



ZAVARIVANJE I

ZAVARENE KONSTRUKCIJE WELDING & WELDED STRUCTURES

God. 71 Vol. 71	Br. 1 No. 1	1-48 1-48	Beograd Belgrade	Srbija Serbia	2026. 2026.
--------------------	----------------	--------------	---------------------	------------------	----------------

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

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

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)

Dr Tushar Sonar, dipl.ing. (Rusija)

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 Gligorjević, 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 Tehnološkometalurškog 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 2026.

Cena pojedinačnog broja 1.150,00 dinara
Godišnja pretplata 3.520,00 dinara
Tekući račun: 325-950060002588-46

PRICE AND ORDER

Annual subscription: EUR 100
Account No. RS35325960160000041546
OTPVRS22 (VOJVOĐANSKA BANKA AD)
IBAN RS35325960160000041546

ŠTAMPA / PRINT

RIC grafičkog inženjerstva
Tehnološko-metalurški fakultet Beograd
Karnegijeva 4, Beograd
Tiraž / Circulation: 150

SADRŽAJ

CONTENTS



NAUKA•ISTRAŽIVANJE•RAZVOJ

SCIENCE•RESEARCH•DEVELOPMENT

3

**UPOREDNO ISTRAŽIVANJE MEHANIČKIH
SVOJSTAVA SUČEONO ZAVARENIH SPOJEVA
RAZLIČITIH LEGURA ALUMINIJUMA AA 2024-T351 I
AA 6082-T6 DOBIJENIH MIG I TIG ZAVARIVANJEM**

**A COMPARATIVE INVESTIGATION OF MECHANICAL
PROPERTIES OF BUTT WELDED JOINTS OF
DISSIMILAR ALUMINIUM ALLOYS AA 2024-T351 AND
AA 6082-T6 OBTAINED BY MIG AND TIG WELDING**

Dragan Milčić, Miodrag Milčić, Aleksija Đurić, Damjan Klobčar, Nataša Zdravković, Radica Prokić Cvetković, Vencislav Grabulov



NAUKA•ISTRAŽIVANJE•RAZVOJ

SCIENCE•RESEARCH•DEVELOPMENT

17

**TREND IMPLEMENTACIJE I RAZVOJA
INDUSTRIJSKIH ROBOTA U PROCESIMA
ZAVARIVANJA U SVIJETU**

**TREND OF IMPLEMENTATION AND DEVELOPMENT
OF INDUSTRIAL ROBOTS IN WELDING PROCESSES
IN THE WORLD**

Isak Karabegović, Sead Pašić, Edina Karabegović



PRAKSA

PRACTICE

28

**UTICAJ TOPITELJA/PRAHA NA ZAVARLJIVOST
VAROVA POD PRASKOM**

**IMPACT OF FLUX ON THE FABRICATION AND
SERVICE WELDABILITY OF SUBMERGED ARC WELD
DEPOSITS**

Milo Dumović



PRAKSA

PRACTICE

40

PRIMJENA LASERSKOG RUČNOG ZAVARIVANJA

APPLICATION OF MANUAL LASER WELDING

Ivan Sigurnjak, Božo Despotović, Josip Pavić, Tihomir Marsenić, Mario Jagnjić, Dejan Marić, Marko Dunder, Jadranka Eržišnik



VESTI

NEWS

16

**1. KONFERENCIJA SA MEĐUNARODNIM UČEŠĆEM
KONFERENCIJA O TEHNOLOGIJAMA SPAJANJA MATERIJALA CG 2026
BEČIĆI-CRNA GORA 14-16. maj 2026.**

26

SEMINAR SA TEMOM "PRIMENA STANDARDA SRPS EN ISO 15614:2017", BEOGRAD 15. april 2026

38

34. MEĐUNARODNO SAVETOVANJE "ZAVARIVANJE 2026", SREBRNO JEZERO 15-17. oktobar 2026.

48

MARKETING



Dragan Milčić ^{1,a}, Miodrag Milčić ^{1,b}, Aleksija Đurić ^{2,c}, Damjan Klobčar ^{3,d}, Nataša Zdravković ^{1,e}, Radica Prokić Cvetković ^{4,f}, Vencislav Grabulov ^{5,g}

UPOREDNO ISTRAŽIVANJE MEHANIČKIH SVOJSTAVA SUČEONO ZAVARENIH SPOJEVA RAZLIČITIH LEGURA ALUMINIJUMA AA 2024-T351 I AA 6082-T6 DOBIJENIH MIG I TIG ZAVARIVANJEM

A COMPARATIVE INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF BUTT WELDED JOINTS OF DISSIMILAR ALUMINIUM ALLOYS AA 2024-T351 AND AA 6082-T6 OBTAINED BY MIG AND TIG WELDING

Originalni naučni rad / Original scientific paper

Rad primljen / Paper received:

Septembar 2024.

Rad prihvaćen / Paper accepted:

Novembar 2025.

Adresa autora / Author's address:

¹ Mašinski fakultet, Univerzitet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija

² Mašinski fakultet, Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Vuka Karadžića 30, 71123 Istočno Sarajevo, Bosna i Hercegovina, Republika Srpska

³ Laboratory for Welding, Faculty of Mechanical Engineering, University of Ljubljana, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana, Slovenia

⁴ Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Kraljice Marije 16, 11000 Beograd, Srbija

⁵ Društvo za unapređivanje zavarivanja u Srbiji, Grčića Milenka 67, 11000 Beograd, Srbija

email / ORCID ID:

^a dragan.milcic@masfak.ni.ac.rs / 0000-0002-3936-7462

^b / 0000-0002-1089-8390

^c / 0000-0002-0251-6364

^d / 0000-0002-6130-0328

^e / 0000-0001-6085-7522

^f / 0000-0002-8695-7780

^g / 0000-0003-2020-5452

Ključne reči: Zavareni spojevi različitih legura aluminijuma AA 2024-T351 i AA 6082-T6, MIG i TIG postupci zavarivanja, makrostruktura i mikrostruktura, mehanička svojstva zavarenih spojeva

Keywords: Welded joints of dissimilar aluminium alloys AA 2024-T351 and AA 6082-T6, MIG and TIG welding processes, macrostructure and microstructure, mechanical properties of welded joints

Rezime

Ovaj rad ima za cilj da se uporede mehanička i strukturna svojstva sučeonih zavarenih svojstava različitih legura Al 2024-T351 i AA 6082-T6 dobijenih MIG i TIG postupcima zavarivanja. Legura AA 6082 T6 je dobro zavariva klasičnim fuzionim postupcima zavarivanja (MIG i TIG), dok je legura 2024-T351 gotovo nezavariva. Za zavarivanje ovih dveju različitih legura Al korišćeni su MIG i TIG postupci zavarivanja na limu debljine 8 mm koristeći dodatni materijal 4043A (AlSi5) i smešu Ar i He

Abstract

This paper aims to compare the mechanical and structural properties of butt-welded joints of dissimilar Al alloys 2024-T351 and AA 6082-T6 obtained by MIG and TIG welding processes. Alloy AA 6082 T6 is weldable by classic fusion welding processes (MIG and TIG), while alloy 2024-T351 is mostly non-weldable. For the welding of these two different Al alloys, MIG and TIG welding procedures were used on 8 mm thick sheet metal using additional material 4043A (AlSi5) and a mixture of Ar and He as a shielding gas for the MIG welding process, or pure Ar for the TIG welding process.

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



kao zaštitnog gasa za MIG postupak, odnosno čist Ar za TIG postupak zavarivanja. U radu su uporedno data mehanička svojstva zavarenih spojeva dobijenih MIG i TIG postupcima zavarivanja. Uporedno je data i mikrostrukturna evolucija zavarenog spoja različitih legura Al AA6082-T6 i AA2024-T351. Uporedno su prikazana mehanička svojstva zavarenih spojeva različitih Al legura, i to rezultati ispitivanja tvrdoće prema Vickersu, ispitivanja na zatezanje i savijanja zavarenih uzoraka.

1. Uvod

Danas se za izradu lakih konstrukcija transportnih vozila koriste različite legure Al zbog male gustine materijala, dobrih mehaničkih svojstava, dobre otpornosti na koroziju i dr. [1-2-3]. Specifična čvrstoća (odnos zatezne čvrstoće i gustine materijala u kN·m/kg) legure Al 7075-T6 je 204, dok su za Cu, polimer i nerđajući čelik 304 ove vrednosti 24, 44, 63, respektivno [4,5]. Svetska potražnja za Al i njegovim legurama je oko 29 miliona tona godišnje. Oko 22 miliona tona predstavlja potražnju za primarnim Al, dok 7 miliona tona predstavlja potražnju za sekundarnim ili recikliranim Al otpadom [6].

MIG i TIG postupci se najviše koriste za zavarivanje konstrukcija od legura Al. Posebno su složeni slučajevi zavarivanja različitih legura Al MIG postupkom (AA6082 - AA6092/SiC/25p composite [7], 2024-T351 - 6061-T651 [8]), TIG postupkom [9], laserskim zavarivanjem i zavarivanjem elektronskim snopom [10], kao i slučajevi zavarivanja trenjem sa mešanjem (FSW) (AA2024-T351 [11-14], AA5754-AA7075 [15], AA2024-AA7075 [16], AA2219-AA5083 [17] i AA7075-AA6061 [18]). Postupci fuzionog zavarivanja MIG i TIG se koriste u situacijama kada se zavaruju legure Al koje imaju dobru zavarljivost. Za materijal se kaže da je dobro zavarljiv ako određeni postupak zavarivanja može da proizvede takav zavareni spoj sa najmanjom nehomogenošću u zavarenom spoju. Mogući nedostaci pri zavarivanju legura Al su nedostatak penetracije, formiranje pora i inkluzija, formiranje Al₂O₃ oksidacionog sloja na površini metala zbog visokog afiniteta Al prema O₂ i pojava toplih prslina. U legurama Al dolazi do pojave prslina zbog visokih napona koji se stvaraju u zavarenom spoju usled izražene termičke dilatacije (dvostruko veće od čelika) i značajnog skupljanja pri očvršćavanju – obično 5% više nego u ekvivalentnim čeličnim zavarenim spojevima.

The present study showcases the mechanical properties of welded joints obtained by MIG and TIG welding. The microstructural evolution of the welded joint of dissimilar Al alloys AA6082-T6 and AA2024-T351 is compared. The mechanical properties of welded joints of dissimilar Al alloys are estimated based on the results of Vickers hardness, tensile, and bending tests of as-welded samples.

Kako još uvek postoji potreba u industrijskom sektoru za uporednim studijama između različitih vrsta tehnika zavarivanja kako bi se proizveli zavareni spojevi bez defekata sa prihvatljivim mehaničkim svojstvima, u ovom radu su dati rezultati istraživanja uticaja MIG i TIG postupaka zavarivanja na strukturalna i mehanička svojstva sučeono zavarenih spojeva raznorodnih legura Al, AA2024 T351 i AA6082 T6. Legura AA6082 spada u seriju legura 6XXX gde su Si i Mg principijelni legirajući elementi. Ove legure su pogodne za termičku obradu (rastvarajuće žarenje, kaljenje, veštačko/prirodno starenje). Legure sistema Al-Mg-Si imaju umerenu čvrstoću i dobru otpornost na koroziju, u poređenju sa drugim termički obradivim Al legurama. Tipično za ove legure je da imaju dobru sposobnost oblikovanja i prihvatljivu zavarljivost.

Legura AA2024 spada u seriju legura 2XXX gde je Cu principijelni legirajući element. Mehanička svojstva ovih legura dostižu vrednosti kao kod ugljeničnih čelika. Ovako visoka čvrstoća se postiže zahvaljujući intermetalnom jedinjenju CuAl₂ koje se izdvaja u obliku disperznog taloga. Taložno ojačavanje ove grupe legura odvija se kroz postupak veštačkog ili prirodnog starenja. Kako ove legure nemaju povoljnu otpornost na koroziju, često se prevlače (plakiraju) čistim Al radi antikorozijske zaštite. Legure serije 2XXX, zbog visoke čvrstoće, dobrih svojstava na zamorna opterećenja, posedovanja svojstava visoke tolerancije oštećenja, se koriste za izradu delova u avioindustriji [19]. Ove legure po pravilu imaju nepovoljnu zavarljivost klasičnim postupcima zavarivanja topljenjem (MIG, TIG) zbog velike osetljivosti ka pojavi toplih prslina, kao i zbog rastvaranja čestica taloga. Za zavarivanje ovih legura se pretežno koristi postupak zavarivanja trenjem sa mešanjem [11-14]. Za zavarivanje legure AA2024 fuzionim postupcima (MIG i TIG), potrebno je definisati optimalne marametre zavarivanja, a mnogo je kompleksnije



definisati tehnologiju zavarivanja legure AA2024 sa legurom AA 6082.

Cilj ovog rada je da se uporede rezultati makrostrukturnih i mikrostrukturnih analiza sučeono zavarenih spojeva legura EN AW 2024 T351 i EN AW 6082 T6 kao i mehaničkih svojstava (profil tvrdoće zavarenih spojeva, zatezna i savojna svojstva zavarenih spojeva) ostvarenih MIG I TIG postupcima zavarivanja.

2. Eksperimentalni deo

Eksperimentalna istraživanja su bila fokusirana na određivanju uticaja MIG i TIG postupaka zavarivanja na metalurška i mehanička svojstva zavarenih spojeva legura 2024-T351 i 6082-T6. Hemijska i mehanička svojstva legura 2024-T351 i 6082-T6, koja su predmet ovog istraživanja, su data u Tabeli 1.

Tabela 1. Hemijski sastav u mas. % i mehanička svojstva legure aluminijuma 2024 T351 i 6082 T6 [20].

Table 1. Chemical composition in wt. % and mechanical properties of aluminum alloys 2024-T351 and 6082-T6 [20].

	Mn %	Fe %	Mg %	Si %	Cu %	Zn %	Ti %	Cr %	Al %
6082 T6	0,4... 1,0	0 ... 0,5	0,6 ... 1,2	0,7 ... 1,3	0 ... 0,1	0 ... 0,2	0 ... 0,1	0 ... 0,25	Balans
2024 T351	0,65	0,17	1,56	0,046	4,7	0,11	0,032		Balans
	Granica tečenja min R_{eH} /MPa		Zatezna čvrstoća min R_m /MPa		Izduženje do loma min A / %		Tvrdoća HV		
2024 T351	310		425		10		137		
6082 T6	240		295		10		95		

Za zavarivanje različitih legura 2024 T351 i 6082 T6 MIG i TIG postupcima, žice sa oznakama 4043 ili 5356 mogu da se koriste kao dodatni materijali. U ovom radu, izabran je dodatni materijal 4043 (AlSi5), tj. legura Al sa približno 5 mas. % silicijuma. Hemijski sastav korišćenog dodatnog materijala je dat u Tabeli 2:

Tabela 2. Hemijski sastav dodatnog materijala žice EN ISO 18273 S Al 4043A (AlSi5) u mas. %.

Table 2. Chemical composition of the filler wire EN ISO 18273 S Al 4043A (AlSi5) in wt. %.

Mn %	Fe %	Mg %	Si %	Cu %	Zn %	Ti %	Be %	Al %
<0,15	<0,6	<0,2	4,5 ... 5,5	<0,3	<0,1	<0,15	<0,0003	Balans

Sledeće dimenzije ploča su korišćene pri zavarivanju: dužina 300 mm, širina 125 mm i debljina 8 mm.

Parametri sučeonog MIG postupka zavarivanja ploča legura EN AW 2024 T351 i EN AW 6082 T6 su dati u Tabeli 3.

Tabela 3. Parametri MIG postupka za sučeono zavarivanje ploča legura EN AW 2024-T351 i EN AW 6082-T6.

Table 3. MIG welding parameters for butt welding of EN AW 2024-T351 and EN AW 6082-T6 alloy plates.

Broj prolaza	Postupak EN ISO 4063	Struja zavarivanja I (A)	Napon zavarivanja U (V)	Dužina zavara / prolaza (cm)	Brzina žice (m/min)	Temperatura predgrevanja i međuprolaza (°C)	Brzina zavarivanja v (mm/s)	Uneta toplota (J/mm) $Q=I \cdot U \cdot \eta / v$
1	131	150	21	30	6,2	40	7	360
2	131	160	22	30	6,5	90	11,5	245
3	131	160	22	30	6,5	90	7,7	366
Efficiency $\eta=0,8$								



Parametri sučeonog TIG postupka zavarivanja ploča legura EN AW 2024 T351 i EN AW 6082 T6 su dati u tabeli 4.

Tabela 4. Parametri TIG postupka za sučeonu zavarivanje ploča legura EN AW 2024-T351 i EN AW 6082-T6 [20].

Table 4. TIG welding parameters for butt welding of EN AW 2024-T351 and EN AW 6082-T6 alloy plates.

Broj prolaza	Postupak EN ISO 4063	Struja zavarivanja I (A)	Napon zavarivanja U (V)	Dužina zavara / prolaza (cm)	Vreme zavarivanja (s)	Temperatura predgrevanja i međuprolaza (°C)	Brzina zavarivanja v (mm/s)	Uneta toplota (J/mm) $Q=I \cdot U \cdot \eta / v$
1	141	225	13,3	26	134	40	1,94	1311
2	141	235	13,1	26	95	90	2,74	955
3	141	195	13,3	26	104	90	2,5	882
4	141	195	13,3	26	72	90	3,6	612
Efficiency $\eta=0,85$								

Podaci vezani za korišćeni uređaj za zavarivanje, zaštitne gasove, predgrevanje i ostalo su dati u Tabeli 5.

Tabela 5. Ostali parametri MIG i TIG postupaka zavarivanja.

Table 5. Other parameters of the MIG and TIG welding processes.

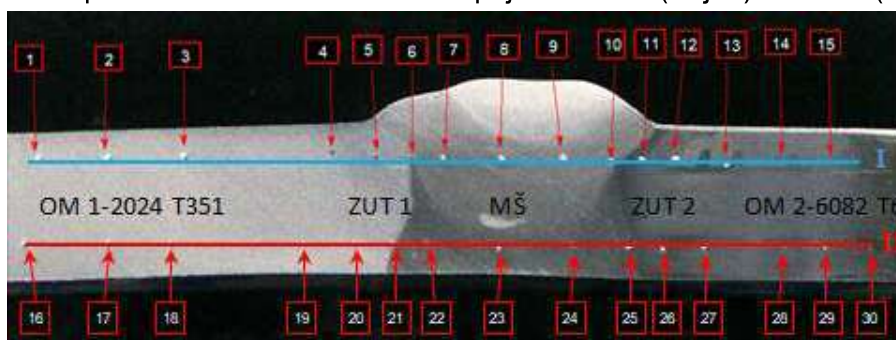
	MIG	TIG
Aparat za zavarivanje:	Fronius Trans Puls Synergic 4000	Magic Wave 4000 Job G/F -Fronius
Zaštitni gas:	I3-ArHe-30	I1-Ar (5.0)
Protok gasa:	18 l/min	12 l/min
Prečnik šobe:	Ø 12 mm	No.6 (Ø 9,5 mm)
Rastojanje šobe:	8 – 12 mm	10 – 12 mm
Ugao gorionika:	90°, Tehnika "unapred"	
Način predgrevanja:	Ne (zagrejano heftanjem)	

Iz zavarenih MIG i TIG zavarenih spojeva 2024-T351 i 6082-T6 su isečene epruvete vodenim mlazom upravno na pravac zavarenog spoja. Pripremljeni su uzorci za analizu makrostrukture i mikrostrukture zavarenih spojeva, za ispitivanje tvrdoće, kao i epruvete za ispitivanje na zatezanje i savijanje.

Za analizu mikrostrukture korišćen je optički mikroskop Leica Q500MC. Mikrostruktura je ispitana na poprečnom preseku uzoraka nakon

uobičajene metalografske pripreme i nagrizanja u Kelerovom reagensu.

Merenja tvrdoće prema Vickersu su izvršena na uređaju za merenje tvrdoće Willson VH1150. Prema standardnoj proceduri, tri merenja tvrdoće su izvedena u OM1 (2024-T351), tri u ZUT-u 1 na strani OM1, tri u MŠ, tri u ZUT-u 2 na strani OM2 (6082-T6) i tri u OM2 (6082-T6). Na Slici 1 su prikazane lokacije merenja tvrdoće u zavarenom spoju blizu lica (linija I) i korena (linija II) zavara.

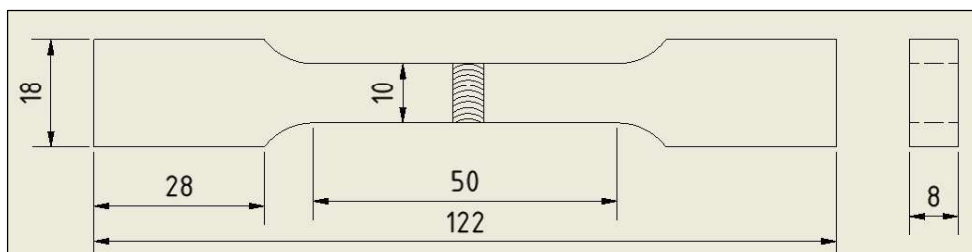


Slika 1. Mesta merenja tvrdoće na zavarenom spoju.

Figure 1. Hardness measurement locations on the welded joint.



Zatezna svojstva zavarenih spojeva su određena na sobnoj temperaturi korišćenjem kicalice Shimadzu AG-X 300 kN. Za ispitivanje su korišćene epruvete dimenzija definisanih standardom ASTM E8M (Slika 2).



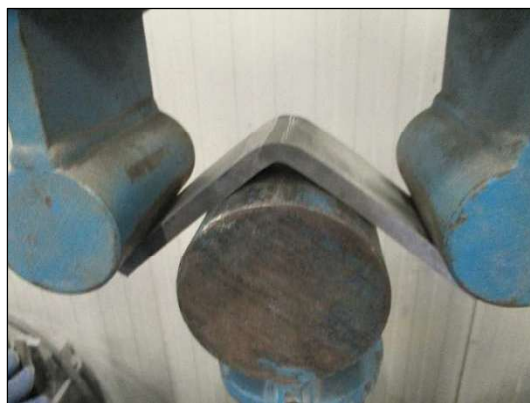
Slika 2. Dimenzije epruvete za ispitivanje na zatezanje (u mm).

Figure 2. Dimensions of the tensile test specimen (in mm).

