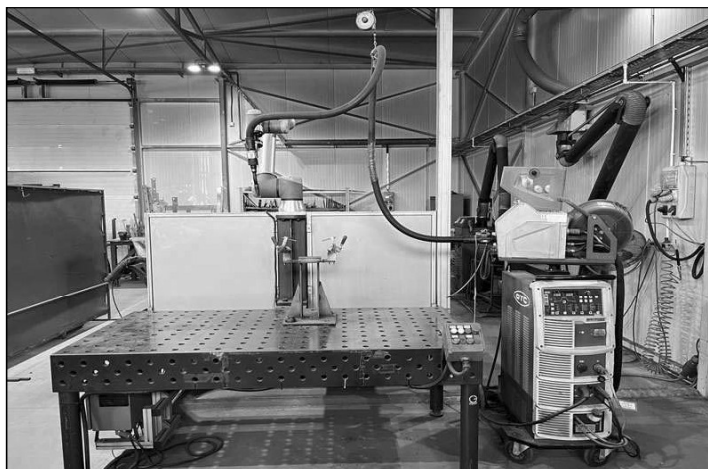
Table 5. Welding parameters

Parametri zavarivanja	I, A	U, V	v_z , cm/s	Q_{gas} , l/min	Zaštitni gas	q_l , J/cm
Prvi prolaz	170	23	0.4	14	M21	7820
Ostali prolazi	310	27	0.7	14	M21	9565



2.4 Oprema za zavarivanje

Kada su definisani parametri zavarivanja pristupilo se postavljanju čeličnih ploča i bakarne podloške na radni sto robota. Kompletно radno mesto prikazano je na slici 2.



Slika 2. Prikaz radnog mesta za robotsko zavarivanje

Figure 2. Workplace for robotic welding

Radno mesto se sastoji iz tri celine:

1. Robotske ruke sa zavarivačkim pištoljem,
2. Jedinice za zavarivanje i
3. Radnog stola.

Robotska ruka nosi oznaku OTC FD-V8L japanskog proizvođača OTV čije su tehničke karakteristike prikazane u tabeli 6. Jedinica za zavarivanje je proizvođača DAIHEN VARSTROJ oznake WB-P500L, čije su tehničke karakteristike prikazane na slici 3.

Tabela 6. Opšte karakteristike robota za zavarivanje [5]

Table 6. Characteristics of welding robot [5]

Karakteristike robota OTC FD-V8	
Broj stepeni slobode	6
Težina	8 kg
Ponovljivost	± 0.08 mm
Snaga	5000 W



Slika 3. Tehničke karakteristike uređaja za zavarivanje

Table 3. Specifications of welding device



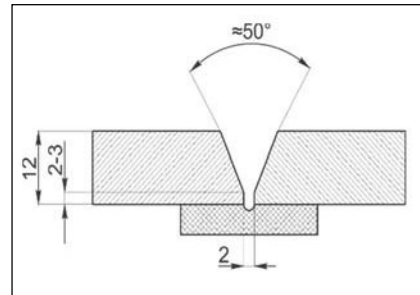
2.5 Zavarivanje i ispitivanje metodama bez razaranja

Na prikazani radni sto izvršeno je postavljanje ploča za zavarivanje kao i postavljanje bakarne podložne ploče. Kada je izvršeno postavljanje i odgovarajuće centriranje elemenata spoja, celokupni sistem je stegnut odgovarajućim pritezačima kako bi se onemogućilo pomeranje u toku zavarivanja.

Pritezanjem svih elemenata dobijen je šav prikazan na slici 4 pod a), a njegove geometrijske karakteristike prikazane su na slici 4 pod b). Posle stezanja elemenata, izvršeno je postavljanje početnog položaja zavarivačkog pištolja i programiranje putanje kretanja. Kada je putanja isprobana, zadata je realna brzina kretanja i izvršena je proba kretanja robota.



a)



b)

Slika 4. Prikaz dobijenog žleba posle učvršćivanja elemenata (a) geometrijske karakteristike žleba (b)

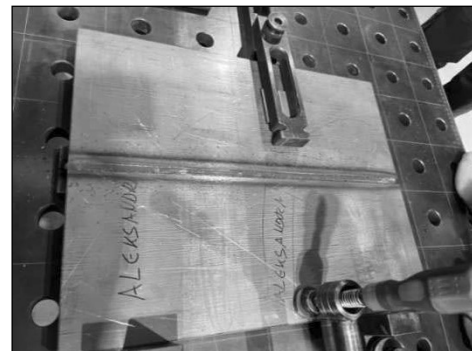
Figure 4. Illustration of the groove (a) groove geometry (b)

Budući da se na testu nije bilo većih problema, započeto je višeprolazno zavarivanje. Zavarivanje je izvršeno a na slici 5 prikazana je progresivna popuna V-žleba.

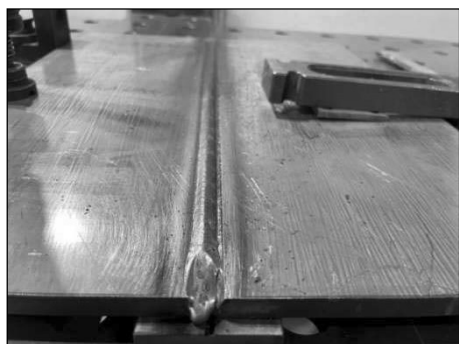
Prva dva prolaza izvedena su tako da se zavarivački pištolj kretao po osi žleba a naneti su direktno jedan iznad drugog. Treći prolaz je blago izmešten u levu stranu a potom je četvrti prolaz nanet pored njega.



Prvi prolaz



Drugi prolaz



Treći prolaz



Četvrti prolaz

Slika 5. Prikaz postupka popune šava višeprolaznim zavarivanjem

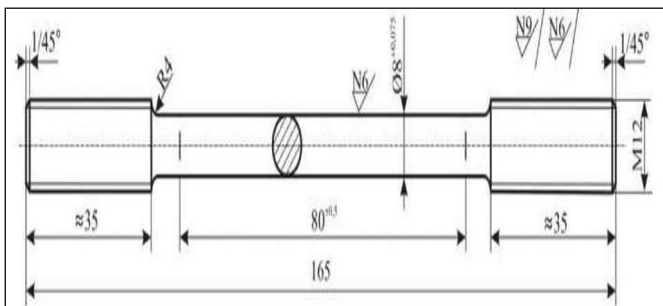
Figure 5. Illustration of filling procedure in multi-pass welding



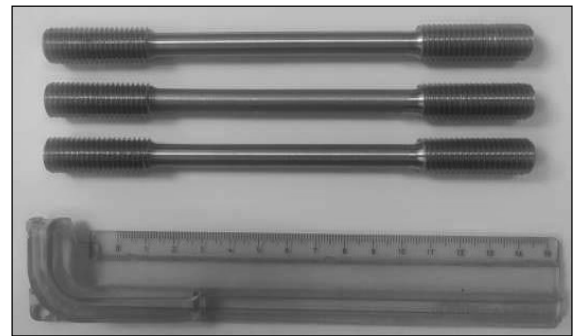
Zbog unete toplote tokom zavarivanja zavarena ploča se deformisala i izgubila je ravnost, te se odmah posle zavarivanja, dok se ploče još uvek nisu ohladile ispravile na presi kako bi bile što ravnije. Posle ispravljanja usledilo je hlađenje i kontrola metodama ispitivanja bez razaranja. U konkretnom slučaju sprovedena su ispitivanja penetrantnim tečnostima i ultrazvukom. Obe metode nisu pokazale prisustvo nedozvoljenih grešaka te se pristupilo daljoj pripremi uzoraka za ispitivanje.