Testovi savijanja korena i lica zavarenog spoja su data na Slici 3. Test je vršen na sobnoj temperaturi primenom metode savijanja u tri tačke.



a)



b)



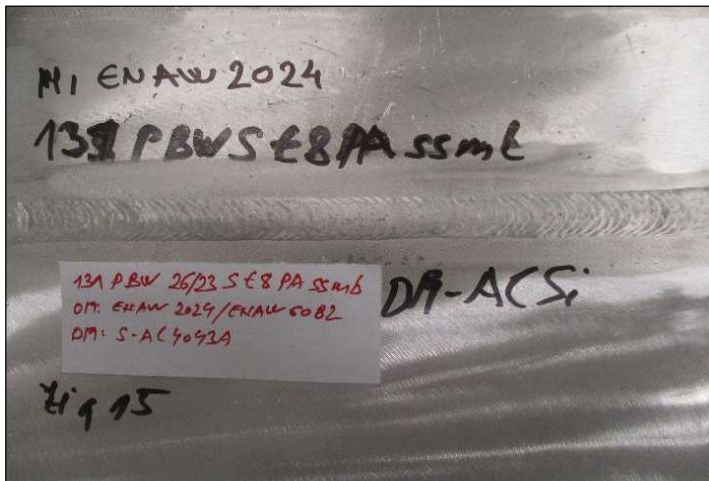
c)



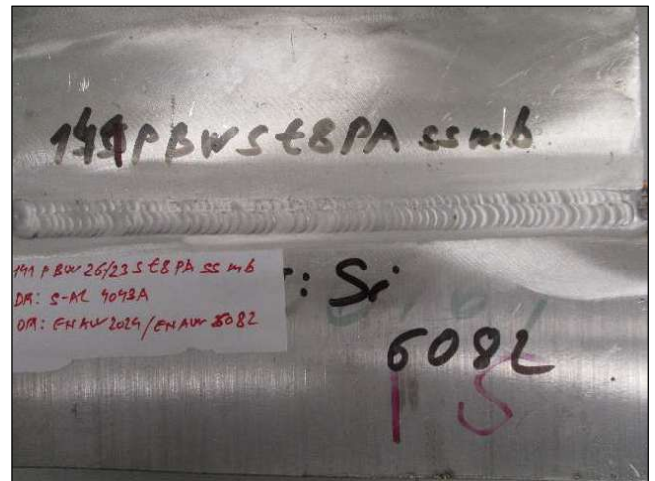
d)

Slika 3. Epruvete u trenutku pucanja prilikom ispitivanja na savijanje u tri tačke: a) savijanje korena MIG zavarenog spoja, b) savijanje lica MIG zavarenog spoja, c) savijanje korena TIG zavarenog spoja i d) savijanje lica TIG zavarenog spoja.

Figure 3. Specimens at the moment of fracture during three-point bending tests: a) root bending of the MIG welded joint, b) face bending of the MIG welded joint, c) root bending of the TIG welded joint, and d) face bending of the TIG welded joint.



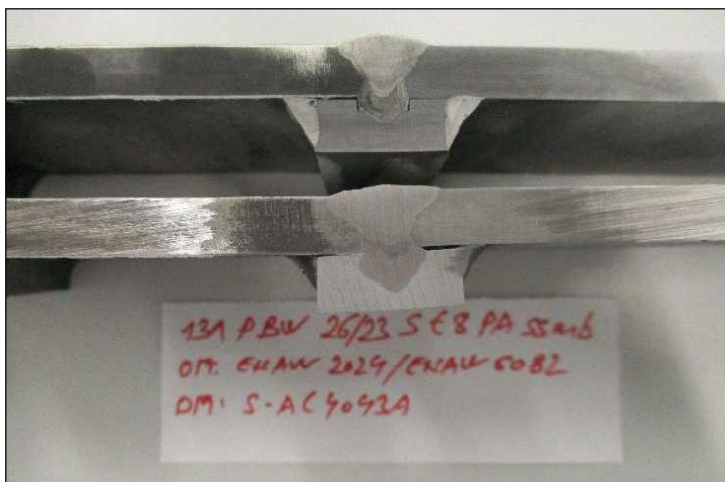
a)



b)

Slika 4. Izgled zavarenog spoja: a) MIG; b) TIG.

Figure 4. Appearance of the welded joint: a) MIG; b) TIG.



a)

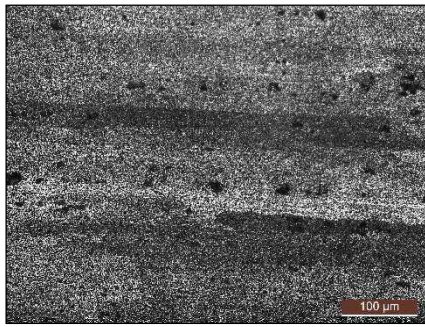


b)

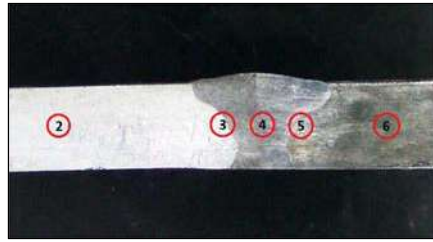
Slika 5. Makrostruktura zavarenog spoja rađenog sa korenom letvom: a) MIG; b) TIG.

Figure 5. Macrostructure of the welded joint produced with a backing strip: a) MIG; b) TIG.

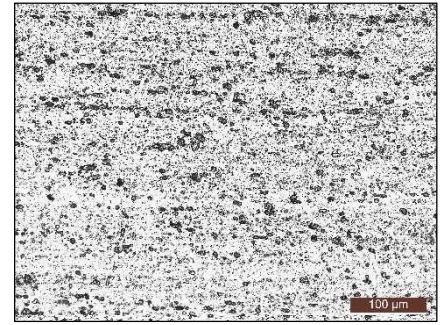
Na Slici 6 je dat prikaz tipične mikrostrukture zavarenog spoja dobijenog MIG postupkom, dok su na slici 7 prikazane tipične mikrostrukture zavarenog spoja dobijenog TIG postupkom. U oba slučaja (Slike 6 i 7), prikazane su mikrostrukture u zonama osnovnih materijala (OM), zonama uticaja toplote (ZUT) i u metalu šava (MŠ).



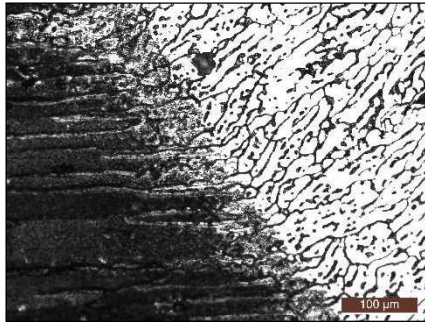
a) OM 1 – 2024-T351



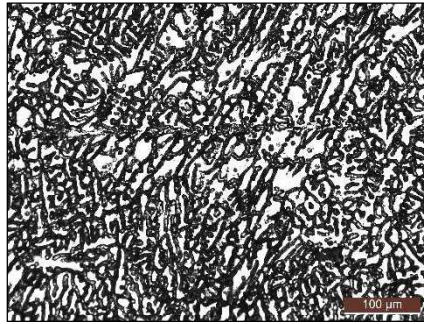
Makrostruktura MIG zavarenog spoja
2024-6082



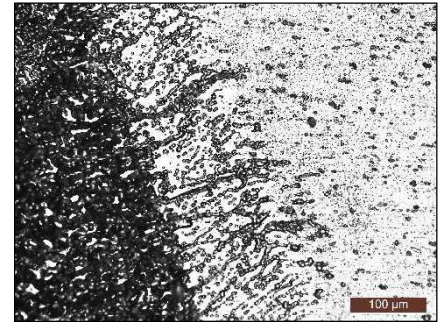
b) OM 2 – 6082-T6



c) ZUT 1 (OM 1– 2024 T351/MŠ)



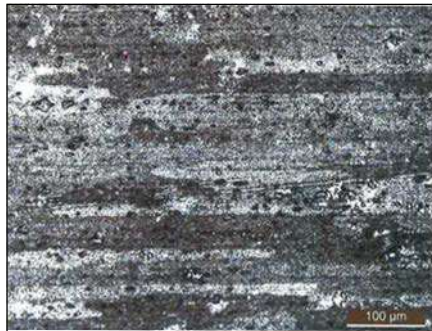
d) MŠ



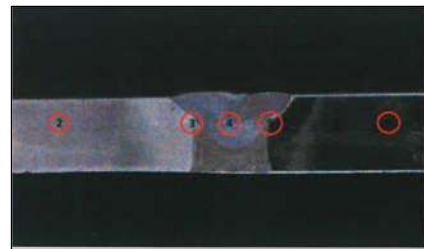
e) ZUT 2 (MŠ/OM 2– 6082)

Slika 6. Mikrostruktura MIG zavarenog spoja AA2024 T351/AA6082 T6 [20].

Figure 6. Microstructure of the MIG welded joint AA2024-T351/AA6082-T6 [20].



a) OM 1 – 2024 T351



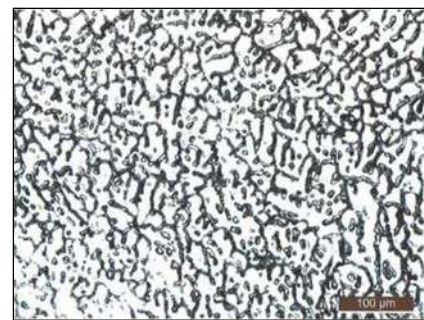
Makrostruktura TIG zavarenog spoja
2024-6082



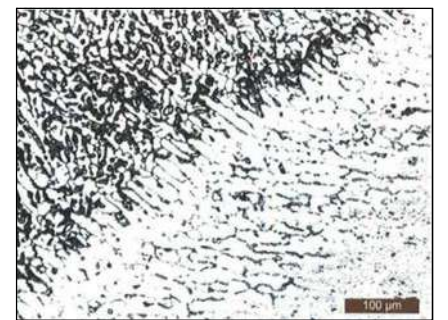
b) OM 2 – 6082 T6



c) ZUT 1 (OM 1-2024 T351/MŠ)



d) MŠ



e) ZUT 2 (MŠ/OM 2-6082 T6)

Slika 7. Mikrostruktura TIG zavarenog spoja AA2024 T351/AA6082 T6 [21].

Figure 7. Microstructure of the TIG welded joint AA2024-T351/AA6082-T6 [21].



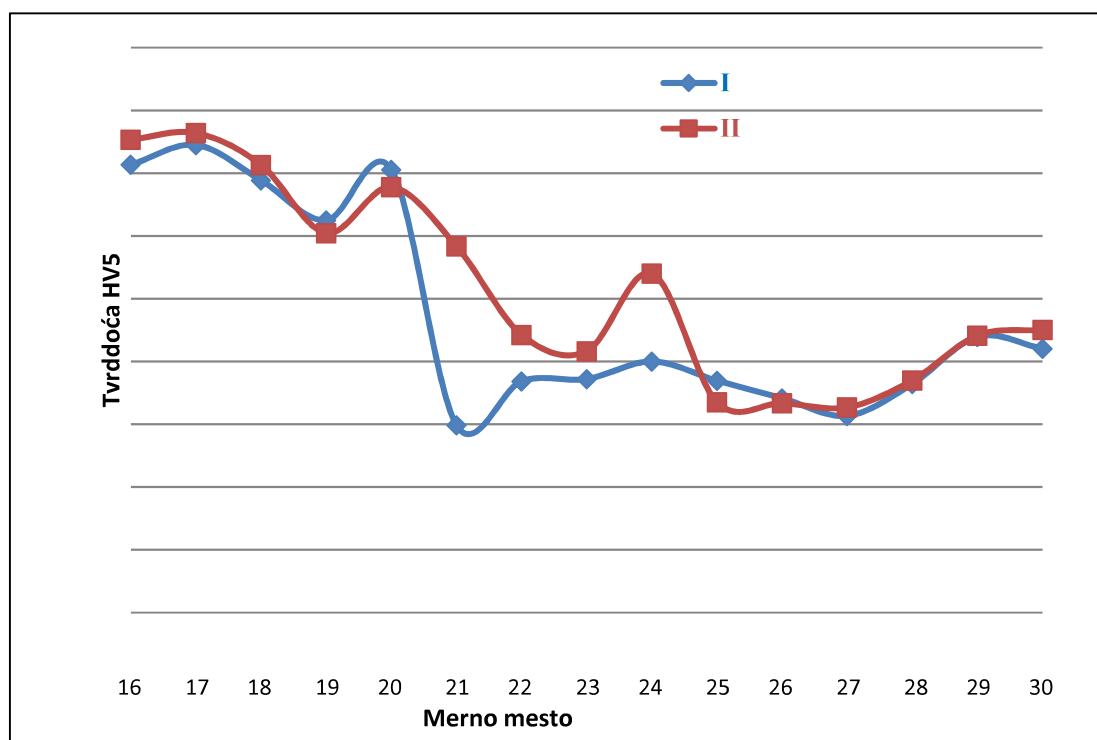
Rezultati merenja tvrdoće MIG zavarenog spoja su dati u Tabeli 6, a dijagram profila tvrdoće sa merenjima duž dva horizontalna pravca blizu lica i blizu korena zavarenog spoja je dat na Slici 8.

Tabela 6. Rezultati merenja tvrdoće MIG zavarenog spoja 2024-T351/6082 T6 [20].

Table 6. Hardness measurement results of the MIG welded joint 2024-T351/6082-T6 [20].

Merno mesto Linija I / Linija II	Zona mesta otiska	Izmerena vrednost Linija I / Linija II (HV)	Merno mesto Linija I / Linija II	Zona mesta otiska	Izmerena vrednost Linija I / Linija II (HV)
1/16	OM 1	142,7/150,7	9/24	MŠ	80,0/108,1
2/17	OM 1	149,0/152,8	10/25	ZUT 2	73,9/67,0
3/18	OM 1	137,7/142,6	11/26	ZUT 2	68,3/66,7
4/19	ZUT 1	125,0/120,9	12/27	ZUT 2	62,7/65,4
5/20	ZUT 1	141,1/135,6	13/28	OM 2	72,9/74
6/21	ZUT 1	59,7/116,7	14/29	OM 2	87,9/88,3
7/22	MŠ	73,7/88,5	15/30	OM 2	84,1/90,1
8/23	MŠ	74,4/83,3			

OM 1–2024 T351 OM – osnovni metal
 ZUT 1 – OM 1 / MŠ ZUT – zona uticaja toplote
 MŠ – metal šava
 ZUT 2 – MŠ / OM 2
 OM 2–6082 T6



Slika 8. Raspodela tvrdoće kroz sučeoni MIG zavareni spoj legura 2024-T351/6082-T6.

Figure 8. Hardness distribution across the butt MIG welded joint of 2024-T351/6082-T6 alloys.

Rezultati merenja tvrdoće TIG zavarenog spoja su dati u Tabeli 7, a dijagram profila tvrdoće sa

merenjima duž dva horizontalna pravca blizu lica i blizu korena zavarenog spoja je dat na Slici 7.


Tabela 7. Rezultati merenja tvrdoće TIG zavarenog spoja 2024-T351/6082 T6 [21].

Table 7. Hardness measurement results of the TIG welded joint 2024-T351/6082-T6 [21].

Merno mesto Linija I / Linija II	Zona mesta otiska	Izmerena vrednost Linija I / Linija II (HV)	Merno mesto Linija I / Linija II	Zona mesta otiska	Izmerena vrednost Linija I / Linija II (HV)
1/16	OM 1	117.4/123.0	9/24	MŠ	54.3/54.9
2/17	OM 1	111.4/117.2	10/25	ZUT 2	66.3/63.3
3/18	OM 1	92.1/110.5	11/26	ZUT 2	62.7/63.2
4/19	ZUT 1	96.7/89.3	12/27	ZUT 2	46.7/50.3
5/20	ZUT 1	98.4/87.3	13/28	OM 2	54.3/51.6
6/21	ZUT 1	110.1/88.6	14/29	OM 2	60.3/57.4
7/22	MŠ	60.9/57.4	15/30	OM 2	62.6/61.9
8/23	MŠ	57.8/54.2			

OM 1–2024 T351 OM – osnovni metal
 ZUT 1 – OM 1 / MŠ ZUT – zona uticaja toplote
 MŠ – metal šava
 ZUT 2 – MŠ / OM 2
 OM 2–6082 T6

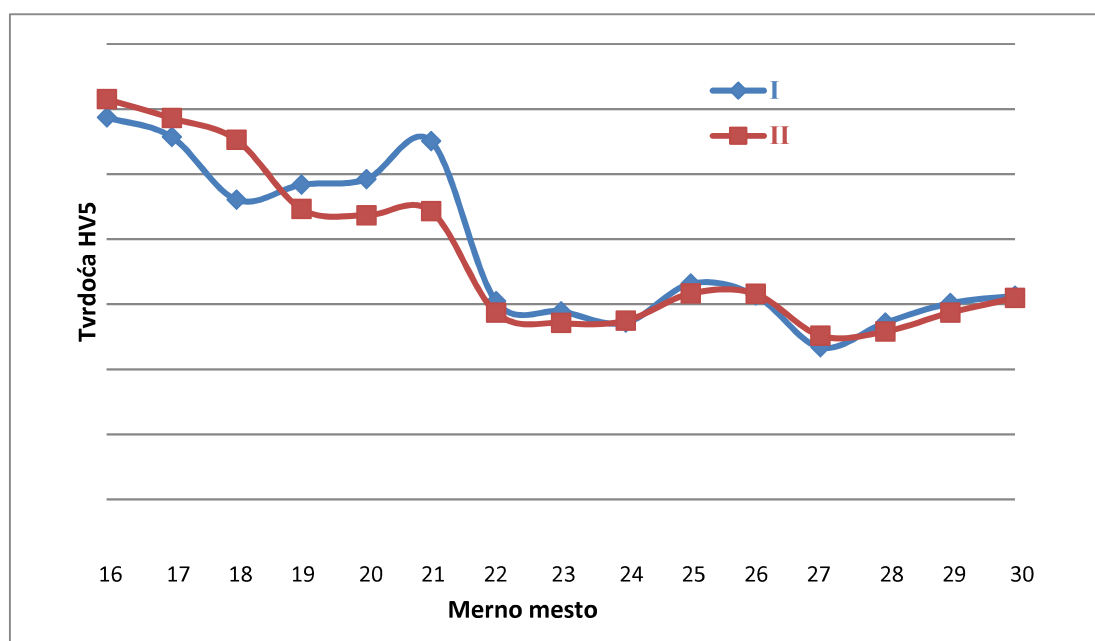

Slika 9. Raspodela tvrdoće kroz sučeoni TIG zavareni spoj legura 2024-T351/6082-T6.

Figure 9. Hardness distribution across the butt TIG welded joint of 2024-T351/6082-T6 alloys.


a)



b)

Slika 10. Epruvete nakon ispitivanja na zatezanje: a) MIG zavareni spoj i b) TIG zavareni spoj.

Figure 10. Specimens after tensile testing: a) MIG welded joint and b) TIG welded joint.



Rezultati ispitivanja zateznih svojstava ($R_{p0,2}$, R_m , A) sučeono zavarenih spojeva legura Al 2024 T351 i 6082 T6 dobijenih MIG i TIG postupcima zavarivanja su dati u Tabeli 8.

Tabela 8. Rezultati ispitivanja na zatezanje.

Table 8. Tensile test results.

Postupak zavarivanja	Granica tečenja $R_{p0,2}$ (MPa)	Zatezna čvrstoća R_m (MPa)	Izduženje posle prekida A (%)	Mesto preloma
MIG	113	198	7,3	OM2
TIG	86	166	10,7	OM2

U Tabeli 9 su dati rezultati ispitivanja na savijanje MIG i TIG zavarenih spojeva legura 2024-T351 i 6082-T6.

Tabela 9. Rezultati ispitivanja na savijanje MIG i TIG zavarenih spojeva Al legura 2024-T351 i 6082 T6.

Table 9. Bending test results of MIG and TIG welded joints of Al alloys 2024-T351 and 6082-T6.

	MIG zavareni spoj	TIG zavareni spoj
Ugao savijanja oko korena šava, °	50 (početak pucanja)	73 (početak pucanja)
Ugao savijanja oko lica šava, °	83 (početak pucanja)	95 (početak pucanja)

3. Diskusija rezultata

U ovom radu sprovedena su makrostrukturna i mikrostrukturna ispitivanja zavarenog spoja kao i ispitivanja mehaničkih svojstava sučeono zavarenih spojeva legura EN AW 2024 T351 i EN AW 6082 T6. Leguru EN AW 2024 T351 karakteriše skoro potpuna nezavarljivost klasičnim postupcima zavarivanja, dok je legura EN AW 6082-T6 dobro zavarljiva. Zavarivanje ove dve legure izvršeno je MIG i TIG postupcima. U slučaju zavarivanja MIG postupkom, zavarivanje je izvedeno primenom zaštitne gasne smeše Ar i He i dodatnog materijala 4043 (AlSi5), dok je u slučaju zavarivanja TIG postupkom zavarivanje sprovedeno primenom zaštitnog gasa Ar čistoće 99,999% i istog dodatnog materijala.

Mikrostrukture OM 1 (legure 2024-T351), koje su dobijene MIG i TIG postupcima, prikazane su na Slikama 6a i 7a, respektivno. Na uzorcima su uočena izdužena zrna u pravcu valjanja, kao i prisustvo čestica sitnog taloga. Mikrostrukture OM 2 (legure 6082-T6), koje su dobijene MIG i TIG postupcima, prikazane su na Slikama 6b i 7b, respektivno. Na uzorcima se uočavaju intermetalne faze (IMF) izdvojene u obliku krupnijih čestica u pravcu valjanja, kao i sitne čestice taloga koje su nastale tokom starenja.

MIG odnosno TIG postupkom zavarivanja se tope dodatni materijal i delovi OM1 i OM2 čime se stvara

MŠ sa strukturom koja je drugačija od strukture OM1 i OM2. Veći procenat Si (oko 5%) u hemijskom sastavu dodatnog materijala je koristan za povećanje duktilnosti zavarene strukture. Zona topljenja, ili oblast MŠ, nastaje popunjavanjem prethodno pripremljenog žleba rastopljenim dodatnim materijalom. Po završetku očvršćavanja, MŠ ima karakterističnu strukturu livenja. Sloj koji poslednji očvršćava ima izrazito dendritnu strukturu za koju je karakteristična pojava likvacije, tj. lokalne hemijske nehomogenosti, usled nedovoljno vremena za difuziju atoma legirajućih elemenata. Na Slikama 6d i 7d su prikazane mikrostrukture MŠ koje su dobijene MIG i TIG postupcima zavarivanja, respektivno. Kod obe vrste zavarenih spojeva, u zoni MŠ, uočavaju se čestice taloga izdvojene po granicama zrna. Zrna su različitih veličina i imaju usmerenu orijentaciju.