2.6 Ispitivanje metodama sa razaranjem

Za ispitivanje zatezanjem iz zavarenih ploča pripremljeni su cilindrični uzorci prečnika $d=8\text{ mm}$, merne dužine $L_0=80\text{ mm}$ (slika 6). Ispitivanje na zatezanje izvršeno je na univerzalnoj mašini za ispitivanje proizvođača ZWICK ROELL Z/100 (slika 7), brzina kretanja čeljusti pri ispitivanju je bila 10 mm/min . Ispitivanje udarne žilavosti izvršeno je metodom po Šarpiju I pripremljeni su standardni uzorci deimenzija $10\times 10\text{ mm}$, sa za U- zarezom dubine 2 mm (slika 8).



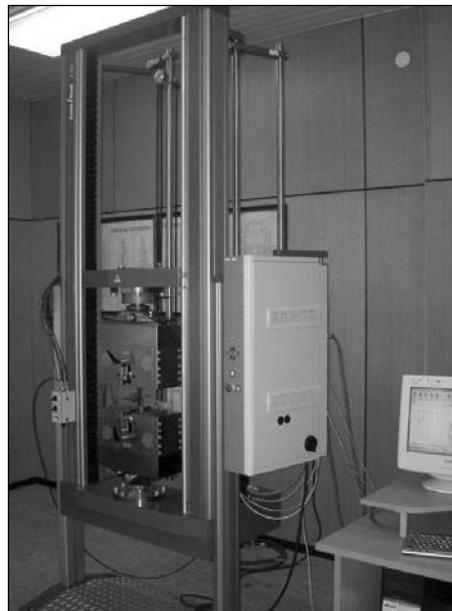
a)



b)

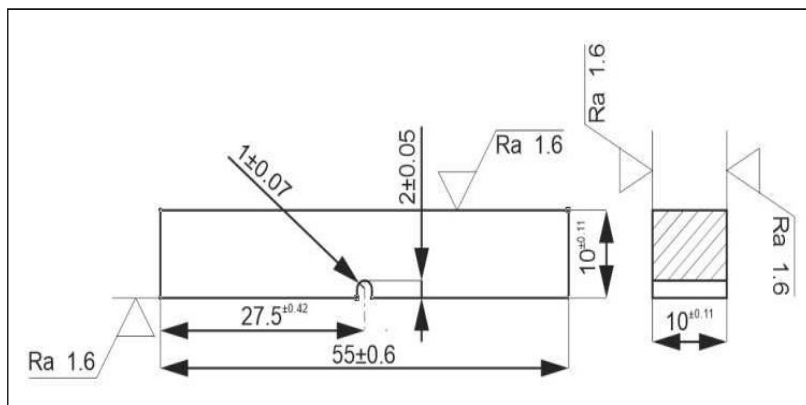
Slika 6. Prikaz uzoraka za zatezanje, shematski (a), realno pripremljeni (b) [6, 7]

Figure 6. Illustration of tensile testing specimens, schematic (a), after machining (b) [6,7]

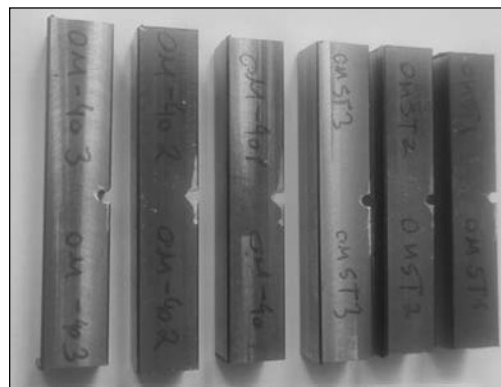


Slika 7. Prikaz univerzalne mašine za ispitivanje ZWICK ROELL Z/100

Figure 7. Universal tensile testing machine ZWICK ROELL Z/100



a)



b)

Slika 8. Prikaz uzoraka za ispitivanje po Šarpiju, shematski (a), realno pripremljeni (b)

Figure 8. Illustration of Charpy specimens, schematic (a), after machining (b)

3. Rezultati i diskusija

3.1 Ispitivanje zatezanjem

Rezultati ispitivanja zatezanjem uzoraka iz osnovnog materijala i zavarenih spojeva prikazani su u tabeli 7. Dijagrami zatezanja prikazani su na slici 9.

Rezultati ispitivanja ukazuju na to da je napon tečenja osnovnog materijala približno jednak naponu tečenja uzoraka iradenih iz zavarene ploče.

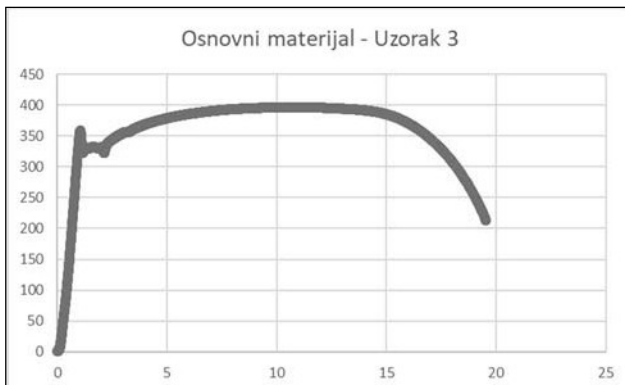
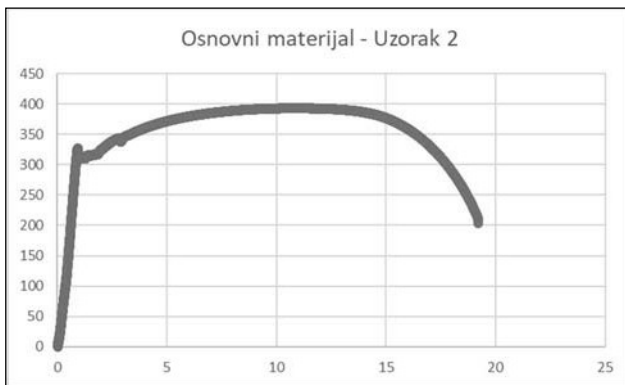
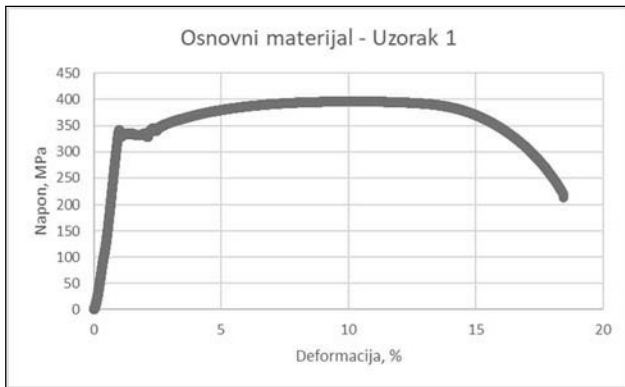
Osim što uzorci iz zavarenih spojeva imaju veći napon tečenja, takođe imaju u veću vrednost zatezne jačine kao i veće izduženje i kontrakciju.

Dobijeni rezultati su očekivani s obzirom na to kakve su vrednosti predočene u tabeli 4, gde se jasno vidi da dodatni materijal ima veće vrednosti izduženja i kontrakcije. Pad jačine zavarenog spoja u odnosu na dodatni materijal predstavlja posledicu mešanja dodatnog materijala sa slabijom osnovnim materijalom.

Tabela 7. Rezultati ispitivanja zatezanjem

Table 7. Tensile testing results

Uzorci		R_{eH} , MPa	R_m , MPa	A, %	Z, %
Osnovni materijal	1	334	396	17.68	78.03
	2	311	393	18.54	75.62
	3	327	396	18.81	78.61
Zavareni spoj	1	335	400	24.52	75-62
	2	330	398	23.44	74.37
	3	333	400	24.01	74.37



Slika 9. Prikaz dijagrama zatezanja dobijenih ispitivanjem zatezanjem

Figure 9. Stress strain curves obtained during tensile test

3.2 Ispitivanje udarne žilavosti

Dobijeni rezultati ispitivanja udarne žilavosti osnovnog materijala i zavarenog spoja na sobnim i sniženim temperaturama, metodom po Šarpiju prikazani su u tabeli 8. Osnovni materijal pokazuje veliku žilavost na sobnim temperaturama, dok se na sniženim temperaturama uočava izuzetan pad udarne žilavosti. Ova pojava je očekivana s obzirom na samu kristalnu rešetku ovog čelika (A2) koju karakteriše izraženi pad žilavosti sa sniženjem temperature.

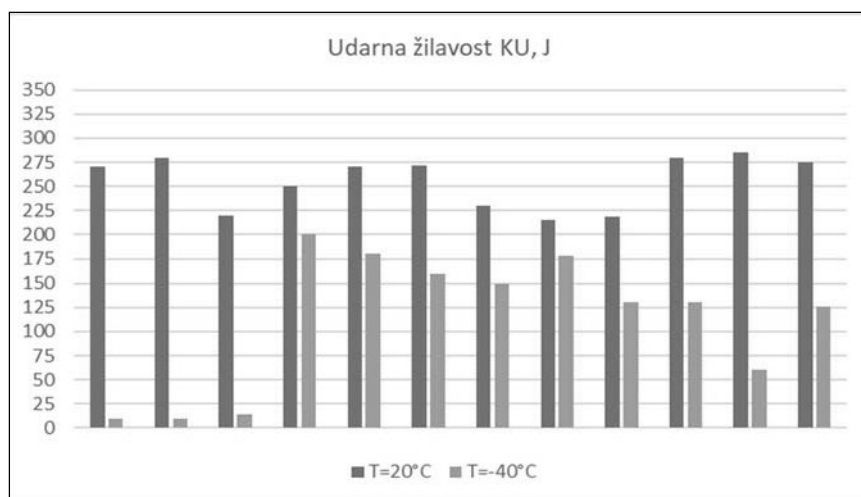
Kod zavarenih spojeva može se uočiti uobičajeni trend da sa sniženjem temperature u svim zonama zavarenog spoja dolazi do pada udarne žilavosti kao i do prelaska iz žilavog u krti lom. Poređenjem udarne žilavosti osnovnog materijala sa žilavošću različitih zona u zavarenom spoju zaključuje se da su vrednosti bliske iako. Na ispitanim uzorcima sa sniženjem temperature uočava se pad udarne žilavosti 20%-50% (Slika 10), ali je u svim slučajevima u zavarenom spoju ispoštovan kriterijum da je udarna žilavosti veća od 27 J.



Tabela 8. Rezultati ispitivanja udarne žilavosti osnovnog materijala i zavarenog spoja

Table 8. Toughness results for base metal and welded joint as well

Lokacija zareza		Osnovni materijal		Metal šava		Koren		ZUT	
		T=20°C	T=-40°C	T=20°C	T=-40°C	T=20°C	T=-40°C	T=20°C	T=-40°C
Uzorak 1	KU, J	270	10	250	200	230	150	280	130
Uzorak 2		280	9	270	180	215	178	285	60
Uzorak 3		220	14	272	160	219	130	275	126



Slika 10. Histogramski prikaz rezultata udarne žilavosti

Figure 10. Histogram of impact toughness results

4. Zaključak

U savremenoj industriji primena robota u svim industrijskim granama je sve veća. Zavarivanje kao jedan poseban segment u industriji takođe beleži porast upotrebe robota. Razlozi ovome su brojni, počev od veće produktivnosti, konstantnih parametara i sl. Uprkos brojnim prednostima upotreba robota ima i svoje nedostatke. Cilj ovog rada je bio da se provere mehaničke osobine zavara dobijenog robotskim zavarivanjem. U tu svrhu pripremljene su dve ploče dimenzija 200x500 mm debljine 12 mm od čelika S235JR. Kada je završena priprema pristupilo se višeprolaznom zavarivanju a potom i kontroli zavarenih ploča. Iz zavarenih ploča pripremljeni su uzorci za zatezanje i udarnu žilavost. Sprovedena ispitivanja i dobijeni rezultati pokazuju da pravilnim odabirom dodatnog materijala i parametara zavarivanja, mehaničke karakteristike zavarenog spoja mogu biti približno jednaka i slična svojstvima osnovnog materijala.

4. Conclusion

In modern industry, application of robots is evergrowing. Welding as one of the important segments in industry, also records an increase in the implementation of robots. Higher productivity and ability to maintain welding parameters within narrow ranges are the main reasons for implementation of robots in welding. Despite numerous advantages, the use of robots also has its disadvantages. The aim of this work was to determine mechanical properties of the welded joint obtained by robotic welding. For this purpose, two 200x500 mm 12 mm thick S235JR steel plates were prepared. When the preparation was completed, multi-pass welding was started. Welded joints were tested. Tensile and impact strength samples were prepared from the welded plates. The conducted tests and the obtained results show that with the correct selection of additional material and welding parameters, the mechanical characteristics of the welded joint can be approximately equal and similar to the properties of the base material.



Zahvalnica

Ovim putem, autori ovog rada izražavaju veliku zahvalnost preduzeću PROMEK D.O.O iz Velike Plane, koja je najvećim delom omogućila sprovođenje ovog eksperimenta. Preduzeće je autorima rada stavilo na raspolaganje celokupan kadar, resurse i raspoložive osnovne i dodatne materijale za zavarivanje kao i kompletan stručni kadar.

References / Literatura

[1] M. Jovanović, V. Lazić, D. Arsić, (2017), Nauka o materijalima 1, Univezitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka, Univerzitetski udžbenik, Kragujevac

[2] M. Jovanović, V. Lazić, (2015), Tehnologija livenja i zavarivanja, Univezitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka, Univerzitetski udžbenik, Kragujevac,.

[3]https://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=4, (2024), pristupljeno 26.08.2024. u 18:45

[4] <https://ezg.hr/en/products/wires/ez-sg-2>, (2024), pristupljeno 26.08.2024. u 19:15

Acknowledgment

The authors of this paper express their gratitude to the company PROMEK D.O.O. from Velika Plana, which for the most part enabled the implementation of this experiment. The company made the entire staff, resources and available basic and additional materials for welding available to the authors of the paper, as well as the complete professional staff.

[5] <https://en.oj-otc.com/aspcms/product/E-FDV8L.html>,(2024), pristupljeno 05.09.2024. u 11:13

[6] M. Jovanović, V. Lazić, D. Arsić, M. Tonic, (2024), Nauka o materijalima 2-Ispitivanje materijala, osnovni univerzitetski udžbenik, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, Kragujevac, ISBN 978-86-6335-110-3

[7] M. Jovanović, V. Lazić, D. Arsić, M. Tonic, Nauka o materijalima 3-Ispitivanje zavarenih spojeva i odlivaka, osnovni univerzitetski udžbenik, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, Kragujevac, ISBN 978-86-6335-111-0, 2024.