Na Slikama 6e i 7e su date mikrostrukture ZUT 2 između MŠ i OM 2 (6082 T6) MIG i TIG zavarenih spojeva, respektivno. U MŠ do ZUT-a je prisutna uska zona stubastih kristala. Grublje čestice taloga su izdvojene po granicama i unutar zrna. Talog u ZUT-u je izdvojen nasumično u vidu globularnih krupnih čestica. Na Slikama 6c i 7c su date mikrostrukture ZUT 1 između MŠ i OM 1 (2024 T351) MIG i TIG zavarenih spojeva, respektivno. U ZUT-u, talog je izdvojen po granicama zrna. U MŠ

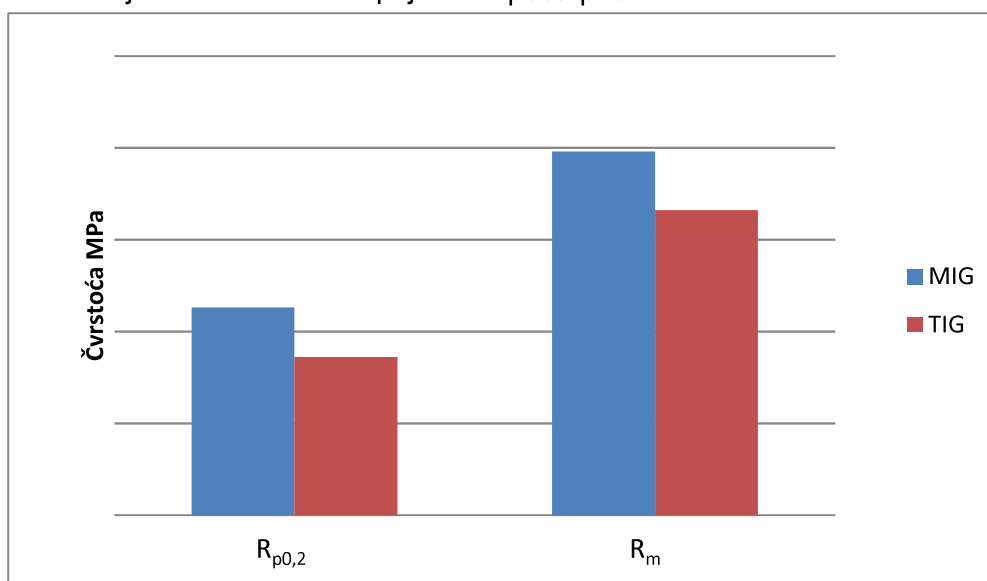


do ZUT-a, talog je izdvojen po granicama zrna stubaste morfologije.

Što se tiče mehaničkih svojstava sučeonog zavarenog spoja 2024-T351 i 6082-T6, legura 2024-T351 poseduje mehanička svojstva (zatezna čvrstoća i granica tečenja) približna svojstvima konstrukcionih čelika i superiornija od svojstava 6082-T6 zbog efekta legirajućeg elementa Cu koji utiče na povećanje čvrstoće.

Mikrostrukture MŠ koje su dobijene MIG i TIG postupcima zavarivanja se značajno razlikuju od mikrostruktura OM1 i OM2. Saglasno tome su i zatezna mehanička svojstva zavarenih spojeva

bolja od mehaničkih svojstava OM 2 – 6082 T6, te je prilikom ispitivanja na zatezanje lom bio u delu OM 2 (6082 T6). Presek površine loma epruvete za ispitivanje na zatezanje prikazan je na Slici 9. Poređenjem rezultata ispitivanja mehaničkih svojstava zavarenih spojeva legura 2024 T351 i 6082 T6 dobijenih MIG i TIG postupcima zavarivanja (Slika 11) uočava se da su zatezna čvrstoća i granica tečenja sučeono zavarenih spojeva ostvarena MIG postupkom povoljnija od svojstava zavarenih spojeva dobijenih TIG postupkom. Svojstvo izduženja je bilo za oko 30% bolje u slučaju zavarenih spojeva ostvarenih TIG postupkom.



Slika 11. Zatezna čvrstoća i granica tečenja sučeono zavarenih spojeva legura 202 -T351 i 6082-T6 MIG i TIG postupcima zavarivanja.

Figure 11. Tensile strength and yield strength of butt-welded joints of 2024-T351 and 6082-T6 alloys produced by MIG and TIG welding processes.

Maksimalne zatezne čvrstoće OM1 (2024-T351) i OM2 (6082-T6) su iznosile 425 i 295 MPa, respektivno. Maksimalna zatezna čvrstoća MIG zavarenog spoja je bila niža od čvrstoće OM1 i OM2 za 54 i 33%, respektivno. Maksimalna zatezna čvrstoća TIG zavarenog spoja je bila niža od čvrstoće OM1 i OM2 za 61 i 44%, respektivno. Rezultati dobijeni u ovom istraživanju su u skladu sa rezultatima prethodnih istraživanja [8, 22].

Rezultati ispitivanja na savijanje ukazuju na loša tehnološka svojstva zavarenih spojeva. Mali ugao savijanja do pojave prsline ukazuje da su zavareni spojevi veoma kruti, što je u saglasnosti sa prethodno objavljenim rezultatima [7-10].

Tvrdoća MŠ kod MIG zavarenog spoja, mereno blizu lica i blizu korena zavora, je iznosila oko 80 HV, što je bilo manje u odnosu na mekši OM2 (6082-T6), koji je imao tvrdoću oko 90 HV, a

značajnije manje u odnosu na OM1 (2024-T351), koji je imao tvrdoću oko 150 HV. Tvrdoća ZUT 2 je iznosila oko 60 HV i bila je manja nego u MŠ zbog rasta zrna u ovoj zoni. S druge strane, tvrdoća u ZUT 1 je iznosila oko 120 HV.

Tvrdoća metala šava kod TIG zavarenog spoja, mereno blizu lica i blizu korena zavora je iznosila oko 60 HV, što je bilo niže u odnosu na tvrdoću MŠ dobijenog primenom MIG postupka zavarivanja. Tvrdoća ZUT 2 je iznosila oko 50 HV i bila je niža nego u istoj zoni zavarenog spoja ostvarenog MIG postupkom zavarivanja. S druge strane, tvrdoća u zoni ZUT 1 je iznosila oko 90 HV, što je opet bila niža tvrdoća nego kod zavarenog spoja ostvarenog MIG postupkom zavarivanja. Uopšteno, TIG zavareni spoj legura 2024 T351 i 6082 T6 je ispoljavao strukture niže tvrdoće u poređenju sa tvrdoćom zavarenog spoja legura 2024 T351 i 6082 T6.



4. Zaključak

Na osnovu napred navedenog može se zaključiti:

- Zatezna čvrstoća i granica tečenja kod TIG zavarenih spojeva su bile za oko 20% niže u poređenju sa istim svojstvima MIG zavarenih spojeva legura EN AW 2024 T351 i EN AW 6082 T6.
- Duktilnost TIG zavarenih spojeva je bila za oko 30% veća nego u slučaju MIG zavarenih spojeva legura EN AW 2024 T351 i EN AW 6082 T6.
- Nezavisno od primenjenog postupka zavarivanja (MIG ili TIG), lom epruvete ispitane na zatezanje je konzistentno bio lociran u OM2 (6082-T6).
- Tvrdća MŠ kod TIG zavarenih spojeva je bila za oko 25% niža u odnosu na tvrdoću MŠ MIG zavarenih spojeva legura EN AW 2024 T351 i EN AW 6082 T6.
- Kod TIG postupka zavarivanja, unešena se veća količina toplote prilikom ostvarivanja spoja legura EN AW 2024 T351 i EN AW 6082 T6. Ovo je uticalo da su tvrdoće u ZUT 1 i ZUT 2 bile niže nego u korespondentnim zonama zavarenih spojeva ostvarenih MIG postupkom zavarivanja.
- Tvrdća kod TIG i MIG zavarenih spojeva je bila najniža u zoni MŠ.

Zahvalnica / Acknowledgements

Ovaj istraživački rad finansijski je podržalo Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije (Ugovor br. 451-03-65/2024-03). Ovaj rad je rezultat istraživanja u okviru bilateralnog

Literatura / References

- [1] Bohnart, Edvard R. TIG Handbook for GTAW Gas Tungsten Arc Welding. Miller Electric Manufacturing, LLC Company: Appleton, WI, USA, 2005.
- [2] Muncaster, Peter W. A Practical Guide to TIG (GTA) Welding. Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 1991.

4. Conclusion

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

- The tensile strength and yield strength of TIG-welded joints were approximately 20% lower than those of MIG-welded joints of EN AW 2024-T351 and EN AW 6082-T6 aluminum alloys.
- The ductility of TIG-welded joints was approximately 30% higher than that observed in MIG-welded joints of EN AW 2024-T351 and EN AW 6082-T6 aluminum alloys.
- Regardless of the welding process applied (MIG or TIG), fracture of the tensile test specimens consistently occurred in the base metal of the aluminum alloy 6082-T6 (BM2) for both MIG- and TIG-welded joints.
- The hardness of the weld metal in TIG-welded joints was approximately 25% lower than the hardness of the weld metal in MIG-welded joints of EN AW 2024-T351 and EN AW 6082-T6 aluminum alloys.
- During the TIG welding process, a higher heat input was introduced during the formation of welded joints of EN AW 2024-T351 and EN AW 6082-T6 aluminum alloys. Consequently, the hardness values in the heat-affected zones (HAZ1 and HAZ2) were lower than those measured in the corresponding zones of joints produced by the MIG welding process.
- For both TIG- and MIG-welded joints, the lowest hardness values were observed in the weld metal zone.

projekta sa Republikom Slovenijom "Obezbeđenje visoke pouzdanosti aluminijumskih struktura i njihovih delova u transportnoj tehnici" u projektnom ciklusu 2020-2022 (br.projekta 337-00-21/2020-09/48).

[3] Jeffus, L., Welding: Principles and Applications; Delmar Cengage Learning: Boston, MA, USA, 2016.

[4] Adibeig, M.R., Hassanifard, S., Vakili-Tahami, V., Hattel, J.H., Experimental investigation of tensile strength of friction stir welded butt joints on PMMA Materials Today Communications, 17 (2018), pp. 238-245.



- [5] Rokni, M.R., Zarei-Hanzaki, A., Roostaei, A.A., Abolhasani, A., Constitutive base analysis of a 7075 aluminum alloy during hot compression testing, *Materials & Design*, 32 (2011), 10, pp. 4955-4960.
- [6] Kumar, B., Kumar, P., Preparation of hybrid reinforced aluminium metal matrix composite by using ZrB₂: A systematic review, *Materials Today: Proceedings*, 61 (2022), 1, pp. 115-120.
- [7] Lean, P.P., Gil, L., Ureña, A., Dissimilar welds between unreinforced AA6082 and AA6092/SiC/25p composite by pulsed-MIG arc welding using unreinforced filler alloys (Al-5Mg and Al-5Si), *Journal of Materials Processing Technology*, 143-144 (2003), pp. 846-850. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00331-5](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00331-5).
- [8] Nasser, N.J., Mechanical Properties of MIG Joints for Dissimilar Aluminum Alloys (2024-T351 and 6061-T651). *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, 12 (2016), 3, pp. 121-128.
- [9] Kaba, L., Djeghlal, M.E., Ouallam, S., Kahla, S., Dissimilar welding of aluminum alloys 2024 T3 and 7075 T6 by TIG process with double tungsten electrodes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 118 (2022), pp. 937-948. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-408163/v1>.
- [10] Lalvani, H., Mandal, P., Cold forming of Al-5251 and Al-6082 tailored welded blanks manufactured by laser and electron beam welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 68 (2021), Part A, pp. 1615-1636. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.070>.
- [11] Milčić, M., Vuherer, T., Radisavljević, I., Milčić, D., Experimental Investigation of Mechanical Properties on Friction Stir Welded Aluminum 2024 Alloy. Springer Nature Switzerland AG 2019, N. Mitrovic et al. (Eds.): CNNTech 2018, LNNS 54, pp. 44-58, (2019).
- [12] Milčić, M., Vuherer, T., Radisavljević, I., Milčić, D., Kramberger, J., The influence of process parameters on the mechanical properties of friction-stir-welded joints of 2024 T351 aluminum alloys, *Materiali in Tehnologije*, 53 (2019), 6, pp. 771 - 776. doi: 10.17222/mit.2019.062.
- [13] Vuherer, T., Milčić, M., Glodež, S., Milčić, D., Radović, Lj., Kramberger, J., Fatigue and fracture behaviour of Friction Stir Welded AA-2024-T351 joints, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 114 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2021.103027>
- [14] Milčić, M., Milčić, D., Vuherer, T., Radović, Lj., Radisavljević, I., Đurić, A., Influence of Welding Speed on Fracture Toughness of Friction Stir Welded AA2024-T351 Joints, *Materials* 14 (2021), 6: 1561. <https://doi.org/10.3390/ma14061561>.
- [15] Kasman, Ş., Yenier, Z. Analyzing dissimilar friction stir welding of AA5754/AA7075, *Int J Adv Manuf Technol*, 70 (2014), pp. 145-156. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5256-7>.
- [16] Hadji, I., Badji, R., Gaceb, M., Cheniti, B., Dissimilar FSW of AA2024 and AA7075: effect of materials positioning and tool deviation value on microstructure, global and local mechanical behavior, *Int J Adv Manuf Technol*, 118 (2022), pp. 2391-2403. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08120-0>.
- [17] Mastanaiah, P., Sharma, A., Reddy, G.M., Dissimilar Friction Stir Welds in AA2219-AA5083 Aluminium Alloys: Effect of Process Parameters on Material Inter-Mixing, Defect Formation, and Mechanical Properties, *Trans Indian Inst Met* 69 (2016), pp. 1397-1415. <https://doi.org/10.1007/s12666-015-0694-6>.
- [18] Amuthan, T., Nagaprasad, N., Krishnaraj, R., Narasimharaj, V., Balasubramaniam, S., Vignesh, V., Experimental study of mechanical properties of AA6061 and AA7075 alloy joints using friction stir welding, *Materials Today*, 47 (2021), 4, pp. 4330-4335.
- [19] Heinz, A. Haszler, C. Keidel, S. Moldenhauer, R. Benedictus, and W. Miller, "Recent development in aluminium alloys for aerospace applications", *Mater. Sci. Eng. A*, 280 (2000) 1, pp.102-107.
- [20] Milčić, D., Vuherer, T., Radović, Lj., Milčić, M., Mladenović, M., Radovanović, A., Radović, N., MIG welding process on the mechanical properties of butt welded joints of dissimilar aluminum alloys 2024-T351 /6082-T6, 10th International Scientific Conference on Defensive Technologies OTEH 2022, Beograd 13-14 Oktober 2022, pp.541-547.
- [21] Milčić, D., Milčić, M., Vuherer, T., Đurić, A., Mitić, D., Radovanović, A., Dissimilar welding of aluminum alloys 2024 T351 and 6082 T6 by TIG process, 12. Međunarodno znanstveno-stručno savjetovanje SBZ 2023 „STROJARSKE TEHNOLOGIJE U IZRADI ZAVARENIH KONSTRUKCIJA I PROIZVODA, SBZ 2023.“ Slavonski Brod, 26. i 27. 04. 2023. i Požega 28. 04. 2023, pp. 117-126.
- [22] Kaba, L., Djeghlal, M.E., Ouallam, S., Kahla, S., Dissimilar welding of aluminum alloys 2024 T3 and 7075 T6 by TIG process with double tungsten electrodes, *Int J Adv Manuf Technol*, 118 (2022), pp. 937-948. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07888-5>.



1. KONFERENCIJA SA MEĐUNARODNIM UČEŠĆEM

KONFERENCIJA O TEHNOLOGIJAMA SPAJANJA MATERIJALA CG 2026



1. Konferencija sa međunarodnim učešćem Konferencija o Tehnologijama Spajanja Materijala, CG2026 PRVO OBAVJEŠTENJE I POZIV ZA PRIJAVU RADOVA

14-16. maja 2026., Hotel Mediteran, Bečići, Crna Gora

DRUŠTVO ZA ZAVARIVANJE CRNE GORE i MAŠINSKI FAKULTET UNIVERZITETA CRNE GORE organizuju od 14. do 16. maja 2026. godine 1. Konferencije sa međunarodnim učešćem - Konferencija o Tehnologijama Spajanja Materijala, CG2026 i poziva autore da prijave radove na teme:

- (1) KONVENCIONALNI I NEKONVENCIONALNI POSTUPCI ZAVARIVANJA
- (2) ROBOTIZACIJA I AUTOMATIZACIJA
- (3) OSNOVNI, DODATNI I POMOĆNI MATERIJALI
- (4) IZRADA ZAVARENIH KONSTRUKCIJA
- (5) INTEGRITET KONSTRUKCIJA I OSIGURANJE KVALITETA
- (6) OPREMA ZA ZAVARIVANJE I SRODNE POSTUPKE
- (7) TEHNIČKA REGULATIVA, OBRAZOVANJE, EKOLOGIJA I ZAŠTITA

VAŽNI DATUMI

Prijava rada uz dostavu naziva rada i apstrakta (do 300 reči, do 5 ključnih pojmova) 31. Januar 2026.
 Obavještenje autorima o prihvatanju apstrakta uz dostavljanje uputstva za pisanje rada 16. Februar 2026.
 Rok za dostavu radova 31. Mart 2026.
 Obavještenje o prihvatanju radova 20. April 2026.
 Rok za prijavu učesnika konferencije 4. Maj 2026.



Isak Karabegović ^{1,a}, Sead Pašić ^{2,b}, Edina Karabegović ^{3,c}

TREND IMPLEMENTACIJE I RAZVOJA INDUSTRIJSKIH ROBOTA U PROCESIMA ZAVARIVANJA U SVIJETU

TREND OF IMPLEMENTATION AND DEVELOPMENT OF INDUSTRIAL ROBOTS IN WELDING PROCESSES IN THE WORLD

Pregledni rad / Review paper

Rad primljen / Paper received:

Avgust 2024.

Rad prihvaćen / Paper accepted:

Novembar 2025.

Adresa autora / Author's address:

¹Akademija nauka i umjetnosti Bosne i Hercegovine, Sarajevo, Bosna i Hercegovina

²Univerzitet "Džemal Bijedić" Mostar, Bosna i Hercegovina

³Univerzitet u Bihaću, Tehnički fakultet Bihać, Bosna i Hercegovina

email / ORCID ID:

^a / 0000-0001-9440-4441

^b sead.pasic@unmo.ba / 0009-0004-6241-5129

^c / 0000-0003-3744-8979

Ključne reči: Industrijski robot, zavarivanje, implementacija, tačkasto zavarivanje, kolaborativni roboti

Keywords : Industrial robot, welding, implementation, spot welding, collaborative robots

Rezime

Prvi industrijski roboti pojavljuju se šezdesetih godina prošlog vijeka, a implementiraju se sve do danas u svim proizvodnim procesima u cijelom svijetu. Najveću primjenu industrijski roboti su našli u tri industrijske grane: automobilska industrija, elektro/elektronička industrija i metalna industrija. Automobilska industrija je prva koja je masovno implementirala industrijske robote, a u posljednjim godinama im se pridružila i elektro/elektronička industrija, tako da se u ove dvije industrijske grane implementira preko 60% od ukupno implementiranih industrijskih robota u svijetu. Industrijski roboti se koriste za izvršavanje onih zadataka koji su zamorni ili opasni za zdravlje radnika, a u takve se ubraja i zavarivanje, koje je veoma prisutno i u automobilskoj industriji. Najveći broj do danas implementiranih industrijskih robota su roboti prve generacije, koji su robusni, ograđeni (zbog zaštite radnika), zauzimaju mnogo prostora i komplikovani su za reprogramiranje. Razvoj novih tehnologija, kao što su: senzorska tehnologija, internet stvari (IoT), veliki podaci (Big Data), računarstvo u "oblaku" (Cloud Computing), virtuelna i proširena stvarnost (AR), vještačka inteligencija (AI), napredni sigurnosni sistemi i drugih, zaslužan je za razvoj robotske tehnologije. U radu je prikazan trend implementacije industrijskih robota, kao i njihova uloga u procesima zavarivanja.

Abstract

The first industrial robots appeared in the production processes in the 1960s have continued to be implemented in manufacturing worldwide. The greatest application of industrial robots has been observed in three major industries: the automotive industry, the electrical and electronics industry, and the metal industry. The automotive industry was the first to adopt the most industrial robots extensively, and in recent years the electrical and electronics industry has followed. Together, these two sectors account for more than 60% of the total number of industrial robots deployed worldwide. Industrial robots have primarily been used to perform tasks that are physically demanding and hazardous to workers' health, including welding operations, which are predominantly carried out in the automotive industry. To date, first-generation industrial robots have been the most widely implemented. These systems are typically enclosed by protective fences to ensure worker safety, occupy substantial floor space, and are relatively complex to reprogram. The development of advanced technologies — such as sensor systems, the Internet of Things (IoT), big data analytics, cloud computing, virtual and augmented reality (AR), artificial intelligence (AI), and advanced safety systems — has significantly contributed to the evolution of robotic technology. The present study presents current trends in the implementation of industrial robots and examines their role in welding processes.

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



1. Uvod

Jedna od osnovnih tehnologija četvrte industrijske revolucije je robotska tehnologija, bez koje ne bi ni bilo ove industrijske revolucije, odnosno Industrije 4.0 koja je nezvanično proglašena 2016. godine na svjetskom ekonomskom forumu [1-3]. U ovoj „svjetskoj revoluciji“ u industrijskoj proizvodnji se prelazi na sve prisutniju mobilnost, premoštavanje digitalnog i fizičkog okruženja, a korištenje temeljnih tehnologija Industrije 4.0 na potpuno novi način nas dovodi do širokih mogućnosti implementacije inovacija, automatizacije i optimizacije sa kojima se proizvodni procesi u industriji dovode na znatno viši nivo. Industrija 4.0 je koncept proizvodnje u kojoj je sve umreženo. U proizvodnim procesima mašine i uređaji su povezani bežičnom vezom i sensorima, a isto tako su povezani sa sistemom koji može sam donositi odluke, bazirane na velikom broju podataka koji se neprekidno prikupljaju iz procesa. Očekivanja su da će implementacija ovog koncepta poboljšati i unaprijediti sve aspekte i segmenta ljudskog života. U našem okruženju koncept Industrija 4.0 još uvijek nije šire rasprostranjen [4-6].