**Internacionalni inženjeri zavarivanja (IWE) / Evropski inženjeri zavarivanja (EWE);
Internacionalni tehnolozi zavarivanja (IWT) / Evropski tehnolozi zavarivanja (EWT);
Internacionalni inspektori zavarivanja (IWI-C)**

kojima je diplome izdao DUZS-CertPers mogu javno da prikažu nivo kvalifikacije na relevantnim dokumentima korišćenjem IIW/EFW pečata izdatim od strane DUZS-CertPers



Na zahtev kandidata koji imaju IWE / IWT / IWI-C diplome izdate od strane DUZS-CertPers-a, DUZS-CertPers može izdati i IIW pečate (izdaju se na osnovu IIW diploma). Takođe, na zahtev kandidata koji imaju IWE ili IWT diplome izdate od strane DUZS-CertPers-a, DUZS-CertPers može izdati i evropske ekvivalentne diplome EWE/EWT i EWF pečat (izdaje se na osnovu EWF diplome). **Ukoliko ste zainteresovani za izdavanje EWF diplome/pečata ili IIW pečata, ZAHTEV(E) je potrebno popuniti i dostaviti sekretarijatu DUZS-CertPers – a.** Zahteve za izdavanje pečata možete preuzeti na sajtu DUZS: www.duzs.org.rs tj. putem sledećih linkova:

http://duzs0011.mycpanel.rs/2016/wp-content/uploads/2017/05/Zahtev-za-izdavanje-IIW-pecata_IWE-IWT-IWI-C.pdf

http://duzs0011.mycpanel.rs/2016/wp-content/uploads/2017/05/Zahtev-za-dobijanje-EWF-diplome_pecata.pdf

Informacije:

+ 381 (11) 2420-652

duzs011@gmail.com





Saša Pejkić ^{1,a}

USAVRŠAVANJE POČETNIKA I MLADIH ZAVARIVAČA ZA POSLOVE ZAVARIVANJA SA OBLOŽENIM ELEKTRODAMA, METODOM POSTEPENOG RAZVIJANJA VEŠTINA I PRELASKA NA VIŠI NIVO

IMPROVEMENT OF BEGINNERS AND YOUNG WELDERS FOR WELDING WORKS WITH COATED ELECTRODES, USING THE METHOD OF GRADUAL DEVELOPMENT OF SKILLS

Stručni rad / Professional paper

Rad primljen / Paper received

Septembar 2024.

Rad prihvaćen / Paper accepted

Decembar 2024.

Adresa autora / Author's address

¹ EPS AD Ogranak TENT, Bogoljuba Uroševića Crnog 44, Obrenovac, Srbija

Email / ORCID ID

^a sasa.pejkic@eps.rs / 0009-0005-9558-8592

Ključne reči: mladi zavarivači, školovanje, obuka, obrazovanje, veštine

Keywords: young welders, education, training, education, skills

Rezime

Praktično se pokazalo da imamo mali broj obučениh mladih zavarivača sa natprosečnim kvalitetima u radu. Iz tog razloga ukazuje se potreba da se proces učenja obogati sa proširenim načinom prilaska sticanju znanja iz oblasti praktičnog zavarivanja, metodom korak po korak, prelaskom sa manjeg na viši nivo, do nivoa potpuno obučenog profesionalca, pripremljenog za rad u veoma širokom spektru zavarivanja. Proširivanje znanja i obrazovanje u oblasti zavarivanje treba da bude neprestani proces koji se odvija za vreme školovanja i obuke zavarivača i kasnije tokom izvođenja radova, sve do sticanja potrebne veštine i odgovarajuće tehnike za izradu visoko-kvalitetnih zavarenih spojeva.

Abstract

Practically, it turned out that we have a small number of trained young welders with above-average qualities in their work. For this reason, there is a need to enrich the learning process with an expanded approach to acquiring knowledge in the field of practical welding, a step-by-step method, moving from a lower to a higher level, to the level of a fully trained professional, prepared to work in a very wide range of welding. Expanding knowledge and education in the field of welding should be a continuous process that takes place during the education and training of welders and later during the execution of works, until the acquisition of the necessary skills and appropriate techniques for making high-quality welded joints.

Rad je u izvornom obliku objavljen u Zborniku radova sa 33. Savetovanja sa međunarodnim učešćem „Zavarivanje 2024“ održanog na Vrnjačkoj Banji, Srbija od 2. do 5. oktobra 2024. godine



1. Uvod

Razvoj savremenog društva, ukazuje na tendenciju kontinuiranog rasta BDP po glavi stanovnika. S obzirom na finansijska ograničenja investicija u privredu, javlja se potreba za ulaganjima u infrastrukturne objekte, koji zahtevaju visoku energetska efikasnost tokom perioda eksploatacije. Iz tog razloga, arhitekta pronalaze rešenja čiju osnovu čine čvrste čelične konstrukcije sa desetinama hiljada tona čeličnog materijala, koji će najvećim delom biti spojeni zavarivanjem. Utuda i potreba za velikim brojem novih zavarivača svih profila, na šta nijedno tržište rada ne može odmah odgovoriti. Suočeni smo sa činjenicom da nedostajući broj zavarivača se teško može nadohnaditi, jer sve što se iškoluje odmah preuzima tržište. Stoga moramo raditi na kvalitetu zavarivača koji završavaju kurseve, iz razloga što jedan kvalitetan zavarivač može zameniti u nekim slučajevima dva osrednja zavarivača, pa i više, naročito ako se rade masivni, zavareni spojevi visokog stepena sigurnosti. Dodatni rast potrebe za kvalitetnim zavarivačima se očekuje u narednom periodu, kako raste potreba za proizvodnjom odbrambene tehnike i druge opreme, svuda u svetu. Svakako da je interes imati snažan kadrovski i obrazovni potencijal koji može da proširi postojeću bazu stručnih i visoko cenjenih profesionalaca.

2. Teorijska obuka

Pod pretpostavkom da na obuku za zavarivače mogu pristupiti osobe koje nikada pre toga nisu imale kontakt sa tehnikom, a ni tehničkim izrazima, neophodno je prvo raščivijati osnovnu terminologiju u zavarivanju, kako bi budući zavarivači mogli pratiti nastavu. I ne samo to, oni od prvog dana treba da se vaspitavaju u duhu tačnosti, strpljenja, pravovremenosti, uzdržanosti, kao i u duhu važnosti zaštite na radu. Praksa je pokazala da je neophodno detaljno razjašnjenje i objašnjenje kako koristiti ličnu zaštitnu opremu, naročito važne detalje vezane za pripremu za rad sa nadglavnom maskom. Do prvog zavarivanja treba da dođe tek kada se podigne nivo svesti i odlučnosti, bez obzira na njihovo iščekivanje i nestrpljivost. Cilj je da se njihov entuzijazam dodatno očeliči i usmeri ka postizanju vrhunskih rezultata i podizanje lestvice onoga šta žele da postignu. Očekivano je da u zavarivačkom kolektivu nemamo mlade ljude koji su privrženi knjizi i učenju, pa ne treba forsirati metodu „bubanja” podataka i šturih definicija. Uvek treba imati na umu, da mladi zavarivači da su hteli da uče, bili bi na visokim školama.