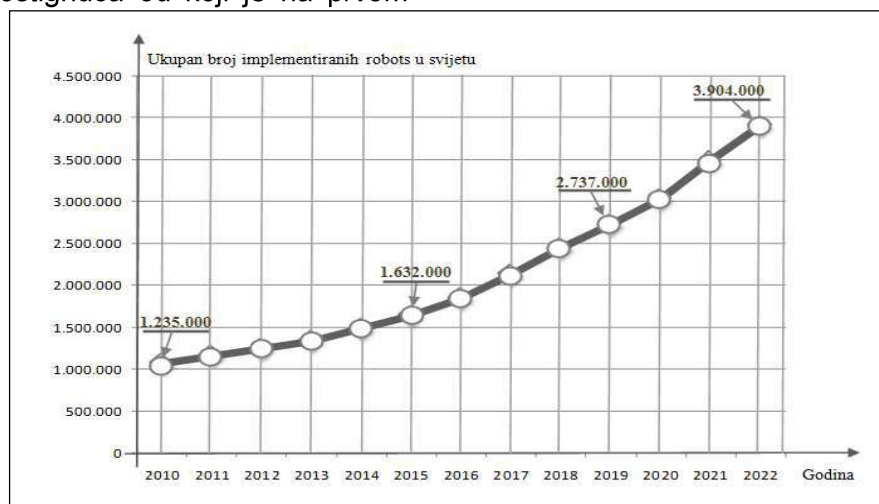
Industrija 4.0 u realnosti je nova faza u organizaciji i kontroli industrijskog lanca vrijednosti, koji se prvenstveno oslanja na sajber fizički sistem (CPS- Cyber-Physical-Systems), te njemu pripadajući servis, najčešće realiziran u oblaku (Cloud Coputing). Velike promjene se dešavaju u svim granama industrije: transformišu se proizvodni sistemi, sistemi transporta i isporuke, potrošnje i uvode se nove poslovne metode. Sve ove promjene možemo da pripišemo implementaciji novih tehnoloških dostignuća od koji je na prvom

mjestu robotska tehnologija a zatim i druge nove tehnologije, kao što su veliki podaci (Big Data), internet stvari (IoT), aditivne tehnologije, pametni senzori, umjetna inteligencija (AI), virtualna i proširena stvarnost (AR), napredni bezbjednosni sistemi itd. [7-10].

S obzirom na činjenicu da je automobilska industrija jedna od grana u kojoj se industrijski roboti najviše koriste, a da se najveći broj robota u automobilskoj industriji upotrebljava upravo u procesima zavarivanja, u ovome radu će se govoriti o mogućnostima primjene i razvoju industrijskih robota koji se koriste u procesima zavarivanja. U radu je izvršena analiza primjene industrijskih robota u cijelom svijetu, sa posebnim osvrtom na primjenu industrijskih robota u procesima zavarivanja. Implementacijom robotske tehnologije dolazi se do fleksibilne automatizacije, odnosno implementacijom baznih tehnologija Industrije 4.0 kompanija može da obezbjedi konkurentnu sposobnost na globalnom tržištu [11-14].

2. Trend implementacije industrijskih robota u svijetu

Realnu sliku primjene industrijskih robota u svijetu moguće je dobiti praćenjem njihove primjene u posljednjih deset godina. U tom smislu napravljena je analiza na osnovu statističkih podataka koji su preuzeti od International Federation of Robotics (IFR), Ekonomske komisije pri UN za Evropu (UNECE) i Organizacije za ekonomsku kooperaciju i razvoj (OECD). Trend implementacije industrijskih robota na godišnjem nivou u svijetu prikazan je na Slici 1 [15-18].



Slika 1. Svetski trend implementacije industrijskih robota za period 2010-2022. godina [15-18].

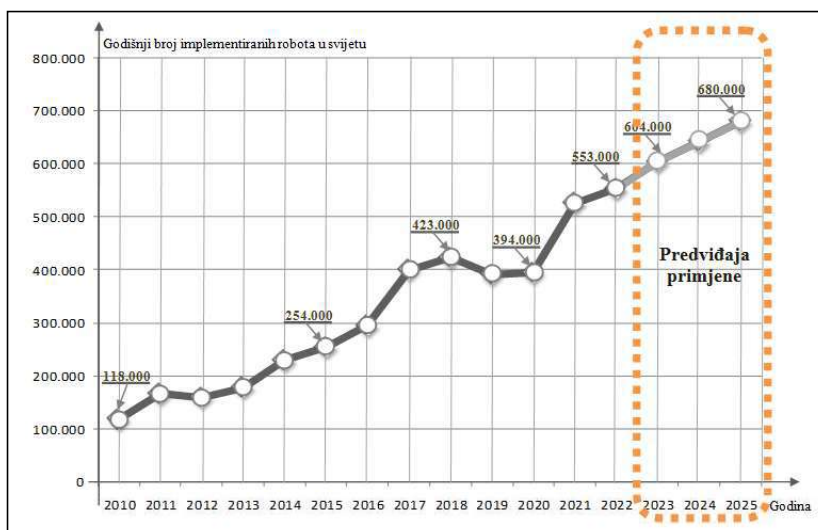
Figure 1. Global trend in the implementation of industrial robots for the period 2010–2022 [15–18].



Na osnovu prezentovanog dijagrama može se konstatovati da se ukupni broj industrijskih robota koji su instalirani u svijetu neprestano povećava. U posljednjih desetak godina taj broj je porastao za više od tri puta, odnosno sa 1,2 miliona industrijskih robota koliko je 2010. godine bilo u primjeni u svijetu u svim industrijskim granama, pa sve do 3,9 miliona robota koliko je bilo u primjeni 2022. godine. Dakle, trend ukupne primjene robota ostvaruje se po rastućoj funkciji uz pretpostavku da

će se u narednim godinama primjena industrijskih robota povećavati. Razlog za ovakvu konstataciju leži u činjenici što sve industrijski razvijene zemlje u svijetu, kao i zemlje u razvoju, imaju svoje strategije implementacije Industrije 4.0, a robotska tehnologija je jedna od glavnih baznih tehnologija Industrije 4.0.

Slični trendovi se mogu uočiti i u implementaciji novih industrijskih robota na godišnjem nivou u svijetu (Slika 2) [15-18].



Slika 2. Godišnji trend implementacije industrijskih robota u svijetu za period 2010–2022. godine, sa osvrtom na predviđanja do 2025. godine [15–18].

Figure 2. Annual trend in the implementation of industrial robots worldwide for the period 2010–2022, with projections up to 2025 [15–18].

Sa dijagrama se može uočiti da je tokom 2010. godine u proizvodnju implementirano oko 118.000 novih industrijskih robota. U narednim godina je taj trend samo rastao, tako da je 2018. godine dostigao broj od 423.000 novih robota. Tokom pandemije virusa Covid-19 dolazi do stagnacije u industrijskoj proizvodnji u cijelom svijetu, tako da 2019 i 2020. godine dolazi do opadanja primjene industrijskih robota. U tom periodu se instalira približno 390.000 jedinica robota godišnje. Po prestanku pandemije dolazi do povećanja trenda u implementaciji industrijskih robota, tako da se tokom 2022. godine primijenilo 553.000 jedinica novih robota. Predviđanja za period 2023–2025.godine ukazuju na dodatno povećanje u implementaciji industrijskih robota, tako da se očekuje da bi se u 2025. godini u cijelom svijetu moglo implementirati oko 680.000 jedinica industrijskih robota.

Implementacija industrijskih i servisnih robota u proizvodnim procesima ima za cilj povećanje produktivnosti, smanjenje troškova proizvodnje i postizanje boljeg kvaliteta proizvoda, a njihovom implementacijom se postiže upravo ono što zagovara Industrija 4.0, a to je veći stepen automatizacije sa zadovoljavajućom fleksibilnošću i većom proizvodnjom s ekonomskom opravdanošću, bilo da se radi o postojećim proizvodnim procesima ili uvođenju novih proizvodnih procesa. Proces zavarivanja je jedna od osnovnih proizvodnih tehnologija, koja se vrlo široko koristi metalnoj industriji, samim tim i u automobilskoj industriji. Primjena temeljnih tehnologija Industrije 4.0, a posebno industrijskih robota prve generacije, a u posljednjim godinama i robota druge generacije, u proizvodnim procesima automobilske i metalne industrije (Slika 3), dovodi do veće fleksibilnosti i efikasnosti u proizvodnji.



a)



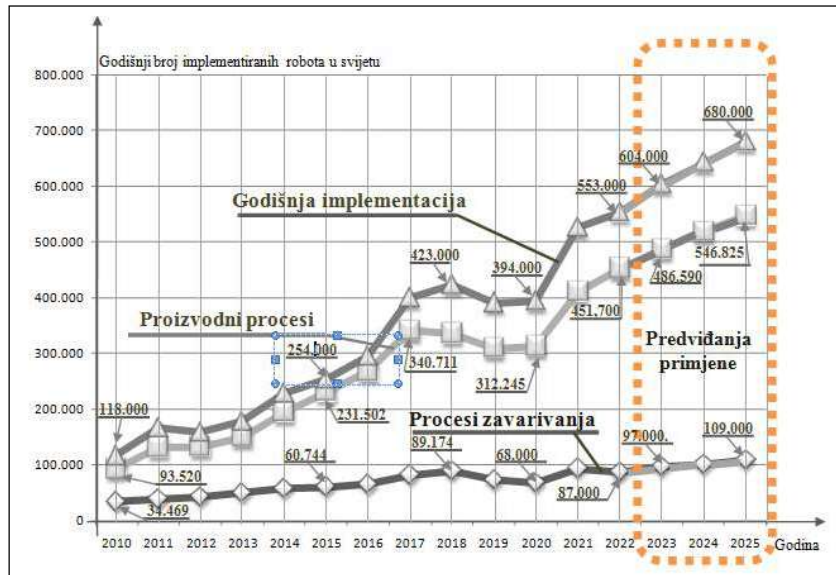
b)

Slika 3. Proces zavarivanja industrijskih robota a) I i b) II generacije [19,20].

Figure 3. Welding processes of industrial robots: a) I generation and b) II generation [19,20]

Analiza implementacije industrijskih robota u procesima zavarivanja izvršena je na osnovu podataka o implementaciji industrijskih i servisnih robota koja je preuzeta od International Federation

of Robotics (IFR), Ekonomske komisije pri UN za Evropu (UNECE) i Organizacije za ekonomsku kooperaciju i razvoj (OECD) i prikazana je na Slici 4 [15-18,21].



Slika 4. Primjena industrijskih robota u proizvodnim procesima i procesu zavarivanja u svijetu u periodu 2010-2022.godina, sa predviđanjem primjene do 2025.godine.

Figure 4. Application of industrial robots in manufacturing and welding processes worldwide during the period 2010–2022, with projections up to 2025.

Trend rasta godišnje implementacije robota u svijetu prati i trend primjene industrijskih robota u proizvodnim procesima svih industrijskih grana. Za ilustraciju ovoga rasta može se navesti da je u 2010. godini implementirano 93.520 jedinica robota, a u 2022. godini implementacija je iznosila preko 450.000 jedinica robota. U narednim godinama predviđa se dalji rast trenda implementacije industrijskih robota u proizvodnim procesima u svijetu, tako da bi u 2025. godini mogao dostići broj od skoro 550.000 implementiranih jedinica robota. Najveći broj implementiranih robota je u proizvodnim procesima

automobilske industrije, a koriste se u obavljanju zavarivanja karoserija, lakiranja, proizvodnji motora i raznih elementa koji su neophodni u automobilskoj industriji, kao i u montaži.

Primjena robota u procesu zavarivanja ima blago rastući trend iz godine u godinu, kako je prikazano na Slici 4. Tokom 2010. godine aplicirano je 34.469 novih robota za zavarivanje, a u 2022. godini je dostigao primjenu od oko 97.000 jedinica. Ovakav trend bi trebao da se nastavi, tako da bi 2025. godine u proizvodne procese trebalo da se implementira oko 109.000 novih robota za



zavarivanje. Evidentno je da je godišnji trend rasta u broju instaliranih robota za zavarivanje nešto manji u poređenju sa ukupnim godišnjim trendom rasta industrijskih robota u proizvodnim procesima. Ovo bi moglo da se objasni činjenicom da je tehnologija zavarivanja specifična, da neki postupci nisu pogodni za robotizirano zavarivanje, kao ni neke vrste zavarenih konstrukcija. Osim toga, razvoj novih tehnologija, kao što su na primjer

aditivne tehnologije, mogu da umanje potrebu za zavarivanjem. S obzirom da su postupci zavarivanja bazirani na različitim izvorima energije i da koriste različite principe za spajanje materijala, postoje značajne razlike i mogućnostima za robotizaciju različitih postupaka zavarivanja. Primjena industrijskih robota u procesu zavarivanja, za različite procese zavarivanja, za period 2018-2022. godina prikazana je u Tabeli 1.

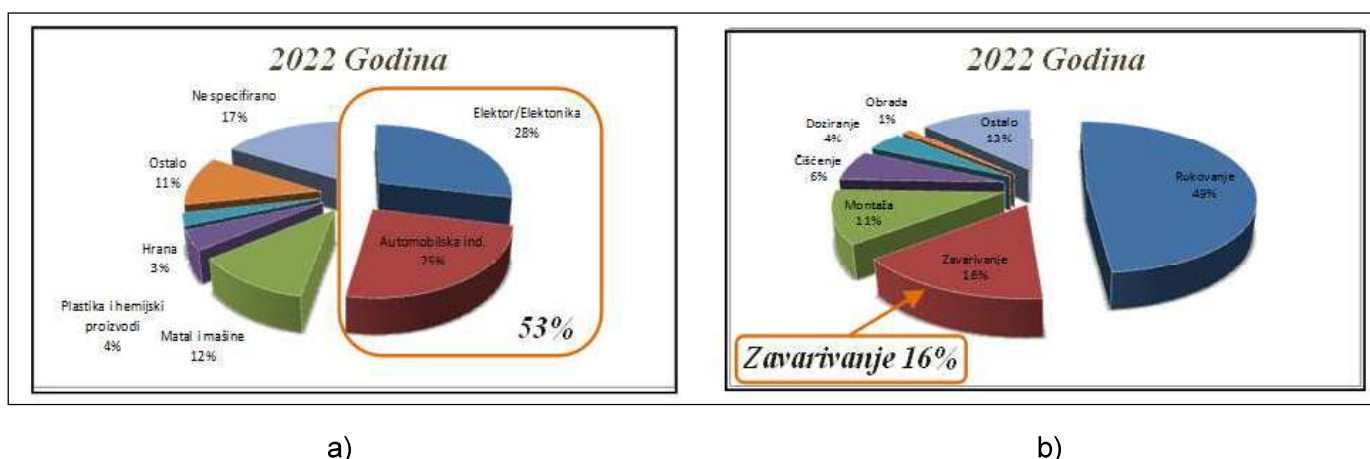
Tabela 1. Implementacija industrijskih robota u različitim procesima zavarivanja za period 2018-2022.godina [16,17].

Table 1. Implementation of industrial robots in various welding processes during the period 2018–2022 [16,17].

Zavarivanje i lemljenje (svi materijali)	2018.	2019.	2020.	2021.	2022.
Elektrolučno zavarivanje	40.967	35.242	33.609	43.800	49.400
Tačkasto zavarivanje	43.273	32.607	27.133	45.200	42.100
Lasersko zavarivanje	793	1.183	758	1.320	1.150
Ostala zavarivanje	1.213	1.561	1.594	1.680	1.280
Lemljenje	2.928	2.177	3.120	2.000	3.570

Može se zaključiti da je najveća primjena industrijskih robota u dva procesa zavarivanja: elektrolučno zavarivanje i tačkasto zavarivanje, dok je značajno manja zastupljenost robotiziranog zavarivanja laserom i ostalim procesima zavarivanja, kao i kod lemljenja. Prva dva procesa zavarivanja, gdje je najveća primjena industrijskih robota, su procesi zavarivanja koji se najviše koriste u automobilskoj industriji.

Industrijski roboti su prisutni u svim granama industrije, ali ta zastupljenost nije ni približno ravnomjerna. Prema podacima iz 2022. godine u dvije industrijske grane: automobilskoj industriji i elektro/elektroničkoj industriji instalirano je preko 50% od svih industrijskih robota (Slika 5). Na trećem mjestu je metalna industrija.



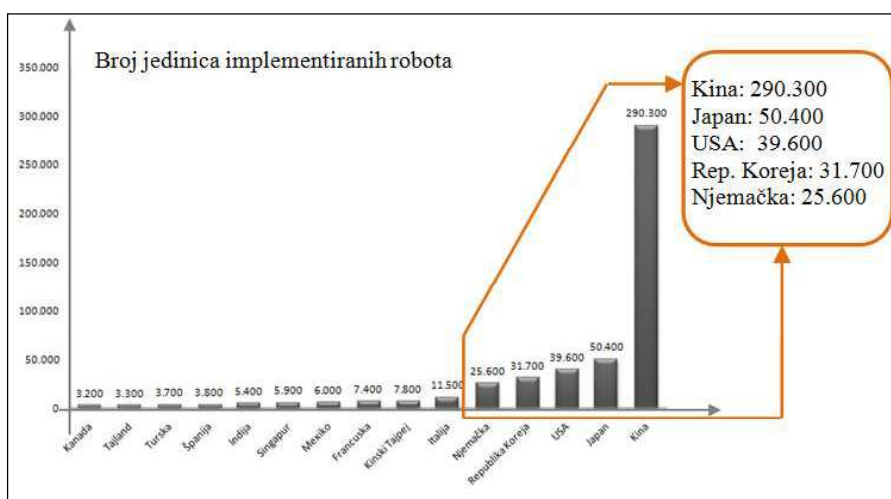
Slika 5. Zastupljenost industrijskih robota u (a) različitim industrijskim granama i (b) prema aplikaciji primjene u svijetu u 2022. godini [16].

Figure 5. Distribution of industrial robots in (a) different industrial sectors and (b) by application worldwide in 2022 [16].



Kada je u pitanju zastupljenost industrijskih robota prema aplikaciji instaliranja na prvom mjestu su manipulativni roboti, sa skoro polovinom učešća, zatim slijede procesi zavarivanja sa 16% i procesi montaže sa 11%. Ovi omjeri su prisutni u posljednjih 20 godina, tako da je za očekivati da će se ovakav trend nastaviti i u narednim godinama [16,24].

Veoma interesantan može biti i podatak u kojim se zemljama na godišnjem nivou najviše instalira industrijskih robota. Prema podacima iz 2022. godine prvih pet zemalja su: Kina, Japan, USA, Republika Koreja i Njemačka (Slika 6). Pri tome se mora istaći činjenica da je Kina, sa preko 290.000 instaliranih robota godišnje, ubjedljivo iznad svih ostalih zemalja. Narednih deset zemalja u svijetu su: Italija, Tajvan, Francuska, Meksiko, Singapur, Indija Španija, Turska, Tajland i Kanada, gdje se implementacija industrijskih robota kreće od oko 3.000 do 10.000 robota godišnje.



Slika 6. Godišnji primjene industrijskih robota u petnaest top zemalja svijeta u 2022. godini [16].

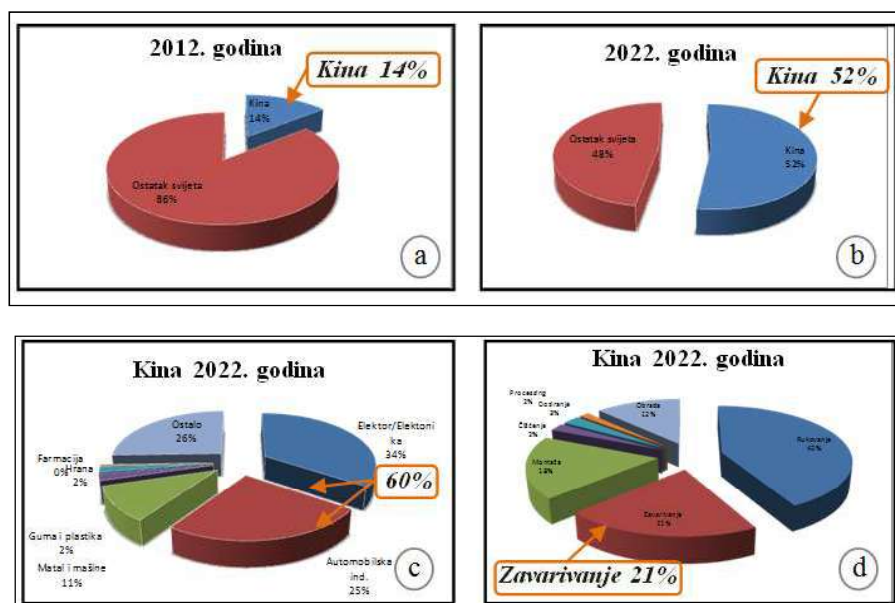
Figure 6. Annual use of industrial robots in the top fifteen countries worldwide in 2022 [16].

Ovakav trend se održava u posljednjih nekoliko godina i očekivan je s obzirom da veći dio navedenih zemalja spada u grupu industrijskih razvijenih zemalja, te da imaju razvijenu automobilsku i elektro/elektroničku industriju, gdje se na godišnjem nivou implementira preko 50% svih industrijskih robota u svijetu [22]. Drugi razlog za ovakav trend je što ove zemlje implementiraju Industriju 4.0 koju nije moguće razvijati bez industrijskih robota, jer robotska tehnologija predstavlja jednu od osnovnih tehnologija Industrije 4.0. Treći razlog za ovakav trend je što navedene zemlje ulažu značajna sredstva u istraživanje i razvoj inovacija u robotskoj tehnologiji, te implementaciju robota u proizvodne procese [23-24].

S obzirom da je Kina vodeća zemlja po primjeni industrijskih robota u svijetu, napravljena je jedna kratka analiza njenog trenda rasta u primjeni industrijskih robota u posljednjih deset godina kao i

primjena po industrijskim granama i procesima u 2022. godini (Slika 7). Implementacija novih industrijskih robota u Kini je u 2012. godini iznosila 14% od ukupne svjetske primjene za tu godinu. Za samo deset godina, dakle u 2022. godini procenat učešća Kine u primjeni robota se povećava na 52%, tako da Kina postaje svjetski lider po implementaciji robotske tehnologije u proizvodnim procesima [16,25,26]. Slično kao i u ostatku svijeta, najveći broj implementiranih robota, približno 60%, primjenjuje se u dvije industrijske grane: automobilskoj industriji i elektro/elektroničkoj industriji.

Kada su u pitanju procesi zavarivanja, industrijski roboti za različite postupke zavarivanja se primjenjuju u 21% od svih ukupno primijenjenih industrijskih robota u 2022. godini, što iznosi oko 60.963 jedinica industrijskih zavarivačkih robota. Kao i u ostatku svijeta, najveći broj ovih robota radi u automobilskoj industriji, elektro industriji i metalnoj industriji.



Slika 7. (a, b) Godišnji trend rasta primjene industrijskih robota u Kini u periodu 2012–2022. godina i (c, d) primjena u različitim industrijskim granama i procesima u 2022. godini [15–18].

Figure 7. (a, b) Annual growth trend in the use of industrial robots in China during the period 2012–2022, and (c, d) their application in different industrial sectors and processes in 2022 [15–18].

3. Zaključak

Primjena robotske tehnologije u industrijskoj proizvodnji se u svijetu iz godine u godinu povećava. Robotska tehnologija predstavlja jednu od osnovnih tehnologija četvrte industrijske revolucije, odnosno Industrije 4.0, čiji se koncepti veoma intenzivno primjenjuju u skoro svim industrijski razvijenim zemljama. Prema broju implementiranih robota dvije industrijske grane se posebno ističu: automobilska industrija i elektro industrija, u kojima je instalirano preko polovine od ukupnog broja robotskih sistema. Svjetski lider u primjeni robota u industrijskoj proizvodnji je Kina u kojoj je samo u 2022. godini bilo implementirano 290.000 novih robota, što predstavlja 52% od ukupnog broja implementiranih robota u cijelom svijetu.

Primjena robota u procesima zavarivanja, također, ima rastući trend, tako da je u posljednjih desetak godina broj implementiranih robota utrostručen, i u 2022. godini je dostigao broj od oko 87.000 jedinica. Procjene su da će se ovakav trend rasta nastaviti, tako da bi se u 2025. godini moglo očekivati da se u industrijskoj proizvodnji implementira oko 109.000 robota. Kao lider u primjeni robotskih sistema, Kina je samo u 2022. godini implementirala 60.963 industrijskih robota za zavarivanje, što predstavlja 21% od ukupnog broja instaliranih robota.

3. Conclusion

The integration of robotic technology within industrial manufacturing is experiencing consistent global growth. As a cornerstone of the Fourth Industrial Revolution, or Industry 4.0, robotics remains central to the technological frameworks being rigorously adopted across most developed economies. Based on the volume of robot deployment, two sectors are particularly prominent: the automotive and electronics industries, which together account for more than half of all installed robotic systems. China maintains its position as the global leader in industrial robot adoption; in 2022, the country deployed 290,000 new units, representing 52% of the total global installations for that year.

The application of robotics in welding processes similarly exhibits an upward trajectory. Over the past decade, the number of implemented units has tripled, reaching approximately 87,000 in 2022. Projections indicate that this trend will persist, with an anticipated 109,000 robots to be integrated into industrial production by 2025. Consistent with its leading role, China implemented 60,963 industrial welding robots in 2022, constituting 21% of its total robotic installations.



Robotizirano zavarivanje se najviše primjenjuje u automobilskoj industriji, ali je prisutno i u drugim granama metalne industrije. Kada su u pitanju postupci zavarivanja, evidentno je da se robotizirano zavarivanje najčešće primjenjuje kod dva procesa zavarivanja: elektrolučno zavarivanje i tačkasto elektrootporno zavarivanje, dok je značajno manja zastupljenost robota u procesu zavarivanja laserom i ostalim procesima kao i kod lemljenja.

While robotic welding is most prevalent in the automotive sector, its utility extends across various branches of the metalworking industry. Concerning specific methodologies, robotic systems are most frequently utilized in arc welding and resistance spot welding. In contrast, there is a significantly lower adoption rate in laser welding, brazing, and other specialized joining processes.

Literatura / References

[1] Karabegović, I., Kovačević, A., Banjanović Mehmedović, L., Dašić, P.: Integrating Industry 4.0 in Business and Manufacturing, IGI Global, Hershey, PA, USA, 2020. <https://www.igi-global.com/book/handbook-research-integrating-industry-business/237834>

[2] Schwab, K.: The Fourth Industrial Revolution, World Economic Forum, Geneva, Switzerland, 2016.

[3] Majstorović, V., Đuričić, D., Mitrović, R.: Industrija 4.0: Renesansa inženjerstva, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet Beograd, Srbija, 2022.

[4] Karabegović, I., Turmanidze, R., Dašić, P.: Structural Network for the Implementation of "Industry 4.0" in Production Processes, *International Scientific Journal "Industry 4.0"*, Year VII, Issue 1, pp. 3-6. <https://stumejournals.com/journals/i4/2022/1/3.full.pdf>

[5] Karabegović, I., Karabegović, E., Mahmić, M., Husak, E.: Implementation of Industry 4.0 in the Function of Application of Industrial and Service Robots in Production Processes, International Scientific Conference, Application of Industry 4.0 on Opportunity for a New Step Forward in All Industrial Branches, April, 2022, Special Editions, Volume CCII, Department of Technical Sciences, Volume 20, ANU B&H, pp.103-117; DOI:10.5644/PI2022.202.24;

[6] Esmailian, B., Behdad S., Wang, B.: The evolution and future of manufacturing: a review, *Journal Manufacturing System*, Vol.39., pp.79-100., 2016.:

[7] Wang, K.: Intelligent Predictive Maintenance (IPdM) system – Industry 4.0 scenario. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, Vol. 113, pp. 259-268. 2016., www.witpress.com, doi:10.2495/IWAMA150301

[8] Karabegović, I., Husak, E., Karabegović, E., Mahmić, M.: China is the leading country in the world in the implementation of robotic technology as the basic technology of Industry 4.0, 12th International Conference – KOD 2024. „Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering, Book of abstracts, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, May 2024, Balatonfüred, Hungary, ISBN 978-86-6022-339-7. COBISS.SR-ID 144621065, pp.128-129.

[9] Muller, J.M., Buliga, O., Voigt, K.I.: Fortune favors the prepared: How SMEs approach business model innovations in Industry 4.0. *Technological Forecasting and Social Change*, Vol.132, Iss.C, pp.2-7. 2018. DOI: 10.1016/j.techfore.2017.12.019

[10] Karabegović, I.: Improving Innovativeness and Competitiveness in Germany, Japan and China through the Analysis of the Application of Robotics as an Industry 4.0 Technology in the Manufacturing Industry, International Scientific Conference, Industry 4.0 in Circular Economy and Environmental Protection and Recovery, Union of Engineers and Technicians of Serbia, 15th December 2023. Beograd, Serbia, Proceedings: ISBN 978-86-82563-26-6, COBISS.SR-ID 131923977, pp. 38-51. <https://www.sits.org.rs/>

[11] Karabegović, I., Turmanidže, R., Dašić, P.: Analysis of Patent Trends from Industry 4.0 and the Implementation of Robot Technology in the Countries of China, USA, Japan, Republic of Korea and Germany, 6th International Scientific Conference, Conference on Mechanical Engineering Technologies and Applications-COMET-a, November, 2022, East Sarajevo, pp.273-286., RS, Bosnia and Herzegovina.: <http://cometa.ues.rs.ba/>



[12] Karabegović, I., Karabegović, E., Mahmić, M., Husak E.,: Implementation of Industry 4.0 by Using Industrial and Service Robots in the Production Processes, Chapter 1. Handbook of Research on Integrating Industry 4.0 in Business and Manufacturing, IGI Global, USA, pp.1-30, 2020. DOI: 10.4018/978-1-7998-2725-2.ch001

[13] Chryssolouris, G., Mavrikios, D., Papakostas, N., Mourtzis, D., Michalos, G., Georgoulas, K.: Digital manufacturing: History, perspectives, and outlook, Journal of Engineering Manufacture, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B, pp.451–462. 2009. <http://dx.doi.org/10.1243/09544054JEM1241>

[14] Karabegovic Edina, Karabegovic Isak, Hadzalic Edit: Industrial Robot Application Trend in World's Metal Industry *Inzinerine Ekonomika-Engineering Economics*, 23(4), 368-378. 2012. <http://dx.doi.org/10.5755/j01.ee.23.4.2567>

[15] IFR, "World Robotics Report: 'All-Time High' with Half a Million Robots Installed in one Year," *IFR International Federation of Robotics*. <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/wr-report-all-time-high-with-half-a-million-robots-installed> [Accessed; June 26, 2024].

[16] Bill, M., Müller, C., Kraus, W., Bieller, S.,: World Robotics Report 2023, Frankfurt 2023. [Online]. Available: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/world-robotics-2023-report-asia-ahead-of-europe-and-the-americas>

[17] International Federation of Robotics, "Executive Summary World Robotics 2022 Industrial Robots."2022. [Online]. Available: https://ifr.org/img/worldrobotics/Executive_Summary_WR_Industrial_Robots_2022.pdf

[18] Karabegović, I., Mahmić, M., Karabegović, E., Husak, E.,: Comparative Analysis of the Implementation of Robot Technology as the Basic Technology of Industry 4.0 in America (USA) and China, 14th International Scientific Conference, ETIKUM 2023, University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Department of Production Engineering and Department of Industrial Engineering and Management, Novi Sad, December 2023. Serbia, Proceedings: ISBN 978-86-6022-617-6, COBISS.SR-ID 131426852, pp. 33-40. <http://etikum.ftn.uns.ac.rs/>

[19] <https://www.themanufacturer.com/articles/bmw-places-major-order-for-5000-industrial-robots/> [Accessed: June 28, 2024].

[20] How Collaborative Robots Are Redefining Industrial Automation – What Sets Them Apart? <https://www.linkedin.com/pulse/how-collaborative-robots-redefining-industrial-automationwhat-guajf/> [Accessed: June 28, 2024].

[21] Thoben, K.D., Wiesner, S., Wuest, T.,: Industrie 4.0 and smart manufacturing – a review of research issues and application examples. *International Journal Automation Technology*, Vol.11, pp.4–16. 2017. <https://doi.org/10.20965/ijat.2017.p0004>

[22] Karabegović, I., Karabegović, E., Mahmić, M., Husak, E.: The application of service robots for logistics in manufacturing processes, *Advances in Production Engineering & Management*, Vol. 10. No. 4. 2015, Maribor, Slovenia, pp. 185-194. 2015. https://www.apem-journal.org/Archives/2015/APEM10-4_185-194.pdf

[23] Karabegović, I.: The Role of Industrial and Service Robots in the Four Industrial Revolution, *ACTE Technica Corviniensis-Bulletin of Engineering*, University Politehnica Timisoara, Tome XI, Fascicule 2., April 2018., Hunedoara, Romania, pp.11-16. <http://acta.fih.upt.ro/pdf/2018-2/ACTA-2018-2-01.pdf>

[24] Karabegović, I., Karabegović, E., Mahmić, M., Husak, E.: Implementation of Industry 4.0 and Industrial Robots in Production Processes: Isak Karabegović (eds) *New Technologies, Development and Application II* 2019. Lecture Notes in Networks and Systems, Springer Nature Switzerland AG 76, pp. 96-102. 2020.

[25] Karabegović, I., Husak, E., Karabegović, E., Mahmić, M.,: How the Core Technologies of Industry 4.0 Are Changing the Automotive Industry in the World, With a Focus on China, IX International Congress Motor Vehicles and Motors (MVM 2022) IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1271 012017; pp.1-14; doi:10.1088/1757-899X/1271/1/012017 <https://iopscience.iop.org/issue/1757-899X/1271/1>.

[26] Oesterreich, T.D., Teuteberg, F.,: Understanding the Implications of Digitisation and Automation in the Context of Industry 4.0: A Triangulation Approach and Elements of a Research Agenda for the Construction Industry. *Computers in Industry*, 83, 121-139.2016. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.09.006>



SEMINAR SA TEMOM "PRIMENA STANDARDA SRPS EN ISO 15614:2017"



**DUZS – DRUŠTVO ZA
UNAPREĐIVANJE
ZAVARIVANJA U SRBIJI**

i



**ISS – INSTITUT ZA
STANDARDIZACIJU SRBIJE**

POZIVAJU VAS NA SEMINAR SA TEMOM

Primena standarda SRPS EN ISO 15614-1:2017

Termin održavanja: 15. april 2026. godine od 10.00 – 16.00 časova

Mesto: Beograd, Institut za standardizaciju Srbije, ul. Stevana Brakusa 2

PROGRAM SEMINARA

- 09:30 – 10:00** Prijavljivanje i registracija učesnika
- 10:00–10:45** Standardizacija u oblasti zavarivanja
Predavač: *Aleksandar Stefanović*
- 10:45 – 12:30** Pregled i primena standarda SRPS EN ISO 15614-1:2017
Predavač: *Milan Prokolab/Ivan Stojčić*
- 12:30–13:15** Pauza i osveženje
- 13:15-14:00** Pregled i primena standarda SRPS EN ISO 15614-1:2017/A1:2020
Predavač: *Milan Prokolab/Ivan Stojčić*
- 14:00–15:15** Pregled drugih standarda iz serije SRPS EN ISO 15614 (sa posebnim osvrtom na izmene standarda SRPS EN ISO 15614-2)
Predavač: *Ivan Stojčić*

15:15–16:00 Diskusija

Predavači:

Aleksandar Stefanović, dipl. ing., Institut za standardizaciju Srbije, Beograd
Ivan Stojčić, dipl. ing., IWE, IWI-C, TMS CEE d.o.o. Beograd
Milan Prokolab, dipl. ing., IWE, IWI-C, Institut GOŠA d.o.o. Beograd

KOME JE SEMINAR NAMENJEN:

Seminar je namenjen inženjerima i tehnologima zavarivanja, inspektorima zavarivanja, projektantima i izvođačima radova u oblasti mašinske i građevinske industrije i drugih srodnih oblasti

SVRHA SEMINARA:

Svrha seminara je da korisnicima standarda pruži informacije o standardu EN ISO 15614-1 i njegovoj primeni u praksi

KOTIZACIJA ZA SEMINAR I NAČIN PLAĆANJA

Kotizacija za seminar iznosi **15.000,00** dinara bez uračunatog PDV-a. Na ovako utvrđenu kotizaciju odobravaju se sledeći popusti:

- 25 %** za članove ISS-a i članove DUZS-a sa plaćenom članarinom, što iznosi **11.250,00** dinara bez PDV-a;
- 15 %** za članove komisija za standarde i srodne dokumente Instituta, što iznosi **12.750,00** dinara bez PDV-a;
- 10 %** po učesniku za organizacije koje prijave više od dva polaznika, što iznosi **13.500,00** dinara bez PDV-a.

Popusti se međusobno isključuju.

Svi polaznici seminara sa plaćenom kotizacijom dobijaju:

Potvrde o pohađanju obuke, radni materijal, onlajn čitanje standarda u trajanju od pet dana bez naknade SRPS EN ISO 15614-1:2017, mogućnost kupovine standarda SRPS EN ISO 15614-1:2017 po povlašćenoj ceni sa **30%** popusta na redovnu cenu standarda što ukupno iznosi **3.719,00** dinara po primerku standarda.

Uplata kotizacije se vrši na tekući račun DUZS-a br: **325-9500600002588-46**, sa naznakom: „Za seminar“

PRIJAVA

Registracija za seminar se može naći i na sajtovima ISS i DUZS, na adresi www.iss.rs i www.duzs.org.rs
Popunjenu prijavu potrebno je poslati na E-mail adresu DUZS: duzs011@gmail.com

Broj polaznika je ograničen.



PRIJAVA ZA UČEŠĆE NA SEMINARU

Primena standarda SRPS EN ISO 15614-1:2017

u Institutu za standardizaciju Srbije 15. aprila 2026. godine

- 1) Naziv preduzeća/institucije/firme.....
- Adresa preduzeća/institucije/firme i PIB.....
-
- Telefon, e-mail
- 2) Fizičko lice:
- Adresa:.....
-
- Telefon, e-mail

Red. br.	Ime i prezime	Status učesnika (član DUZS-a; član ISS-a; član komisije za standarde i srodne dokumente Instituta; ostalo)

U

Dana

M.P.
Potpis ovlašćenog lica

Molimo da popunjenu prijavu učešća pošaljete na adresu DUZS
e-mail: duzs011@gmail.com
ili regularnom poštom na adresu kancelarije:
DUZS – Društvo za unapređivanje zavarivanja u Srbiji, Gvozdiceva 15/4, 11000 Beograd

najkasnije do 6. aprila 2026. godine



Milo Dumovic ^{1,a}

IMPACT OF FLUX ON THE FABRICATION AND SERVICE WELDABILITY OF SUBMERGED ARC WELD DEPOSITS

UTICAJ TOPITELJA/PRAHA NA ZAVARLJIVOST VAROVA POD PRASKOM

Professional paper / Stručni rad

Paper received / Rad primljen:

July 2024.

Paper accepted / Rad prihvaćen:

December 2025.

Author's address / Adresa autora:

¹ Solid Technologies Pty. Ltd.; PO Box 426, Maroubra NSW 2035, Australia

email / ORCID ID :

^a milo.dumovic@gmail.com / 0009-0008-6267-2343

Keywords: Submerged arc welding, flux, basicity index, alloying contribution.

Ključne reči: Zavarivanje pod praškom, topitelji, indeks bazičnosti, priraštaj legirajućih elemenata.

Abstract

Submerged arc welding (SAW) involves two consumables: a wire or strip electrode and a granular flux. The properties of the flux play a critical role in achieving the desired service properties of welded joints and deposits, as well as ensuring process flexibility for specific industrial applications. In the present study, the flux composition and the resulting slag properties are analyzed and compared across different application fields. The influence of flux grain size on weld metal properties and fabrication weldability is also examined. A range of structural welding fluxes, from manganese-silicate to fluoride-based basic types with varying basicity indices, together with alloyed surfacing fluxes, are evaluated and assessed. The contributions of manganese and silicon from the flux to the weld metal are evaluated and slag solidification behavior is analyzed. The relationship between slag characteristics and mechanical performance is investigated, with particular emphasis on impact toughness. For alloyed fluxes, the effect of heat input on the final properties of the weld deposit is additionally evaluated. Finally, the current-carrying capacity of the is assessed.

Rezime

Zavarivanje pod praškom se sastoji iz dvije komponente: žica (puna ili punjena)/traka i topitelja/praška. Svojstva topitelja su veoma važna u cilju ostvarivanja željenih svojstava zavarai navara, kao i upotrebljivost topitelja za određenu primjenu. U ovom radu, svojstva topitelja i formirane šljake su analizirana za različite primjene. Takođe, veličina i raspored zrna topitelja su važni kako za postizanje željenih svojstava tako i za priraštaj legirajućih elementa iz sastava topitelja. Dijapazon topitelja od mangansko-silicijumskih do visoko bazičnih fluoridnih sa različitim indeksom bazičnosti, kao i visokolegirajućih navarnih topitelja, je upoređen i analiziran. Doprinosi mangana i silicijuma su analizirani kao i svojstva formirane šljake. Veza između mehaničkih svojstava, posebno udarne žilavosti, je takođe analizirana. Sa legirajućim topiteljima veza između priraštaja toplote i svojstava je uspostavljena. Topitelji su testirani na njihov kapacitet zavarivanja sa maksimalnom jačinom struje i napona zavarivanja.

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

The main advantages of the SAW process (Figure 1) include the following [1]:

- high deposition rates and high productivity
- high operating factor
- minimal surface finishing time
- high travel speeds
- deep penetration (for structural components)
- low hydrogen levels
- reduced requirements on operator skills
- low levels of fumes and arc flash

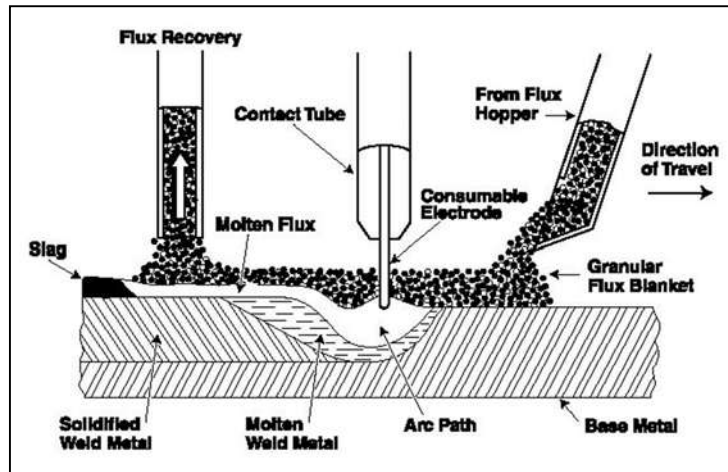


Figure 1. Submerged Arc Welding Process (SAW).

Slika 1. Postupak elektrolučnog zavarivanja pod praškom (EPP).

Conventional SAW employs three fundamental electrical operating modes, as illustrated in Figure 2 [2]. Direct current (DC) welding has commonly been the preferred option for SAW applications. DC electrode-positive (DCEP) polarity is the more frequently used operating mode and is characterized by deep weld penetration. DC electrode-negative (DCEN) is typically selected when minimal dilution is required. However, DCEN is more susceptible to magnetic arc interference

(arc blow) and porosity formation. Alternating current (AC) is most often employed when resistance to arc blow is crucial, particularly in multiple-arc configurations or in combination with a DC arc and additional AC arcs. The use of modern inverter technology, incorporating waveform control through adjustments in wave balance, amplitude, and frequency enables polarity switching without requiring hardware configuration modifications.

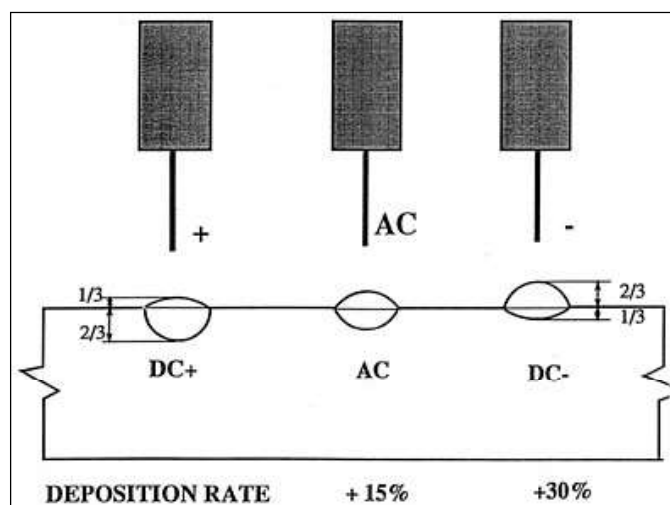


Figure 2. SAW operating modes.

Slika 2. Radni režimi EPP postupka.



Although significant attention is given to power sources and welding wires, a thorough understanding of flux selection and its influence on the SAW process is essential to achieve fabrication objectives and ensure adequate service weldability of the deposited weld metal. SAW fluxes consist of mineral constituents mixed with silica and are either agglomerated (600-850 °C) or fused (1,200-1,400

°C), then sieved to a particle size range of 10-80 mesh (Figure 3). While smaller particle sizes can sustain higher welding currents, an excessive proportion of fines in the flux may lead to gas entrapment between the slag and the weld pool. This can result in surface defects such as gas flats or pockmarking on the weld bead surface.