3. Praktična obuka u radionici, bez uključenja aparata za zavarivanje

Ovo je svakako veoma važna faza, razvoja zdrave i snažne ličnosti zavarivača i prilika da se zavarivači upoznaju sa uvodnom teorijskom razradom zavarivanja ugljeničnih nelegiranih čelika. U ovom delu mora se sve naučiti o alatima i opremi koja se koristi u procesu zavarivanja. Naročito obratiti pažnju na ručnu (malu brusilicu), kako se koristi i kako se bezbedno koristi. Upoznati mlade zavarivače sa opasnostima od privremenih električnih instalacija i način za smanjenje rizika kontakta sa električnom strujom.

Naravno da je potrebno proširiti fond reči sa upotrebom novih termina i izraza. Od instruktora se očekuje da ima aktivan dijalog sa celom grupom i da prepozna i razdvoji osobe koji su istinski zainteresovani, od onih koji već nešto znaju ili ništa ne znaju. Postavlja se pitanje: zašto je ovo bitno? Prva grupa koju čine zainteresovane osobe imaju snažan entuzijazam i od njih se može očekivati da samodisciplinom napreduju bolje od ostalih. Međutim, mnogi od njih ostanu dobri samo u teoriji, a kao zavarivači postaju osrednji. To može biti pogodnost u razvoju karijere na drugim radnim mestima u oblasti zavarivanja, koja zahtevaju intelektualni rad, a ne zahtevaju visoko obrazovanje. U drugoj grupi su osobe koje ništa ne znaju, a možda nisu ni sigurni da li je profesija zavarivača za njih. Oni su najčešće potpuno nestrpljivi da se što pre završi nastava, stekne diploma i krene dalje, u nekom pravcu, istovremeno bez jasne slike šta bi to moglo biti. Od instruktora se očekuje najviša pažnja i strpljenje koje treba da pokažu prema ovim osobama. Dovoljna je jedna kritika, opaska, neumesna šala ili neka druga intriga, da ta mlada osoba napusti kurs ili da ignoriše da se uopšte nalazi na obuci. U trećoj grupi se nalaze osobe koje nešto znaju o zavarivanju. Sa njima je rad teži, pa i najteži, ako te osobe već misle da sve znaju. Tip učenika koji misli da sve zna, teško da može nešto naučiti, pa je pretpostavka da će ostati loš ili osrednji i po završetku kursa.

Instruktor treba da pokuša ujednači ove grupe pre početka zavarivanja. Ovaj deo je svakako veoma važan, jer je zahtev prema instrukturu veoma visok, naročito što se od instruktora očekuje da unese duhovnost u kolektiv. Ako instruktor pronade način da produhovi i aktivira svakog pojedinca, uz nastavak praktičnog rada stvorice zavarivače koji imaju tražene veštine i znanja, po meri veoma visokog kriterijuma za ocenjivanje.



4. Start zavarivačkog luka i početni koraci

Pre startovanja aparata za zavarivanje, moraju se ispoštovati određeni koraci, koji podrazumevaju upotrebu lične zaštitne opreme, postavljanje aparata i predmeta za zavarivanje u horizontalan položaj. Vreme je da se obavi priprema za zavarivanje, za početak samo čišćenjem predmeta od prljavštine, farbe, ulja, masti i rđe. Zatim se obavi postavljanje čvrstog kontakta mase na očišćenoj površini i priključi se aparat na mrežni napon. Nezaobilazna je provera ventilacije prostora i provera da li u neposrednom okruženju postoje zapaljive i eksplozivne materije. Tek kada je zahtev za rad odobren od strane instruktora, postavlja se elektroda u čeljust držača elektroda, navlače se rukavice i stavlja maska za zavarivanje. Tek onda se uključuje aparat za zavarivanje. To mora da bude redovna procedura, koju će zavarivač tokom svoje karijere uvek primenjivati, stom razlikom što će pregled dokumentacije, odnosno upoznavanje sa WPS listom koja je dobijena od tehnologa zavarivanja, uvek biti prethodnica svim ovim koracima.

Startovanje elektrode, treba da bude fino, tačno i dobro uvežbano. U ovoj fazi pokreće elektroda prema sebi i vodi računa o ravnomernosti luka. Vreme je da se u praktičnoj nastavi započne sa korišćenjem školske sveske sa kockama 5 x 5 mm. U njima će praktično vežbati dužine od 5 do 50 mm ili više, crtanjem i popunom kvadratića. Ova sveska će kasnije pomoći da le lako nauči kako izgleda i koliki je praktično ugao od 30° ili 45° ili više stepeni. Start elektrode se mora dobro uvežbati, bilo da je pokretanje elektrode prinošenjem i kontaktom, kuckanjem ili kresanjem. Nastaviće se sa greškom lepljenja elektrode, šta uraditi i kako sprečiti, a zatim i precizno pokretanje i prekid zavarivačkog luka. Naučiti kako nastaju osnovne greške podlivanja troske i nalepljivanje.

Za zavarivača često ostane potpuna nepoznanica koliki uticaj ima jačina struje na zavarivanje, pa zato se treba na početku pozabaviti sa ovom problematikom. Tome treba dodati i promenu prečnika elektrode i održavanje pravilne dužine zavarivačkog luka u zavisnosti od tipa zaštitne obloge elektrode. Zatim, mora se obratiti pažnjom na uticaj izbora jačine struje i brzine zavarivanja, ravnomernog povlačenja ili guranja elektrode. Zatim, koji su uglovi nagiba elektrode i sprečavanje podlivanja troske pod elektrodu. Sve ovo treba da se ukomponuje da bude dobro uvežbana melodija.

Vežbe trebaju biti tako koncipirane, da što zavarivač postaje bolji, to vežbe postaju složenije. Sve je po principu nivoa u video igricama. Što je igrač bolji, to je igra teža.

Pravolinijsko i krivolinijsko navarivanje treba vežbati višednevno, sve dok ne postanu deo posvesne radnje. Mnogi zavarivači su ostali osrednji, samo zato što su preskočili osnovne vežbe iz ove oblasti.

Za mlade zavarivače ove vežbe treba da postanu lake i monotone, da se jedva čeka na nastavak učenja. Time se podiže snaga entuzijazma, nestrpljenja i iščekivanja. Sve vreme se mora raditi na jačanju duha i unutrašnje stabilnosti. Instruktor zavarivanja treba da podstiče želju i entuzijazam kod učenika. Ponekad je neophodno ponavljati ove vežbe iznova, kako bi se grupa što više ujednačila u uspešnosti osnovnih i polaznih znanja.

5. Zavarivanje sučeonih i preklopnih limova u horizontalnom položaju

Za početke zavarivanja treba koristiti tanke limove, bez zazora i sa zazorom. Početi sa izradom pripoja, a zatim i sa zavarivanjem. Tek u ovom momentu je došlo do spajanja limova, odnosno zavarivanja, ravnim povlačenjem i njihanjem elektrode. Zazor između limova može biti ravnomeran, ali i promenljiv, pa čak i prevelik. Cilj je da zavarivač nauči da očekuje najbolje, a da se pripremi za najgore, što se u praksi često dešava. Što je veći zazor, to se usložnjava operacija zavarivanja. Takođe je bitno da zavarivač zna da prepozna način kako da reši ove razlike, a da neznatno utiče na kvalitet zavarenog spoja. U ovoj fazi, zavarivač počinje da upozna sebe, odnosno svoju ličnost. Instruktor treba da pomogne i usmerava mladu ličnost u njegovom duhovnom razvitku, a ne samo u razvijanju veština zavarivanja. Nastaviti sa razlikama, u tom smislu raditi sa limovima različitih debljina, sučeono i sa preklopom, sa više pravaca odvođenja toplote. U ovoj fazi zavarivač treba da zavaruje spoljašnji ugao dva lima koji se naslanjaju jedan na drugi pod uglom od 90°. Svako odstupanje od tačne brzine zavarivanja napraviće zajede, prelive, prokapljivanje i progorevanje.

Tek nakon izvedenih prethodnih vežbi, dolazi se do izrade provara, odnosno korenog prolaza koji je kritični deo zavarivanja, jer se traži ravnomerna i savršena penetracija. Do sada su se sve vežbe



radile sa rutilnom, bazičnom i celuloznom elektrodom. Zahvaljujući tome, prepoznaje se prava vrednost celulozne elektrode, prilikom izrade korenog zavara sa zazorom, a to će omogućiti u kasnijim fazama veoma dobar učinak pri zavarivanju u prinudnim položajima. Upotreba podloški kao i uvodne i izlazne pločice, tokom izvođenja korenog zavarivanja, je još jedan dodatni tip vežbe. Nastavak osnovnog saznanja je u novim lekcijama izrade vrućih, popunjavajućih i završnih prolaza sa sve tri vrste zaštitne obloge elektroda: rutilne, bazične i celulozne. Tek nakon ovog dela obuke, zavarivači eventualno mogu da se podele, na one koji će biti zavarivači na ravnim limovima i zavarivači na cevima. Naravno da to ne bi trebalo da bude preporuka, jer grupa koja se opredeli za cevi, ostaće uskraćena za veoma bitna znanja koja će im biti preko neophodna u različitim uslovima zavarivanja i zavarivačkim položajima.

6. Zavarivanje na limovima u prinudnim položajima

Jedna od najlakših ravni za sučeono zavarivanje u prinudnim položajima je vertikalna ravan. Pri tome vežbe u ovoj ravni su podeljene na horizontalno zavarivanje u vertikalnoj ravni i zavarivanje odozdo na gore ↑ i odozgo na dole ↓. Ovde je ključno sprovesti niz vežbi sa postepenim savladavanjem nagiba. Nikako nije dobro da se odmah krene u potpuno vertikalnoj ravni. Naprotiv, ugao od 90°, treba dostići tek onda kada se uvežbaju pozicije najmanje tri ugla; 30, 45 i 60°. To je pravi put za postizanje neophodne veštine, postepen dolazak na traženi nivo, bez preskakanja PB položaja. Isto ovo treba uraditi sa tankim preklopnim limovima, a sve u cilju da se ovlada kontrolom zavarivačkog kupatila u PF i PG položajima. Učenik koji savlada ove probleme, po logici stvari može bez problema da radi sa T i L spojevima limova u horizontalnom, koritastom i vertikalnom položaju. Suštinski je bitno da se shvati princip broja pravaca odvođenja toplote, jer će to odrediti tehniku zavarivanja.

Odmah nakon sticanja veština rada u vertikalnom položaju za T i L spojeve, treba nastaviti sa složenijim savladavanjem gravitacije u PE položaju. Od učenika se prethodno očekuje da stekne dovoljnu fizičku kondiciju kako bi mogao da radi u teškom i prinudnom položaju. Njihanje elektrode je suština izrade ispravnog spoja ili stvaranje ledenica i prokapsina.

Da bi se deformacije predupredile, neophodno je iskustvo i zapažanje, do kojih se dolazi prolaskom kroz prethodne vežbe. U ovom delu se stiže

iskustvo u planiranju radi izbegavanja unutrašnjih napona usled kojih dolazi do krivljenja i vitoperenja.

Dugački limovi i profili se često zavaruju na prekide, kada nije neophodna zaptivnost zavarenog spoja ili nosivost celom dužinom u cilju smanjenja deformacija. Zavarivanje debelih preseka ima sopstvenu tehniku rada, višeslojnim prolazima, na način da se prethodni sloj odžari.

7. Zavarivanje cevi sa blindama i čepovima

Odličan prelazak u učenju sa limova na cevi je njihova međusobna kombinacija položaja i pozicija. U ovoj fazi okrugle cevi se zavaruju tako što se uvlače jedna u drugu. Time se istovremeno vraćamo na početne vežbe preklopnih limova, jer ima mnogo sličnosti. Postavljanjem limova na čelo cevi, imamo podudarnost sa vežbama ugaonog L i T položaja zavarivanja. Uvođenjem čepova u cevi, imamo podudarnost sa zavarivanjem obloženih limova. Sve nam to govori da je ovo samo logičan nastavak prethodno stečenog znanja. Na početku se naravno radi sa okretanjem i postavljanjem u povoljan položaj za zavarivanje, ali kako veština postaje veća tako srazmerno, treba otežavati ove vežbe, uvođenjem debljih limova, odnosno uvodimo veći broj pravaca odvođenja toplote. Zavarivači se upoznaju sa predgrevanjem i održavanjem međuprolazne temperature. Takođe se upoznaju se sa radom, ručnog struga za obaranje ivica na cevi i pozicioniranjem cevi. Primetite razliku. Ovim načinom sticanja znanja se mnogo kasnije pristupilo vežbama sa cevima, za razliku od uobičajene tehnike brze pripreme za polaganje atesta na cevima. A ovo je tek uvodni deo rada sa cevima. Prepoznajete li razliku u dostignutom znanju.

8. Zavarivanje cevi

Zavarivač početnik koji je prethodno stekao dovoljna znanja i veštine, u momentu kada pristupi sučeonom zavarivanju cevi, neće imati problema i nerazumevanja. Kroz nekoliko vežbi može prihvatiti sva pravila i naučiti da ih trajno poštuje. Vežbe treba da budu podeljene na zavarivanje cevi koje mogu da se okreću, odnosno oko kojih može da zavarivač kreće, dok je druga grupa vežbi koncipirana na otežano zavarivanje cevi, gde zavarivač ima pristup samo sa jedne, često uzane strane. Pristup sa jedne strane, odnosno zavarivanje pomoću ogledala, naročito u skućenom prostoru, je česta potreba u savremenim industrijama, a broj zavarivača koji mogu da odgovore na tražene zahteve je oskudan. Zato je neophodno zavarivača postepeno uvesti od većih prečnika prema manjim, kod kojih je veća brzina



zavarivanja po obimu, a samim tim je i veća brzina promene položaja. Istovremeno, zavarivač treba sam sebi postepeno da sužava prostor, tako da se zavarivanje mora izvoditi i sa levom i sa desnom rukom. Naročito obratiti pažnju na zavarivanje cevi sa unutrašnje strane, kada ne postoji mogućnost prilaska zadnjoj strani cevi. Kada zavarivač savlada i ove veštine, možemo reći da je postao kompletan zavarivač, koji će svakodnevnim radom primenjivati i kombinovati svoja znanja i sticati neophodna iskustva kako bi postepeno prerastao u vrhunskog

zavarivača. Nikako se ne sme zaboraviti na to da instruktor ne sme dopustiti da zavarivač izgubi strast i motivisanost.

Položen parktični ispitni test i sticanje sertifikata nikako ne sme da bude kraj školovanja zavarivača. Veoma je bitno da se zavarivač u praktičnom radu dalje usavršava, kako bi u što je moguće kraćem roku dostigao visoke performanse u radu na teškim i tehnički složenim zadacima. Pri tome se ne sme zapostaviti duhovno obrazovanje.