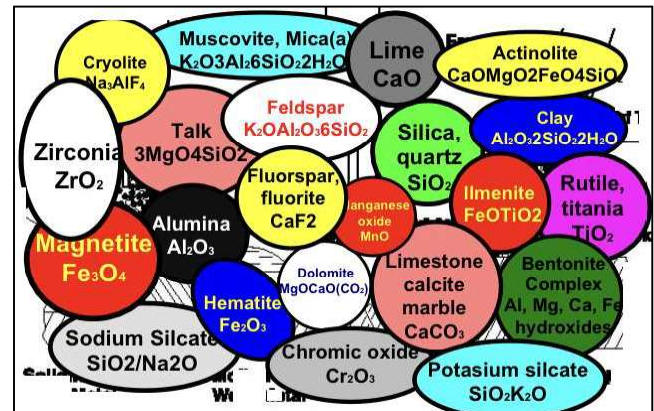
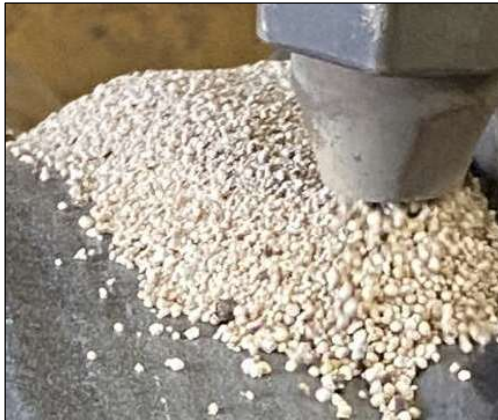


Figure 3. Typical composition of common minerals used for flux design [2].

Slika 3. Tipičan sastav uobičajenih minerala koji se koriste za pravljenje praška (fluksa) [2].

The primary functions of fluxes in the SAW process is to provide arc stability, ensure electrical conductivity in the molten state, shield the molten weld pool from atmospheric contamination, refine the liquid weld metal by removing impurities, control the weld metal cooling rate and weld bead profile, introduce alloying elements, and influence bead appearance.

SAW fluxes can be classified as follows [2]:

- active;
- neutral
- alloy fluxes;

The characteristics of active and neutral fluxes are evaluated using the following criteria:

- wall neutrality number:** $N = 100 (|\Delta\% \text{Si}| + |\Delta\% \text{Mn}|)$. For a flux-electrode combination to be considered neutral, the value of N should be 35 or less. The lower the value of N, the more neutral the flux.
- pick-up and burn-out behavior.** To determine pick-up and burn-out characteristics, a wire electrode conforming to ISO 14171-A – S2 or ISO 14171-B – SU22 shall be used in accordance with Section 5.5.6. The pick-up or burn-out of

silicon and manganese shall be reported in this sequence [7]:

- If %Si and %Mn in the deposited metal are greater than those in the S2 wire → active flux
- If %Si and %Mn in the deposited metal are equal to those in the S2 wire → neutral flux
- If %Si and %Mn in the deposited metal are lower than those in the S2 wire → non-active flux

Fluxes are also categorized according to the Basicity Index (BI), which is calculated as follows:

$$B.I = \frac{[\text{CaO} + \text{MgO} + \text{BaO} + \text{CaF}_2 + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + 0,5 * (\text{MnO} + \text{FeO})]}{[\text{SiO}_2 + 0,5 * (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{ZrO}_2)]}$$

Acid fluxes: BI = 0.5-0.8 (< 2); oxygen content: >750 ppm. Acid fluxes contain silicates in the form of calcium and/or manganese silicates and manganese oxide. They exhibit low toughness but are tolerant of rusty or oily surfaces, with excellent slag detachability and bead appearance. Higher silica levels tend to produce slag that is more difficult to remove, whereas higher lime (CaO) contents result in slag that is easier to remove. Acid fluxes produce slag with a lower melting range than that of the weld metal.



Neutral fluxes: $BI=0.8-1.2 (< 2)$; oxygen content: 550-750 ppm. Neutral fluxes contain low levels of alumina, calcium silicate, and silica. Single-pass welds with insufficient deoxidation on heavily oxidized base metal may be susceptible to porosity, centerline cracking, or both. Neutral fluxes produce slag with a lower melting range than that of the weld metal.

Basic Fluxes: $BI=1.2-2.5 (> 2)$; oxygen content: 300-550 ppm. Basic fluxes contain combinations of calcium carbonate, and/or fluorides, alumina, magnesium oxide, and manganese oxide. The slag produced by basic fluxes solidifies at a temperature similar to or higher than that of the weld metal and is typically self-detaching. These slags provide improved, including performance at $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Highly basic fluxes: $BI=2.5-4.0$; oxygen content: <300 ppm. Highly basic fluxes exhibit low slag viscosity and limited current-carrying capacity. They provide excellent low temperature toughness, including performance at $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Basic slag systems are highly effective in reducing weld metal oxygen content, thereby enhancing weld metal toughness; however, they tend to produce slags with lower solidification temperatures.

Fluxes can also be classified according to their solidification behavior as follows:

- **“fast-freeze”** fluxes are formulated to solidify rapidly, minimizing weld pool displacement before solidification. These fluxes enable rapid weld metal solidification, which is advantageous when welding joints with poor fit-up. Fluxes containing TiO_2 produce faster-freezing slag; for example, AR-type (aluminate-rutile) fluxes minimize spillage in circumferential welding applications. They allow maximization of arc speed and deposition rate and are a suitable choice for flash-through conditions.
- **“fast-fill”** fluxes are designed to melt quickly, thereby permitting higher welding. For example, MS1-type (manganese-silicate) fluxes are applied at low arc speeds and in situations where arc-blow-induced porosity is problematic.
- **“fill-freeze” or “fast-follow”** represent intermediate types in which the molten weld pool solidifies more slowly than with fast-freeze fluxes, resulting in a more fluid slag system. For example, ZS-type (zirconium-silicate) fluxes are suitable for high-speed welding without undercut formation or voids defects.

Tables 1 and 2 show typical compositions [3] and properties [4] of submerged arc fluxes, whereas Figure 4 shows how slag freezing characteristics affect the appearance of the weld bead profile.

Table 1. Fluxes compositions according to EN ISO 14174 [3].

Tabela 1. Sastavi praškova prema EN ISO 14174 [3].

Symbol/Type	Composition/% by mass		Symbol	% by mass
MS (Manganese-silicate)	$\text{MnO} + \text{SiO}_2 \geq 50$		RS (Rutile-silicate)	$\text{TiO}_2 + \text{SiO}_2 \geq 50$
	$\text{CaO} \leq 15$			$\text{TiO}_2 \geq 20$
CS (Calcium-silicate)	$\text{CaO} + \text{MgO} + \text{SiO}_2 \geq 55$		AR (Aluminate-rutile)	$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 \geq 40$
	$\text{CaO} + \text{MgO} \geq 15$			$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaF}_2 + \text{SiO}_2 \geq 55$
CG (Calcium-magnesium)	$\text{CaO} + \text{MgO} = 5 \text{ to } 50$		BA (Basic-alumina)	$\text{CaO} \geq 8$
	$\text{CO}_2 \geq 2$			$\text{SiO}_2 \leq 20$
	$\text{Fe} \leq 10$			$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 \geq 50$
CB (Calcium-magnesium basic)	$\text{CaO} + \text{MgO} = 30 \text{ to } 80$		AAS (Acid-aluminium-silicate)	$\text{CaF}_2 + \text{MgO} \geq 20$
	$\text{CO}_2 \geq 2$	$\text{Fe} \leq 10$		AB (Aluminate-



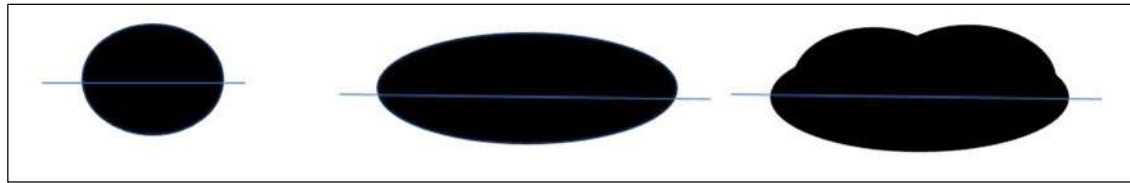
CG-I (Calcium-magnesium with iron)	CaO + MgO=5 to 45	basic)	Al ₂ O ₃ ≥20
	CO ₂ ≥2		CaF ₂ ≤22
	Fe=15 to 60	AS (Aluminate-silicate)	Al ₂ O ₃ +SiO ₂ +ZrO ₂ ≥40
CaO + MgO=10 to 70	CaF ₂ +MgO ≥30		
CB-I (Calcium-magnesium basic with iron)	CO ₂ ≥2	AF (Aluminate-fluoride-basic)	ZrO ₂ ≥5
	Fe=15 to 60		Al ₂ O ₃ + CaF ₂ ≥70
	GS (Magnesium-silicate)	MgO + SiO ₂ ≥42	FB (Fluoride-basic)
Al ₂ O ₃ ≤20			
CaO +CaF ₂ ≤14		SiO ₂ ≤20	
ZS (Zirconium-silicate)	ZrO ₂ +SiO ₂ +MnO ≥45	CaF ₂ ≥15	
	ZrO ₂ ≥15		

Table 2. Typical properties of submerged arc fluxes [4].

Tabela 2. Tipična svojstva praškova za zavarivanje pod praškom [4].

Properties	Flux Type				
	MS (Manganese-silicate) Acidic	CS (Calcium-silicate) Acidic	AR (Aluminate-rutile); Acidic	AB (Aluminate-basic); Basic	FB (Fluoride-basic) Basic
Amp Capacity	+++	+++	++	++	+
ACweldability	+(+)	++	+++	++	(+)
Porosity resistance	+++	++	++	++	++
Weldability	+	++	+++	++	+
Gaps bridging	+	++	+++	++	++
Arc Speed	++	++	+++	++	+
Detachability	+	+++	+++	++	++
Appereance	+++	+++	+++	++	+
H2 Cracking resistance	+	+	+	++	+++
Mechanicals	+	+	+	++	+++

+Normal; ++Good; +++Excelent



a)

b)

c)

Figure 4. Impact of slag freezing characteristics on weld bead profile: a) fast freezing slag, b) slow freezing slag, and c) slow freezing slag high round speed.

Slika 4. Uticaj karakteristika očvršćavanja šljake na profil zavarenog šava: a) šljaka sa brzim očvršćavanjem, b) šljaka sa sporim očvršćavanjem i c) šljaka sa sporim očvršćavanjem pri velikoj brzini zavarivanja.

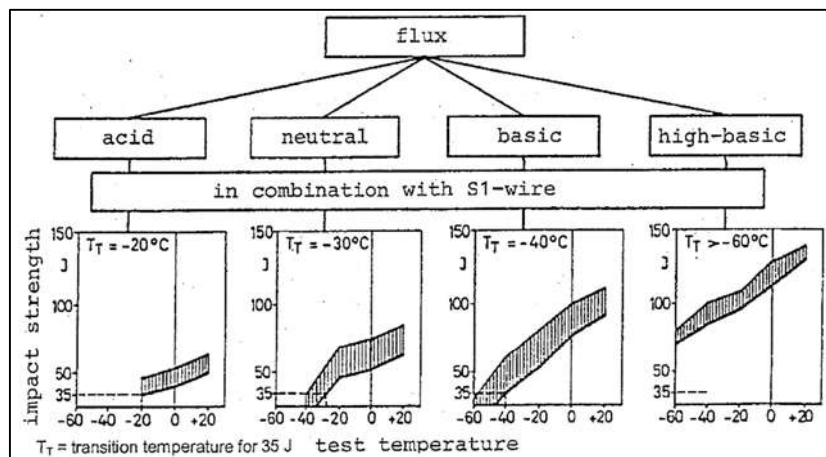


Figure 4. Impact of flux basicity on impact strength [4].

Slika 4. Uticaj baznosti praška na udarnu žilavost [4].

2. Experimental and analysis

The experiment involved an investigation of five different fluxes (Table 3), two types of MS (manganese-silicate) with different MnO contents and basicity indices (MS₁: MnO < 30% and BI =

0.77 and MS₂: MnO < 15% and BI = 0.88), AR (aluminate-rutile), which produces concave fillet welds prone to centerline cracking., ZS (zirconium-silicate), and AB (aluminate-basic), as listed in Tables 1 and 2.

Table 3. Investigated fluxes.

Tabela 3. Ispitivani praškovi.

Flux	Composition %										Slag
	SiO ₂	MnO	MgO	CaF ₂	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	ZrO ₂	FeO	
MS ₁	30-60	15-40	10-30	<20	<15	<10	<5	-	-	-	Slow freeze
MS ₂	25-50	15-25	18-25	<20	<20	<15	<7	<5	-	<5	Slow freeze
AR	<10	15-30	<8	5-12	<15	<60	<10	<20	-	-	Fast Freeze
ZS	21	<19	10-25	5-10	<10	2-20	<10	15-30	<20	<10	Fast follow
AB	19	10-16	10-30	<18	<10	20-40	<5	5-25	-	<3	Slow freeze



Manganese and silicon contributions to the weld deposit for the investigated fluxes are presented in Table 4.

Table 4. Manganese and silicon contributions of investigated fluxes.

Tabela 4. Doprinos mangana i silicijuma ispitivanih praškova.

Flux Contribution to Weld Metal Chemistry; With S1 wire	% Δ Mn	% Δ Si	Total %(Δ Mn + Δ Si)	B.I
MS ₁	0.8	0.49	1.29	0.77
MS ₂	1.08	0.59	1.67%	0.88
AR	0.77	0.43	1.20	0.78
ZS	0.69	0.57	1.26	0.73
AB	0.33	0.14	0.47	1.1

An extended investigation of manganese and silicon contributions is presented in Table 5 and Figure 5.

Table 5. Extensive overview of Mn and Si contributions of different fluxes.

Tabela 5. Opsežan pregled doprinosa M) i Si kod različiti praškova.

Flux Contribution to Weld Metal Chemistry (S1 wire)	Total %(Δ Mn+ Δ Si)	B.I.	Flux Contribution to Weld Metal Chemistry (S1 wire)	Total %(Δ Mn+ Δ Si)	B.I.
AB/AR ₈₉	0.82	0.6	**AB _(TS01)	0.60	1.25
AS/AR ₉₇	1.04	0.69	AB ₅₉₁	0.71	1.29
MS ₁₋₀₆	1.29	0.77	AF _{02P}	-0.1	1.6
AR ₀₈	1.2	0.78	AB ₂₈	0.33	1.61
MS ₂₋₁₆	1.67	0.88	FB ₀₈	0	2
* MS _{3-16S}	2.98*	0.93	AB/CS ₀₂	0.05	2.17
AB ₆₈	0.47	1.1	FB/CS ₀₁₀₁	0.01	2.86
AB ₆₉	0.6	1.11	FB _{0N8}	0.29	2.86
AB ₅₉	1.02	1.25	FB ₅₈₅₈	0.12	2.86

*/** Not included in graph. * After high-speed welding of light poles with MS₃ and SU25 wire there was a reaction with a galvanizing solution. Problem was resolved by using S1 wire.

**% Δ Cr 2.4; MS₁₋₀₆; AR₀₈ FB_{0N8} self-peeling slag; AB₂₈ MS₂₋₁₆ Left gray adhering layer difficult to remove, bulk of slag detaching easily; FB₀₈ Slight levering slag detaching in one piece; AB₂₈ hard removing slag.

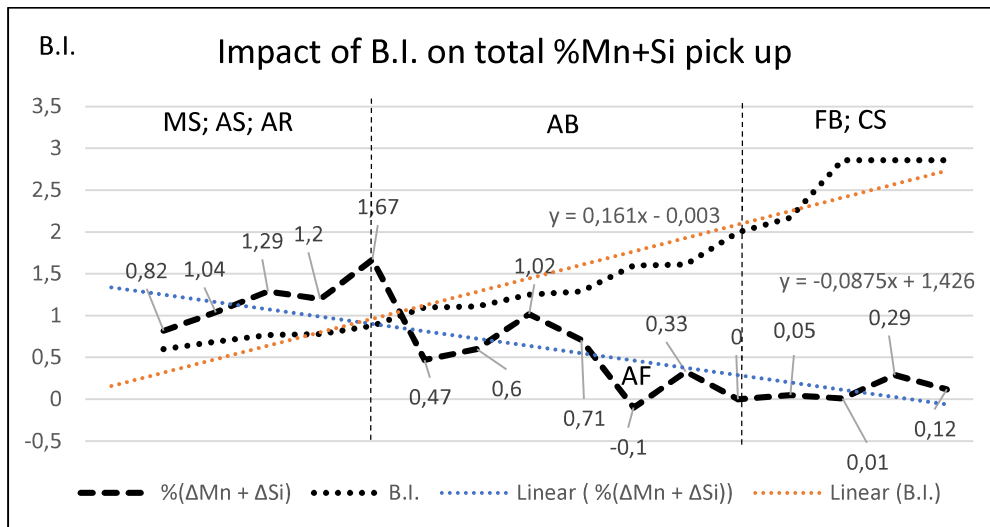
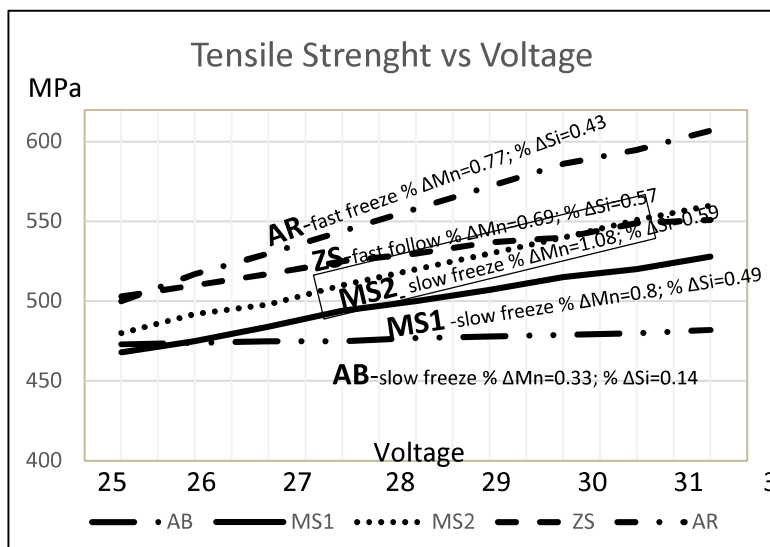


Figure 5. Mn and Si contributions across different investigated fluxes.

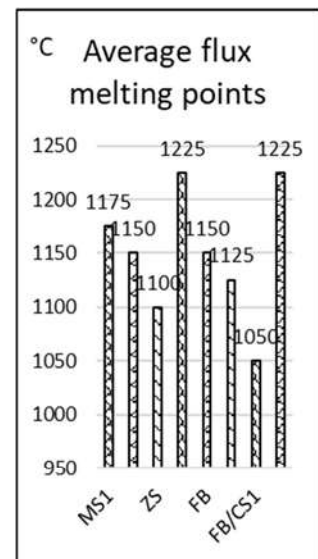
Slika 5. Doprinosi Mn i Si kod različitih ispitivanih praškova.

Further investigation included the effect of voltage on the tensile strength of selected fluxes

(Figure 6), as well as the effect of voltage on AB flux (Table 6 and Figure 7).



a)



b)

Figure 6. a) Impact of arc voltage on Tensile Strength of investigated fluxes AR; ZS; MS2; MS1; AB. Testing condition DC+ 550Amps Travel speed 410mm/min; Electrical Stick out 32mm; 4.0mm EN ISO 14171-A S1 wire and b) Average flux melting points.

Slika 6. a) Uticaj napona električnog luka na zateznu čvrstoću kod ispitivanih praškova AR, ZS, MS2, MS1 i AB; uslovi ispitivanja: DC+ 550 A, brzina zavarivanja 410 mm/min, električni izbačaj elektrode 32 mm, žica 4,0 mm EN ISO 14171-A S1 i b) prosečne tačke topljenja praškova.

Table 6. Impact of arc voltage on AB flux with 4.0 mm electrode ISO 14171-A: S2Si; Electrical Stick out 35mm.

Tabela 6. Uticaj napona luka na prašak AB pri upotrebi elektrode prečnika 4,0 mm (ISO 14171-A: S2Si); električni izbačaj elektrode 35 mm.

Flux AB		Travel Speed (mm/min)	Charpy - Energy					H.I. kJ/mm	
Amps	Volts		J @-20 C				Aver.		
600	28	410	104	107	126	140	133	122	2.46
600	33	410	58	56	82	80	67	68.6	2.90

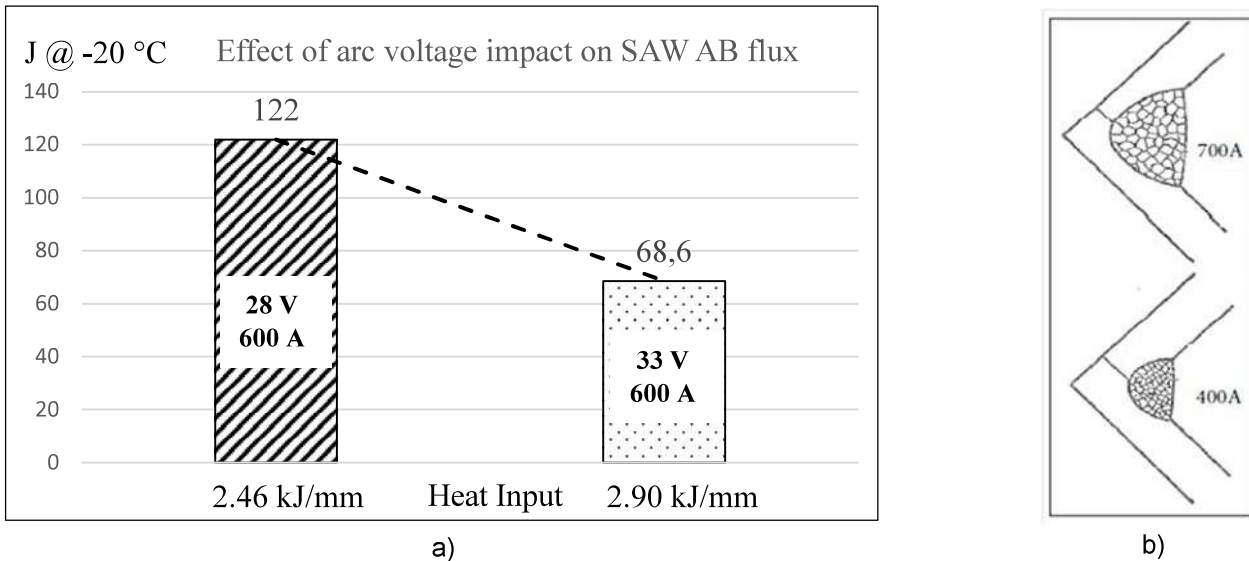


Figure 7. a) Impact of arc voltage on impact resistance of AB flux. AB flux, 4.0 mm electrode ISO 14171-A: S2Si; Electrical Stick out 35mm. and b) grain size of the weld made at 700A; 34V and 380 mm/min arc travel speed, heat input 3.74 kJ/mm and at 400 A;

Slika 7. a) Uticaj napona luka na udarnu žilavost praška AB. Prašak AB, elektroda prečnika 4,0 mm, ISO 14171-A: S2Si; električni izbačaj elektrode 35 mm; b) veličina zrna zavara dobijenog pri: 700 A, 34 V i brzini zavarivanja 380 mm/min (unos toplote 3,74 kJ/mm) i pri 400 A

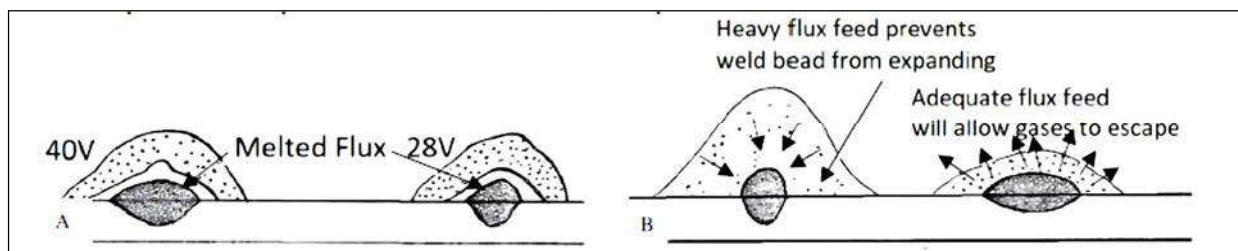


Figure 8. (A) Impact of arc voltage on bead/slag shape and flux consumption. High voltage melts more flux. (B) impact of flux feed on weld bead and gas discharge.