9. Zaključak

U ovom radu se predlaže način na koji mladi zavarivači treba da idu tokom obuke, metodom korak po korak, do visoko postavljenog cilja, odnosno sticanje veština koje odlikuju vrhunskog zavarivača, uz istovremeno jačanje duha i stabilnosti svakog pojedinca, jer je svakodnevica pokazala da je današnji čovek izložen aktivnoj duhovnoj razgradnji i rascentriranju. Da li to znači, da je neophodno uvođenje psihološkog jačanja svesti i/ili uvođenje meditacije, ili molitve i veroučenja u čitav proces obuke, ostaje da se kroz naučni eksperiment utvrdi. Jedno je sigurno, visokokvalitetan zavarivač mora imati i visok nivo samosvesti i psihičke stabilnosti, da bi u svakom momentu očuvao svoju smirenost i stalozhenost. Ja glasam za tihovanje i skromnost kao put ka savršenstvu u radu.

9. Conclusion

This paper proposes the way in which young welders should proceed during training, using a step-by-step method, to reach a high goal, i.e. acquiring the skills that distinguish a top welder, while at the same time strengthening the spirit and stability of each individual, because everyday life has shown that today's a man exposed to active spiritual decomposition and decentering. Whether this means that it is necessary to introduce psychological strengthening of consciousness and/or the introduction of meditation, or prayer and religious teaching in the entire training process, remains to be determined through a scientific experiment. One thing is certain, a high-quality welder must also have a high level of self-awareness and psychological stability, in order to maintain his calmness and composure at all times. I vote for silence and modesty as the path to perfection in work.

Literatura / References

[1] Saša Pejkić (2024): Inženjersko radionički priručnik- Kako je lako zavarivati sa elektrodama, Beograd

[2] Saša Pejkić (2022): Inženjersko radionički priručnik- Obložene elektrode za zavarivanje, Beograd

[3] Saša Pejkić (2017): Inženjersko radionički priručnik- Gasno plamena tehnika, Beograd.



Proizvođači iz oblasti vazduhoplovstva zahtevaju preciznost koju Dynasty® TIG uređaji obezbeđuju

Aerospace Manufacturers Require Precision That Dynasty® TIG Welders Offer

Miller Dynasty TIG welders deliver quality and precision with easy setup for aerospace manufacturers to meet rigorous welding standards.



TIG welding critical parts

In the vast expanse of the sky, perfection is the only acceptable standard. Aerospace construction demands the highest level of accuracy to guarantee a safe journey. This makes the work of your welding operation critical.

Not only is your operation critical but it must meet rigorous standards. While operational goals may aim to meet zero welding rework and meet customer quality and timeline requirements, they must also meet standards such as EN ISO 9606-1 and have welders who qualify to ISO 24394, something the Miller Dynasty family of welders is designed for. The quality and precision behind the Dynasty welding arc and the intuitive, easy-to-use, multilingual LCD display make meeting these requirements possible.

A solution to weld distortion

With aerospace components it's critical to meet tight geometric tolerances, which can cause a lot of rework and parts being scrapped if these tolerances are not met. Passing quality test on the first try for each part doesn't only help hit quality goals and reduce scrap waste and costs, it's a time savings.

Miller Dynasty machines are a go-to welding power source for many in the aerospace industry because they offer high weld quality and arc control and can be dialed in very tightly. These machines provide a higher pulse rate for pulsed TIG welding — allowing operators to lower heat input and eliminate the weld distortion on a part.



The Dynasty also has independent amplitude/amperage control that allows EP and EN amperages to be set independently. This helps welders precisely control heat input to the work and electrode. It also provides: better penetration, more capability on thicker materials, less tungsten degradation, improved post-weld appearance. The independent control is especially good for working on larger aluminum or magnesium projects, since it allows the welder to use higher heat input without sacrificing cleaning.

Simplifying welder training

Like other industries, aerospace manufacturers and commercial airlines are facing a shortage of skilled welders. That makes it important to have equipment that is easy to use and requires less training for new welders. Dynasty welders make this possible with intuitive interfaces that operators can easily take the setup from their training to production parts.

Easy-to-use TIG welders

When the welders and managers are choosing welding power sources for their operation, they look for machines that are easy to set up and use, are energy efficient, have the necessary power and duty cycle, and offer excellent reliability, like the Dynasty family of welders.

Most facilities are welding on a range of material thicknesses for components, so it's important to have welding power sources that allow operators to easily change parameters or save welding programs for different components. The similar interface among the different Dynasty models helps reduce training time for new welders.

LCD display delivers information

The new interface on the Dynasty features a colour LCD display that provides visual feedback on how adjustments will affect the welding arc. This helps welders understand the arc and how it's performing. The LCD display is intuitive and allows operators to easily set weld parameters without having to access hidden menus. The machine can also save up to 99 weld programs in memory and has a locks and limits feature that helps control welding parameters being used — to minimize deviation from the welding procedure specifications. This helps to reduce scrap and potential rework, along with showing that you're operating within specification for audit purposes.

Easing portability and power

Aerospace applications, specifically repairs, require equipment that is easy to transport — a benefit the Dynasty machines can provide. It's also important to be able to connect to the available power once a welder gets to the destination.

The Dynasty 210 and 300 weigh 47 and 55 pounds, respectively, making them highly portable for jobs on the fly. Allowing you to be able to take a machine into elevated areas of the hangar or whatever the space requirements are. It's a lot easier to move the smaller-footprinted package up and down. The Dynasty models will let welders do that when they are at work in the field. That portability isn't just a convenience, it's also a time and cost saver.

Welders also need to be able to connect a machine to whatever power is available when they transport it. This is an advantage that the Dynasty welders provide through Auto-Line™ power management technology, which allows hookup to single- or three-phase electrical input from 120 to 480 volts (Dynasty 210) or 208 to 575 volts (Dynasty 300, 400 and 800) with no manual linking.

Relying on Miller TIG welders

Miller Dynasty machines have become a trusted solution for aerospace manufacturers who demand precision, quality, and efficiency in their welding processes. By providing a reliable welding arc and consistent performance, these machines enable manufacturers to meet stringent industry standards while minimizing rework and delays. For manufacturers striving to maintain excellence in this high-stakes industry, Miller Dynasty machines remain a key player in delivering reliable and precise welding solutions.

Brian Bellile

Market Segment Manager – Precision Welding Solutions

Miller Electric Mfg. LLC An ITW Welding Company



6. Međunarodni simpozijum o aditivnoj proizvodnji, 21–23. maj 2025, Drezden, Nemačka

Aditivna proizvodnja (eng. additive manufacturing - AM), poznata i kao 3D štampa, postaje sve značajnija za industrijske primene. Fascinantna inženjerska rešenja, u kombinaciji sa značajnim ekonomskim prednostima, snažno podstiču istraživanja i razvoj širom sveta. Šesti međunarodni simpozijum o aditivnoj proizvodnji (ISAM 2025) prikazaće kako AM tehnologija doprinosi povećanju industrijske vrednosti danas i u budućnosti. Konferencija će se fokusirati na aktuelne teme u industriji i naučnoj zajednici. Stručnjaci iz celog sveta predstaviće najnovije razvojne trendove, perspektive i primene aditivne proizvodnje. Digitalizacija i upotreba veštačke inteligencije dodatno će proširiti granice AM procesa. ISAM 2025 pružiće jedinstvenu platformu za razmenu ideja i industrijsko umrežavanje. Učesnici će dobiti uvid u nove teme i imati priliku za diskusiju sa stručnjacima, razvijateljima i korisnicima. Simpozijum organizuje Fraunhofer IWS, koji zajedno sa TU Dresden vodi Centar za aditivnu proizvodnju u Drezdenu (AMCD). Izvor: <https://www.isam.network/>
Bojan Gligorijević