Slika 8. (A) Uticaj napona luka na oblik zavarenog šava/šljake i potrošnju praška. Veći napon dovodi do topljenja veće količine praška. (B) Uticaj dodavanja praška na oblik zavarenog šava i oslobađanje gasova.

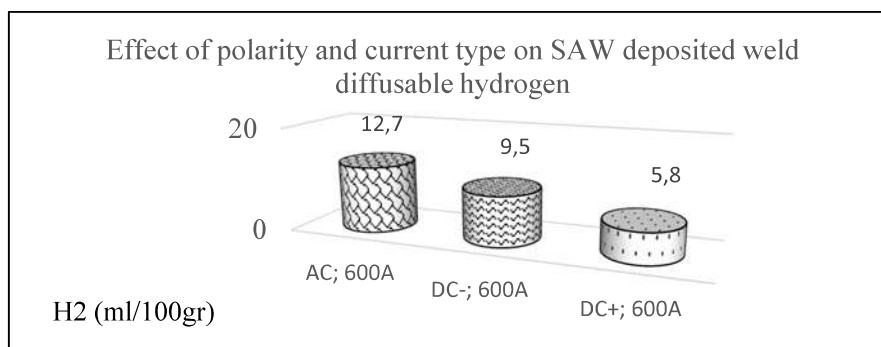


Figure 9. With the Submerged Arc Welding process an impact of current type is significant. Alternating Current (AC) produces twice the hydrogen (H₂/100gr) level of DC+. Low arc voltage on DC+ will help minimize hydrogen levels in submerged arc welds [5].

Slika 9. Kod postupka zavarivanja pod praškom značajan je uticaj vrste struje. Naizmjenična struja (AC) proizvodi približno dvostruko veći sadržaj vodonika (H₂/100 g) u poređenju sa DC+. Niži napon luka pri DC+ pomaže u smanjenju nivoa vodonika u zavarima izvedenim postupkom zavarivanja pod praškom [5].

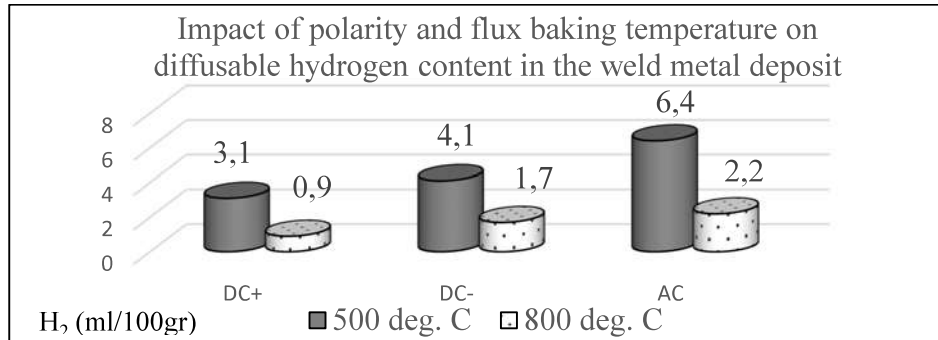


Figure 10. The effect of flux baking temperature and current in submerged arc welding process [5].

Slika 10. Uticaj temperature sinterovanja praška i struje u postupku zavarivanja pod praškom [5].

3. Conclusions

The complex nature of numerous available submerged arc welding fluxes requires a selective approach to meet fabrication and service weldability requirements of the welded joint. Flux design performance affects weld bead properties and is also dependent on welding parameters.

References / Literatura

[1] Dumovic M., Optimisation of martensitic stainless steel weld deposits using wave form controlled current submerged arc technique, IIV International Conference, Cavtat, Croatia, July 2007.

[2] Dumovic M., "Selection of alloy fluxes for the repair of worn components", 52nd WTIA Annual Conference, Brisbane, Australia, October 2004

3. Zaključak

Složena priroda brojnih dostupnih praškova za zavarivanje pod praškom zahtijeva selektivan pristup kako bi se ispunili zahtjevi za izradivost i upotrebljivost zavarenog spoja. Performanse dizajna praška utiču na svojstva zavarenog šava, a takođe zavise i od parametara zavarivanja.

[3] ISO 14174:Welding consumables — Fluxes for submerged arc welding and electroslag welding — Classification

[4] SLS-EWE; Welding Processes Submerged Arc 2002.

[5] TWI Research Bulletin April 1979. "The Hydrogen Levels – The Influence of Welding Parameters". [6] ASTM A240-13. tandard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications

ISPITIVANJE MATERIJALA I ZAVARENIH SPOJEVA



www.sigmalab.rs



064 2142 473



34. MEĐUNARODNO SAVETOVANJE “ZAVARIVANJE 2026”



34. međunarodno savetovanje
ZAVARIVANJE 2026

PRVO OBAVEŠTENJE I POZIV ZA PRIJAVU RADOVA

15-17. oktobar 2026.
Hotel Danubia Park, Srebrno jezero, Srbija



member of



DRUŠTVO ZA UNAPREĐIVANJE ZAVARIVANJA U SRBIJI – DUZS, član *European Federation for Welding, Joining and Cutting* organizuje od 15. do 17. oktobra 2026. godine 34. Savetovanje **ZAVARIVANJE 2026** i poziva autore da prijave radove na teme:

- (1) KONVENCIONALNI I NEKONVENCIONALNI POSTUPCI ZAVARIVANJA**
- (2) OSNOVNI, DODATNI I POMOĆNI MATERIJALI**
- (3) INTEGRITET KONSTRUKCIJA I OSIGURANJE KVALITETA**
- (4) TEHNIČKA REGULATIVA, OBRAZOVANJE, EKOLOGIJA I ZAŠTITA**

VAŽNI DATUMI

Prijava rada uz dostavu naziva i apstrakta (do 300 reči, do 5 ključnih pojmova) **27. april 2026.**
 Obaveštenje autorima o prihvatanju apstrakta uz dostavljanje uputstva za pisanje rada **18. maj 2026.**
 Rok za dostavu radova **31. avgust 2026.**
 Obaveštenje o prihvatanju radova i dostava finalnog rada **14. septembar 2026.**

UPUTSTVO ZA PRIJAVU RADOVA

Prijavu radova i konačnih radova možete izvršiti putem web aplikacije duzs.bbn.co.rs ili slanjem istih na email bbn@bbn.co.rs.

Ukoliko se niste ranije registrovali, na pomenutoj web aplikaciji potrebno je da otvorite nalog (ime, prezime, naziv organizacije, države iz koje dolazite, email i potrebno je da kreirate šifru). Detaljno uputstvo je dostupno na sledećem [LINKU](#).

Putem pomenute aplikacije će biti vršene recenzije apstrakata i radova.



KOTIZACIJA

Kotizacijom se nadoknađuju: izrađeni materijali savetovanja, troškovi organizacije, koktel dobrodošlice, kafe na pauzama savetovanja, svečana večera, izlet i iznosi:

Studentska	10.000,00 RSD (85,00 EUR) + PDV 20%
Autori i koautori	14.000,00 RSD (120,00 EUR) + PDV 20%
Članovi DUZS	17.000,00 RSD (145,00 EUR) + PDV 20%
Ostali učesnici	20.000,00 RSD (170,00 EUR) + PDV 20%

SMEŠTAJ

Smeštaj za učesnike obezbeđen je u [hotelu Danubia Park 3*](#) i [Vila Dinčić](#) (20m od hotela Danubia Park) i uključuje noćenje na bazi punog pansiona. Usluga počinje ručkom 15. oktobra i završava se doručkom 17. oktobra.

Hotel	Kategorije smeštaja po osobi	Cena po danu* (RSD / EUR)
Danubia Park 3*	Jednokrevetna soba	13.200,00 / 113,00
	Dvokrevetna soba	20.400,00 / 175,00
	Trokrevetni apartman	28.080,00 / 240,00
Vila Dinčić (ishrana u hotelu Danubia Park)	Jednokrevetna soba	9.480,00 / 80,00
	Dvokrevetna soba	15.840,00 / 135,00
	Jednokrevetni apartman	10.680,00 / 90,00
	Dvokrevetni apartman	16.560,00 / 140,00

*Naznačene cene date su sa uključenim PDV-om, boravišnom taksom i osiguranjem gosta

MESTO ODRŽAVANJA



Srebrno jezero - Nedaleko od Beograda, na reci Dunav nalazi se jedno od najpopularnijih jezera u Srbiji, Srebrno jezero. Zraci sunca koji u suton padaju na površinu Srebrnog jezera kreiraju jedinstven iskričavi sjaj po kome je jezero i dobilo ime. Srebrno jezero udaljeno je 110 km od Beograda, 190 km od Novog Sada, 30 km od Požarevca i 2 km od Velikog Gradišta. Idealno je mesto za godišnji odmor, ljubitelje plivanja, skijanja na vodi, ribolovce ili one koji žele da uživaju u prirodi i šetnjama ovim krajevima.

Hotel Danubia Park - Hotel Danubia Park nalazi se na Srebrnom jezeru, nadomak Dunava i na samo sat i po vremena vožnje od Beograda. Uz gostoprimstvo, topli ambijent, udoban smeštaj kao i brojne sadržaje kako za one koji traže aktivan odmor tako i za one željne opuštanja, hotel Danubia Park pruža usluge spa i fitness centra kao i slobodan ulaz u Aqua Club.



DRUŠTVO ZA UNAPREĐIVANJE ZAVARIVANJA U SRBIJI

Gvozdićeva 15/4, 11000 Beograd, Srbija

E-Mail: duzs011@gmail.com; Web: www.duzs.org.rs

Tel/Fax: +381 11 2420 652

Tehnički organizator savetovanja:

BBN CONGRESS MANAGEMENT D.O.O.

Deligradska 9, 11000 Beograd, Srbija

E-Mail: bbn@bbn.co.rs; bbn.pco@gmail.com; Web: www.bbn.co.rs

Mob: +381 66 8027 718



Ivan Sigumjak ¹, Božo Despotović ², Josip Pavić ³, Tihomir Marsenić ⁴, Mario Jagnjić ⁵, Dejan Marić ^{6,a}, Marko Dunder ^{6,b}, Jadranka Eržišnik ⁷

PRIMJENA LASERSKOG RUČNOG ZAVARIVANJA APPLICATION OF MANUAL LASER WELDING

Stručni rad / Professional paper

Rad primljen / Paper received:

Septembar 2024.

Rad prihvaćen / Paper accepted:

Decembar 2025.

Author's address / Adresa autora:

¹Sigmat d.o.o. Gromačnik, Slavonski Brod, Hrvatska

²Društvo za Tehniku zavarivanja Slavonski Brod, Slavonski Brod, Hrvatska

³ĐĐ Kompenzatori d.o.o, Slavonski Brod, Hrvatska

⁴Andritz TEP d.o.o, Slavonski Brod, Hrvatska

⁵Đuro Đaković Specijalna vozila d.d., Slavonski Brod, Hrvatska

⁶Sveučilište u Slavanskom Brodu, Strojarski fakultet u Slavanskom brodu, Slavonski Brod, Hrvatska,

⁷Fakultet strojarstva I brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Hrvatska

email / ORCID ID :

^a dmaric@unisb.hr / 0000-0002-0142-1750

^b / 0000-0002-9360-0042

Ključne reči: Laser, primjena ručnog laserskog zavarivanja, usporedba s TIG zavarivanjem

Keywords: Laser, manual laser welding, TIG welding, application, comparison

Rezime

Tehnologija zavarivanja laserom je danas primjenjiva u gotovo svim područjima industrije od avioindustrije, brodogradnje, zavarivanja ugljičnih i nehrđajućih čelika, spajanja dijelova obrađenih na konačne dimenzije itd. Zavarivanje laserom karakterizira uska zona uticaja topline (ZUT), male deformacije, mali unos topline, velike brzine zavarivanja kao i fleksibilnost pri mehanizaciji i automatizaciji procesa. Kao negativne strane u primjeni ovog procesa mogu se navesti veliki investicijski troškovi (još uvijek), često zahtjevni načini prihvata dijelova koji se zavaruju, posebni sigurnosni zahtjevi, itd. U ovom radu se navode prva iskustva na području primjene ovog procesa pri proizvodnji dijelova kompenzatora. Na zavarenim spojevima X6CrNiMoTi17-12-2 (W.Nr.1.4571) dimenzija Ø74,1 mm x 1,0 mm sa istim materijalom dimenzija Ø72,1 mm x 5,1 mm, kao i na zavarenim spojevima X6CrNiMoTi17-12-2 (W.Nr.1.4571) dimenzija Ø74,1 mm x 1,0 i P355NH (W.Nr.1.0565) dimenzija Ø72,1 mm x 5,1 mm, proizvedenih TIG i laserskim postupkom zavarivanja, u ovom radu se uspoređuju rezultati ocjene geometrije spojeva, širina ZUT-a kao i ispitivanja tvrdoća. Konačno se izvode zaključci pri usporedbi ovih rezultata a navode se i preporuke za primjenu postupka ručnog laserskog zavarivanja.

Abstract

Today, laser welding technology is applied across nearly all industrial sectors, including aerospace, shipbuilding, welding of carbon and stainless steels, and the joining of components machined to final dimensions, etc. Laser welding is characterized by a narrow heat-affected zone (HAZ), minimal distortion, low heat input, high welding speeds, and flexibility in process mechanization and automation. However, the disadvantages associated with this process include high investment costs, demanding part-fixturing and positioning requirements, stringent safety regulations, etc. The present study presents initial experiences with the application of this process in the production of compensator components. Samples of X6CrNiMoTi17-12-2 (W.Nr.1.4571), with dimensions Ø74.1 mm x 1.0 mm, and samples of the same material with dimensions of Ø72.1 mm x 5.1 mm were welded using TIG and laser welding processes, as well as samples of X6CrNiMoTi17-12-2 (W.Nr.1.4571), with dimensions Ø74.1 mm x 1.0 mm, and samples of P355NH (W.Nr.1.0565), with dimensions of Ø72.1 mm x 5.1 mm. The results of joint geometry evaluation, HAZ width measurement, and hardness testing are comparatively analyzed. Based on these findings, conclusions are drawn, and recommendations for the application of the manual laser welding procedure are provided.



1. Uvod

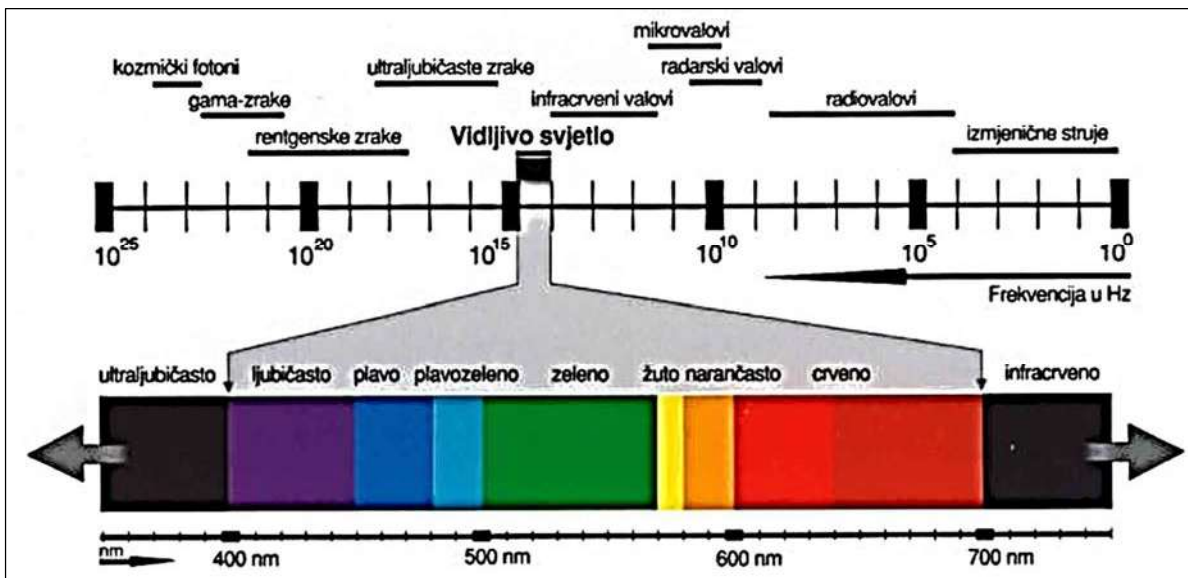
Od otkrića lasera pa sve do danas možemo vidjeti kako se laserska tehnologija postepeno razvijala u svim aspektima. Taj trend se i dalje nastavlja, a područja primjene laserske tehnologije biti će sve veća i sve značajnija.

Tehnološki razvoj na ovom području znanosti doveo nas je do shvaćanja kako fotoni kao svjetlosne titrajuće jedinice energije ili kvanti (kvant je ustvari najmanja količina energije koju neki sustav može dobiti ili izgubiti) igraju sličnu ulogu kao što su to igrali elektroni u dvadesetom stoljeću. Zapravo, možemo reći da je laser postao jedan od najpoznatijih i najpriznatijih izuma fizike. Laserima možemo slati informacije, korigirati vid, izoštravati astronomske slike dalekog svemira, obrađivati različite materijale itd. Zbog toga je primjena različitih lasera i u industriji sve veća, a naročito u daljnjem razvoju aditivnih, mikro i nanotehnologija, u računalnoj i vojnoj industriji. Zbog svojih osnovnih karakteristika kao što je čistoća, preciznost i moguće velike snage zrake, laser je našao veliku primjenu na području znanosti i razvoja, posebno u postizanju ekstremnih uvjeta pri laboratorijskim eksperimentalnim istraživanjima na području kemijskih i bioloških sustava. Koliko je važno

otkriće lasera, govori podatak da je u proteklih 50 godina čak 14 Nobelovih nagrada iz područja prirodnih znanosti dodijeljeno za ona znanstvena otkrića iz fizike koja su direktno povezana uz laserske tehnologije i njihovu primjenu.

Izraz LASER potječe od engleskih riječi „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“ što u prijevodu znači pojačavanje svjetlosti stimuliranom emisijom zračenja tako da je laser izvor koji za razliku od ostalih izvora predstavlja svjetlost koja je generirana mehanizmom stimulirane emisije fotona. Vidljiva svjetlost je uski pojas ili val elektromagnetskog zračenja vrlo visoke frekvencije koji titra okomito u odnosu na smjer svog širenja i pri tome ovaj val osim svjetlosti izaziva i osjećaj različitih boja.

Svjetlost kao zračenje sastoji se od vidljivog dijela spektra valova s rasponom valnih duljina od 380 do 780 nm koje ljudsko oko razlikuje kao boje - od ljubičaste, s najmanjom valnom duljinom, do crvene s najvećom valnom duljinom, što je prikazano na Slici 1 [1].



Slika 1. Prikaz vidljivog područja svjetlosnog zračenja [1].

Figure 1. Representation of the visible region of the electromagnetic spectrum [1].

Svaka duljina vala definirana je određenom bojom spektra. Prirodni spektar Sunčeve svjetlosti čine stalni prijelazi - od kratkih ljubičastih valova, plavih, zelenih i narančastih do dugih crvenih valova. Izvan ovog raspona, za ljudsko oko gama zrake, X, ultraljubičaste i infracrvene zrake nisu vidljive. Još davne 1917. godine Albert Einstein je dao teorijski koncept i predvidio izum lasera i

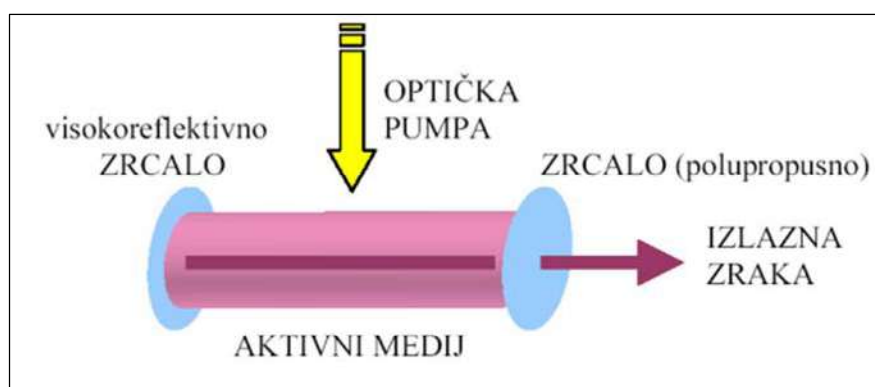
njegovog prvog oblika nazvanog Maser. Maser je u osnovi uređaj koji radi na isti način kao i laser, ali u drugom frekvencijskom području. Prvi laserski modul konstruirao je 1960. godine Theodore Maiman na način da je lasersku emisiju ostvario stimuliranom emisijom iz rubinskog kristala pobuđenog svjetlosnom lampom, a od 1961.



godine koriste se i prvi laseri s plinovima i njihovim mješavinama [2].

Dvije osnovne osobine ovog svjetlosnog procesa su koherentno i monokromatsko svjetlosno zračenje. Koherentno ili sinkronizirano zračenje predstavlja ono zračenje kod kojega svi svjetlosni valovi titraju u fazi. Laserska zraka je usmjerena a zračenje se rasprostire samo u relativno uskom prostornom kutu tako da su i udaljenosti rasprostiranja takvog zračenja velike. Monokromatsko zračenje sastoji se od relativno uskog frekventnog spektra ili možemo reći samo od jedne boje [2].