14. Međunarodni seminar „Numerička analiza zavarljivosti“ 24. septembar 2025, Grac – dvorac Segau, Austrija

Četrnaestim međunarodnim seminarom „Numerička analiza zavarljivosti“ nastavlja se tradicija uspešnih okupljanja. Od prvog događaja 1991. godine, ovaj seminar postao je vodeća svetska konferencija u oblasti razvoja metoda za predviđanje mikrostrukture i svojstava zavarenih spojeva. Seminar ima i praktičan i akademski značaj, podržavajući filozofiju računarskog modeliranja koje pomaže u optimizaciji zavarivačkih procesa, dodatnih materijala i eksploatacionih svojstava zavarenih komponenti. Vodeći stručnjaci u ovoj oblasti predstaviće najnovije rezultate istraživanja u mirnom okruženju starog dvorca. Seminar organizuje Institut za nauku o materijalima, zavarivanje i oblikovanje Tehničkog univerziteta u Gracu. Tokom skupa će se, između ostalog, diskutovati o razvoju i primeni numeričkih analiza u zavarivačkim procesima, svojstvima spojeva i različitim metodama. Nakon recenzije, radovi će biti objavljeni u štampanom i elektronskom izdanju, sa detaljnim člancima kao i u prethodnim seminarima. Izvor: <https://www.tugraz.at/events/seggau-2025/home>
Bojan Gligorijević

24. Međunarodna izložba zavarivačkih materijala, opreme i tehnologija 7–10. oktobar 2025, Crocus Expo, Moskva, Rusija

Weldex je vodeći događaj u zavarivačkoj industriji Rusije, koji promovise širok spektar materijala, opreme i tehnologija za zavarivanje. Ova izložba okuplja kupce i stručnjake iz različitih regiona kako bi se upoznali sa najnovijim dostignućima, pronašli nove dobavljače i razmenili inovativne ideje. 24. izdanje Weldex-a biće održano od 7. do 10. oktobra 2025. u Crocus Expo centru u Moskvi. Manifestacija privlači široku publiku iz ruske industrije poput aeronautike, proizvodnje opreme, metalurgije, nafte i gasa, brodogradnje i građevinarstva. Obuhvata bogat poslovni program sa konferencijama, diskusijama i okruglim stolovima, koji omogućavaju razmenu znanja i rešavanje industrijskih izazova. ITE Group, organizator Weldex-a, predvodi organizaciju industrijskih sajmova i poslovnih događaja u Rusiji, stvarajući prilike za globalne učesnike da podele stručnost, istaknu inovacije i unaprede poslovanje. Izvor: <https://weldex.ru/en/>
Bojan Gligorijević

INFORMATION FOR AUTHORS

in submitting manuscripts to journal
WELDING AND WELDED STRUCTURES

Welding & Welded Structures (Zavarivanje i zavarene konstrukcije) is the official quarterly review of the Serbian Society for Advancement of Welding. The Journal publishes reports on the latest developments in all aspects of welding, joining, cutting and related technologies. In addition to its coverage of all the widely used welding and construction fabrication processes, the journal also discusses welding metallurgy, testing and inspection of welds, new publications and standards, operator training and education, health and safety matters, new equipment and consumables.

The journal provides comprehensive information of Serbian Society for Advancement of Welding activities.

The journal *Welding & Welded Structures* publishes original scientific papers, preliminary communications, review and professional papers. Papers are published in Serbian or English.

Manuscript should be typed on one side only of A4 paper in Arial font, 10 point, fully justified. Ample margins should be provided, not less than 20 mm. The pages should be numbered. The normal maximum of paper is 10 single spaced typewritten pages, with tables and figures. The typescript should be presented in the order: *title page, text, appendix, acknowledgment, references, tables and figures*.

Title page

The title page should contain:

the title of the paper - should be brief, specific informative and not exceeding ten words,

the name(s) of the author(s), establishment(s) and the addresses,

keywords - not exceeding five words,

abstract - not more than 250 words. The abstract should present a concise summary of the objectives, content, and conclusions of the paper. It should be intelligible in itself without reference to the paper, so no mention must be made of any figures, tables, or bibliographical references.

Text

For the main text it is important to maintain a logical sequence, splitting text into paragraphs with different headings. Clear differentiation should be made between the headings of sections, subsections, etc. It is suggested to organize and divide main text into the following headings:

introduction - short statement giving relevant background, purpose and scope of the work,

experimental - giving materials, methods, process and equipment used in solving the problem,

results - discussion - evaluation and interpretation of the data and facts, **conclusions** - short evaluation and interpretation of the performed work,

Appendix, acknowledgment - as required.

References

References should be numbered serially and the numbers should be typed within square brackets. The references should be set out in a list, numbered according to their appearance in the text. For the sake of uniformity and literature searching, the format in accordance of the ISO 690 must be used.

Equations, tables and figures, should all be numbered serially throughout the text, and referred to in the text. Equations should be typed in fonts for symbols, with explained meanings of the symbols.

Tables should be simple as possible. Each table should have a descriptive heading at the top. All figures must be submitted in a form suitable for reproduction, in a high resolution, of high contrast, clear, black and white.

Caption should be placed below the figure. In preparing diagrams, line drawings have to provide high resolution computer printouts. Drawings and lettering size should permit 50% reduction in the final version.

Units Authors are explicitly requested to submit their papers using SI units.

The volume of the text is up to 10 pages of A4 format. Manuscripts submitted to the Journal will be reviewed.

Authors are obliged to prepare the text of the paper according to the instructions and submit it by e-mail in MS Word (docx) and Adobe (pdf) format to the e-mail address duzs011@gmail.com.

Authors are requested to provide e-mail address and phone number for rapid communications, if necessary.

Manuscripts should be submitted to Editorial Board:

Welding & Welded Structures

Zavarivanje i zavarene konstrukcije

Grčića Milenka 67

11000 Belgrade

Serbia

tel. / fax + 381 (11) 2420-652

E-mail: duzs011@gmail.com

www.wwsjournal.org.rs

Uredništvo časopisa Zavarivanje i zavarene konstrukcije

ČASOPIS ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE

Cenovnik oglasnog prostora u četiri uzastopna broja 2025

	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	-	45 000	28 000	19 000	12 000
	kolor	120 000	85 000	-	-	-

- 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 2025

	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	-	1000	500	400	300
	colour	3000	2000	-	-	-

- 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

YASKAWA SLOVENIJA

HONEX

ELIMP

NEMINIK

SIGMA LAB

EDC D.O.O. HRVATSKA

TMS CEE D.O.O BEOGRAD

1. ČLANARINA DUZS za 2025. godinu 5.000 dinara
Članovima DUZS **GRATIS** godišnje izdanje časopisa "ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE"
2. ČASOPIS "ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE" - 2025. godina u slobodnoj prodaji (u cene je uračunat PDV 10%):
 - cena pojedinačnog broja..... 1.150 dinara
 - godišnja pretplata za 1 komplet brojeva godišnjeg izdanja..... 3.520 dinara
3. ČASOPIS - stari brojevi (u cene je uračunat PDV 10%)
 - a) u slobodnoj prodaji:
 - cena pojedinačnog broja za 2024. godinu 500 dinara
 - cena pojedinačnog broja za prethodne godine..... 250 dinara
 - b) beneficirane cene za članove DUZS:
 - cena pojedinačnog broja za 2024. 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 (izdanja su i z 2012. godine) 6.750 dinara