2. Osnovni dijelovi i princip rada lasera

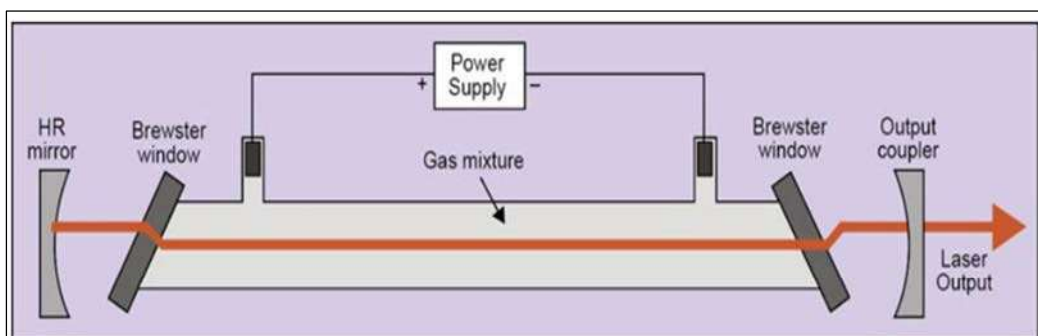


Slika 2. Prikaz osnovnih dijelova lasera [3].

Figure 2. Schematic representation of the basic components of a laser [3].

S aspekta agregatnog stanja laseri mogu biti plinski, tekući, laseri čvrstog stanja kao i poluvodički laseri. Obzirom na osnovne karakteristike, lasere razlikujemo po različitim aktivnim laserskim medijima u kojima se stvara ovo zračenje, što određuje osnovna svojstva emitiranog zračenja: frekvenciju, spektralnu širinu, snagu, itd. Ako je aktivni laserski medij plin (He-Ne, Ar, Xe, CO₂, N₂) tada govorimo o plinskim laserima. Lasersku zraku moguće je proizvesti i u drugim različitim medijima kao što su razni poluvodički

materijali, kristali (Ti: safir, Nd:YAG,...), posebni organski nemetali, specifične molekule (KrF, ArF, XeCl) itd. S obzirom na raspodjelu emitiranog zračenja u vremenu lasere dijelimo na kontinuirane i impulsne. Kod kontinuiranih lasera svjetlost je konstantna u vremenu, dok se kod impulsnih lasera svjetlost periodički mijenja u vremenu. Najčešće korišteni laseri su plinski (Slika 3) koji koriste plinove CO₂, He-Ne, Ar ili mješavinu ovih plinova kao i Nd:YAG laser koji za kruti aktivni medij koristi Itrij Aluminijev kristal [4].



Slika 3. Prikaz lasera s plinom kao aktivnim medijem [4].

Figure 3. Schematic representation of a laser with gas as the active medium [4].



3. Primjena lasera

Laseri se danas mogu primjenjivati u većini grana ljudske djelatnosti kao što su medicina, telekomunikacije, energetika, vojna industrija, avionska industrija, strojarne tehnike, građevina itd.

Na području industrije laseri se najviše koriste za obilježavanje, rezanje, zavarivanje i bušenje materijala poput metala, plastike, drva, nemetala itd.

Rezanje materijala ovim postupkom moguće je i za taljive materijale i za materijale koji pri visokim temperaturama isparavaju. Ovo se odnosi i na specifične materijale kao što su polimeri, metalni i keramički kompoziti, metalne pjene ili ugljična vlakna. U tehnologiji zavarivanja laser je danas primjenjiv u gotovo svim područjima od zavarivanja ugljičnih i nehrđajućih čelika, spajanja materijala jako malih debljina, spajanja dijelova obrađenih na konačne dimenzije, zavarivanja specifičnih suvremenih materijala itd. Pri tome se kao aktivni medij najčešće koriste plin CO₂ i kristal Nd:YAG.

Zavarivanje laserom karakterizira uska zona ZUT-a, male deformacije, mali unos topline, velike brzine zavarivanja kao i vrlo široko područje mogućnosti mehanizacije i automatizacije procesa.

Prednosti laserskog zavarivanja u odnosu na ostale procesa je preciznost i fleksibilnost kao i mogućnost korištenja lasera velikih snaga do 25 kW. Posebna produktivnost procesa je evidentna ako se laser koristi na robotskim sustavima. Sveukupni trošak laserskog zavarivanja koristeći robotske sustave je prema nekim analizama i do 50% manji od MIG postupka zavarivanja za jednake dužini zavarenog spoja.

Zbog svoje visoke preciznosti i širokog raspona snage moderni laser je omogućio razvoj mikro zavarivanja i mikro strojne obrade koja je vrlo zastupljena u računalnoj, telekomunikacijskoj te svemirskim tehnologijama i vojnoj industriji.

Danas su u primjeni i razna unaprjeđenja i poboljšanja ovog procesa s ciljem daljnjeg povećanja njegove efikasnosti. Sve veće su moguće brzine zavarivanja, povećanje penetracije u materijal koji se zavaruje kao i povećanje količine depozita.

Istraživanja na području lasera se i dalje vode te se njegovo područje primjene konstantno širi. Od negativnih strana zavarivanja laserom mogu se navesti nužni potrebni posebni sigurnosni zahtjevi, veliki investicijski troškovi, često zahtjevni načini prihvata dijelova koji se zavaruju, ali ovi elementi u većini slučajeva nisu ograničavajući faktor u primjeni ovog postupka. [5]

Korištenje laserske tehnologija na stabilnim mehaniziranim ili automatiziranim sustavima bilo da se radi o preciznim uređajima malih snaga ili o robusnijim industrijskim sustavima raznih namjena je danas uobičajeno.

U zadnje vrijeme ukazala se potreba i za mobilnim sustavima ovog procesa tako da su u sve većoj primjeni i ručni procesi koji su zasnovani na primjeni lasera.

Zahvaljujući prije svega mogućnošću ručnog upravljanja operater može vrlo precizno usmjeriti laserski snop na željeno mjesto što u konačnici rezultira fleksibilnošću i prilagodljivosti procesa za različite namjene. Danas se na tržištu opreme mogu nabaviti kompaktni multifunkcionalni uređaji na bazi laserske tehnologije koji osim rezanja i zavarivanja mogu obavljati i zadatke čišćenja površina od oksida, prljavštine, masnoća, a bez oštećenja osnovnog materijala.

4. Eksperimentalni deo

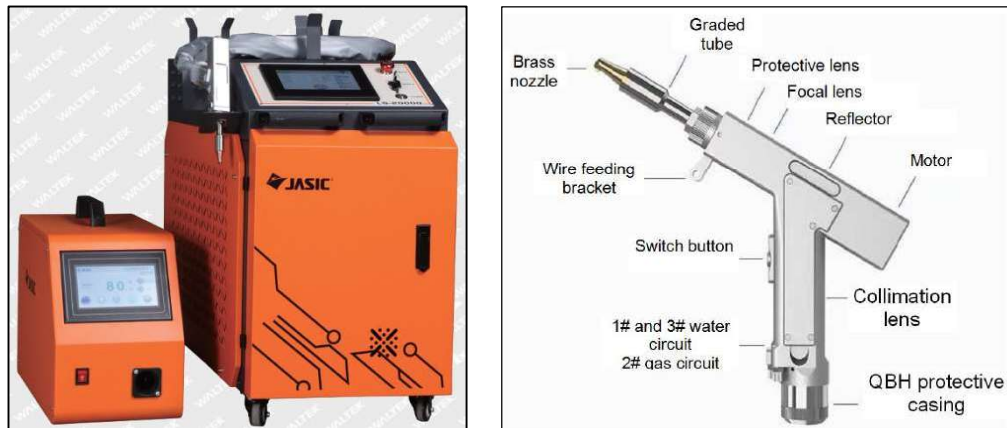
U firmi Đuro Đaković Kompenzatori d.o.o. donesena je odluka o nabavi uređaja Jasic Model LS-20000M, lasera za ručno zavarivanje, sa ciljem istraživanja mogućnosti primjene ručnog laserskog zavarivanja u proizvodnji kompenzatora.

Zavarivanje preklopnih kutnih spojeva, tankostijene harmonike iz nehrđajućih materijala na cijevne nastavke i prirubnice iz nehrđajućih i/ili ugljičnih materijala, zahtjeva specifičnu pripremu za zavarivanje TIG postupkom sa gustim pripajanjem kako je prikazano na Slici 5. Unosom topline dolazi do toplinskih deformacija sa tendencijom odvajanja tankostijene harmonike od cijevnih nastavaka. Cilj je zadržati visoku kvalitetu proizvoda uz povećanje proizvodnosti, fleksibilnosti i ekonomičnosti. Lasersko zavarivanje sa svojim usko ograničenim i koncentriranim unosom energije predstavlja prikladan alat za udovoljavanje navedenih zahtjeva.



Slika 5. Detalj pripreme za zavarivanje tankostijene harmonike na cijevne nastavke.

Figure 5. Detail of the preparation for welding a thin-walled bellows to pipe fittings.



Slika 6. Uređaja Jasic Model LS-20000M (lijevo) sa prikazom dijelova ručnog gorionika za lasersko zavarivanje SUP20S (desno) [5].

Figure 6. Jasic Model LS-20000M device (left) with a view of the components of the SUP20S manual laser welding torch (right) [5].

Tehničke karakteristike uređaja Jasic Model LS-20000M (Slika 6):

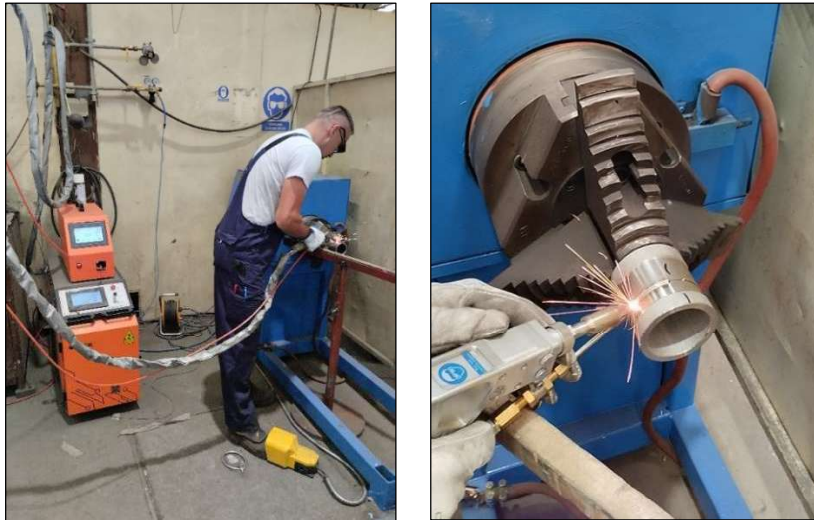
- vrsta lasera - fiber laser,
- tip provodljivosti - optičko vlakno,
- središnja valna duljina – 1080 ± 10 nm,
- ulazna snaga - 9 kW,
- izlazna snaga lasera - 2000 W,
- duljina zavarivačkog kabela - 12 m,
- promjer žice za zavarivanje - 0,8 mm - 1,6 mm,
- zaštitni plinovi - argon, dušik, komprimirani zrak (za rezanje),
- dodavač žice može raditi impulsno,

- mogućnost rezanja materijala do debljine 6 mm,
- mogućnost čišćenja površine materijala od hrđe.

4.1. Zavarivanje uzoraka

Uzorci iz materijala X6CrNiMoTi17-12-2 (W.Nr.1.4571) dimenzija $\varnothing 74,1 \times 1,0$ mm zavarivani su TIG postupkom i laserom sa uzorcima iz materijala X6CrNiMoTi17-12-2 (W.Nr.1.4571) i P355NH (W.Nr.1.0565) dimenzija $\varnothing 72,1 \times 5,1$ mm.

Parametri zavarivanja TIG postupkom: struja zavarivanja 130 A, napon 12 V, brzina zavarivanja 150 mm/min, žica ER316L $\varnothing 2,0$ mm. Uzorci za TIG zavarivanje pripojeni gusto u razmaku 2 - 3 mm.



Slika 7. Zavarivanje uzoraka laserom (lijevo) sa detaljom pozicioniranja gorionika (desno).

Figure 7. Laser welding of samples (left) with a detail of torch positioning (right).

Parametri zavarivanja laserom:

- scan speed - 400 mm/s,
- scan width - 4,0 mm,
- peak power - 1400 W,
- welding speed - 800 mm/min,
- duty cycle - 100 %,
- frequency - 4000 Hz,
- wire pulse cycle - 500 ms,
- wire smoothness - 50 %,
- wire average speed - 54 cm/min,
- wire ER316LSi \varnothing 0,8 mm.

Uzorci za zavarivanje laserom pripojeni samo na dva mjesta.

4.2. Pregled i ocjena uzoraka

Vizualnim pregledom zavarenih spojeva uočeno je da su zavareni spojevi, izvedeni TIG-om i laserom, pravilnog oblika, na zavarima nema prslina i nepravilnosti (rupa, poroznosti i nedozvoljenih zajedaja), dimenzije i nadvišenja zadovoljavaju (Slika 8a). Na uzorku zavarenom TIG-om (Slika 8b) vidljiva je pobojenost materijala sa unutrašnje strane cijevi kao posljedica unosa topline prilikom zavarivanja. Na uzorku zavarenom laserom (Slika 8c) pobojenost nije prisutna.



a)



b)



c)

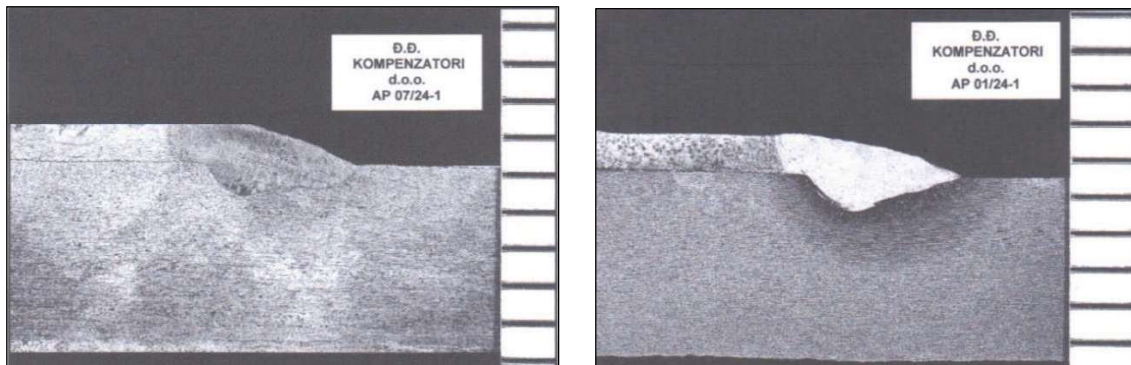
Slika 8. Zavareni uzorci iz materijala X6CrNiMoTi17-12-2 (W.Nr. 1.4571), a) Vizualna usporedba uzoraka TIG (lijevo) i laser (desno), b) Uzorak zavaren TIG-om sa izraženom pobojenosti sa unutrašnje strane i c) Uzorak zavaren laserom bez pobojenosti.

Figure 8. Welded samples made of X6CrNiMoTi17-12-2 (W.Nr. 1.4571): (a) visual comparison of TIG-welded (left) and laser-welded (right) sample, (b) TIG-welded sample with pronounced discoloration on the inner side, and (c) laser-welded sample without discoloration.



Makrostruktura na uzorcima AP 07/24-1 i AP 01/24-1, zavarenih TIG-om, je bez anomalija prema

EN ISO 6520-1:2007. i prikazana je na Slici 9.



Slika 9. Makrostruktura uzoraka TIG zavarivanja AP 07/24-1 materijal W.Nr.1.4571 + W.Nr.1.4571 (lijevo) i AP 01/24-1 materijal W.Nr.1.4571 + P355NH (desno).

Figure 9. Macrostructure of TIG-welded samples: AP 07/24-1, material W.Nr. 1.4571 + W.Nr. 1.4571 (left), and AP 01/24-1, material W.Nr. 1.4571 + P355NH (right).

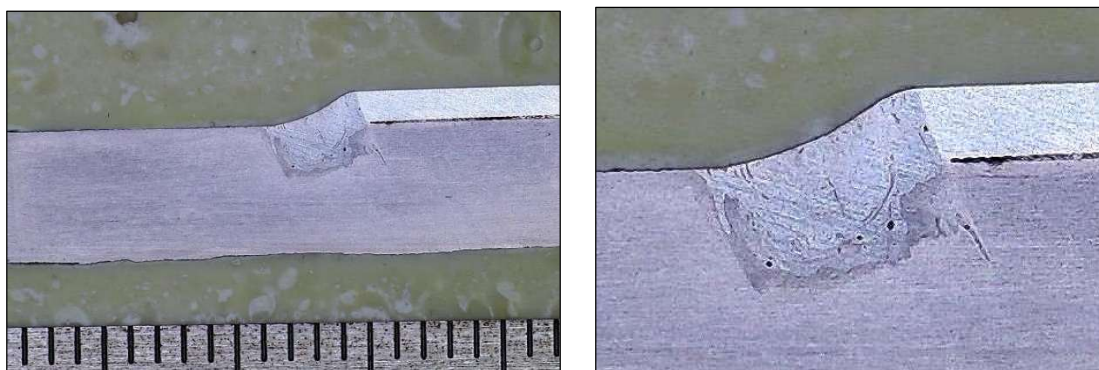
Makrostruktura uzoraka zavarenih laserom (Slike 10 i 11) pokazuje prisutnost pora u zavarenom spoju, a na uzorku zavarenom između

raznorodnih materijala, W.Nr.1.4571 + P355NH, vidi se i prslina (Slika 11).



Slika 10. Makrostruktura uzorka zavarenog laserom, materijal W.Nr.1.4571 + W.Nr.1.4571 (lijevo) sa uvećanim detaljom pora (desno).

Figure 10. Macrostructure of the laser-welded sample, material W.Nr. 1.4571 + W.Nr. 1.4571 (left), with an enlarged detail of pores (right).



Slika 11. Makrostruktura uzorka zavarenog laserom, materijal W.Nr.1.4571 + P355NH (lijevo) sa uvećanim detaljom pora i prslinom (desno).

Figure 11. Macrostructure of the laser-welded sample, material W.Nr. 1.4571 + P355NH (left), with an enlarged detail of pores and a crack (right).



5. Zaključak

U radu su prikazani neki od preliminarnih rezultata istraživanja primjene ručnog laserskog zavarivanja u proizvodnji kompenzatora u kojima se uočavaju prednosti ove tehnologije ali i mogući problemi vezani uz kvalitetu zavarenih spojeva.

Lasersko zavarivanje sa svojim usko ograničenim i koncentriranim unosom energije omogućuje zavarivanje tankostijenih materijala, velika brzina zavarivanja omogućuje veću produktivnost, nizak i precizan unos topline rezultira malom zonom utjecaja topline i manjim toplinskim deformacijama. Kada govorimo o ručnom laserskom zavarivanju najveće mane su upravo navedene prednosti laserskog zavarivanja. Parametri laserskog zavarivanja, snaga lasera, velika brzina zavarivanja, fokusiranje žarišne točke lasera u odnosu na radni komad, točnost pripreme spoja, nalaze se u uskom rasponu. Svako odstupanje ima za posljedicu pojavu anomalija u zavarenom spoju (poroznost, zajedi, prsline, nedostatak penetracije,...).

Sama cijena uređaja za ručno lasersko zavarivanje je prihvatljiva, ali obavezno treba razmisliti o troškovima pomoćnih naprava, okretaljki, pozicionera kako bi se osigurala ponovljivost i konstantnost prilikom zavarivanja. Sa stajališta zaštite na radu, poželjno je osigurati poseban prostor za zavarivanje sa odgovarajućim zaštitnim zaslonima, laserska zraka može ozlijediti oči i spaliti kožu, obavezno treba koristiti zaštitne maske i naočale za područje valne duljine lasera.

Literatura / References

[1] Tanhofer, N. (2008). O boji. Zagreb: Novi Liber.

[2] Artemii, B., Vladyslav, K. The history of the creation of lasers and analysis of the impact of their application in the material processing on the development of certain industries, *History of science and technology*, 2021, 11(1):125-149.

[3] Ticijana B., *Laseri u znanosti i tehnologiji*. Državni seminar za učitelje i nastavnike fizike u osnovnim i srednjim školama, Zadar 25.-28. ožujka 2008.

5. Conclusion

This paper presents preliminary research results regarding the application of manual laser welding in the production of expansion joints (compensators). The findings highlight the advantages of this technology while simultaneously identifying potential challenges related to the quality of welded joints.

Laser welding, characterized by its highly localized and concentrated energy input, facilitates the welding of thin-walled materials. Its high processing speeds enhance productivity, while the low and precise heat input results in a narrow heat-affected zone (HAZ) and minimal thermal distortion. However, in the context of manual laser welding, the primary disadvantages arise from the very nature of these advantages. Parameters such as laser power, high welding speed, focal point positioning relative to the workpiece, and joint preparation precision operate within a very narrow tolerance range. Any deviation leads to weld defects, including porosity, undercut, cracks and lack of penetration.

While the capital cost of manual laser welding units is relatively accessible, it is essential to account for the additional costs of auxiliary equipment, such as rotators and positioners, to ensure repeatability and consistency during the welding process. Furthermore, from an occupational safety perspective, it is advisable to provide a dedicated welding area equipped with appropriate protective screening. Given that laser beams can cause severe ocular injuries and skin burns, the use of specialized protective masks and goggles rated for the specific laser wavelength is mandatory.

[4] Maršal, D. *Laseri i njihova primjena*, Završni rad, Veleučilište u Karlovcu, 2019.

[5] Pavić, J., Sigurnjak, I., Samardžić, I., Marić, D., Petrović, I. *Iskustva u primjeni ručnog laserskog zavarivanja*. *Zavarivanje, časopis za zavarivanje i srodne tehnologije* 67(3/4): 91-95.

ČASOPIS ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE**Cenovnik oglasnog prostora u četiri uzastopna broja 2026**

	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%.
- Objavljanje oglasa u samo jednom broju iznosi 30% od datih cena.
- Reklamni tekstovi: 25% od cene površine crno/belih oglasa.
- Dostava materijala:
 - za crno-beli film ili CD (Adobe Photoshop / CoreIDRAW);
 - za kolor film ili CD (Adobe Photoshop / CoreIDRAW);
 - 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 2026

	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 / CoreIDRAW)
 - for color CD (Adobe Photoshop / CoreIDRAW).
- 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 2026. godinu | 5.000 dinara |
| Članovima DUZS GRATIS godišnje izdanje časopisa "ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE" | |
| 2. ČASOPIS "ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE" - 2026. 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 2025. godinu | 500 dinara |
| ▪ cena pojedinačnog broja za prethodne godine..... | 250 dinara |
| b) beneficirane cene za članove DUZS: | |
| ▪ cena pojedinačnog broja za 2025. godinu (pouzećem ili preuzimanjem) | 400 dinara |
| ▪ cena pojedinačnog broja za prethodne godine (pouzećem ili preuzimanjem) | <u>Gratis</u> |
| 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 |