



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 strukturalna svojstva sučeonih zavarenih spojeva 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 mikrostrukturalna 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 antikorozone zaštite. Legure serije 2XXX, zbog visoke čvrstoće, dobrih svojstva 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.

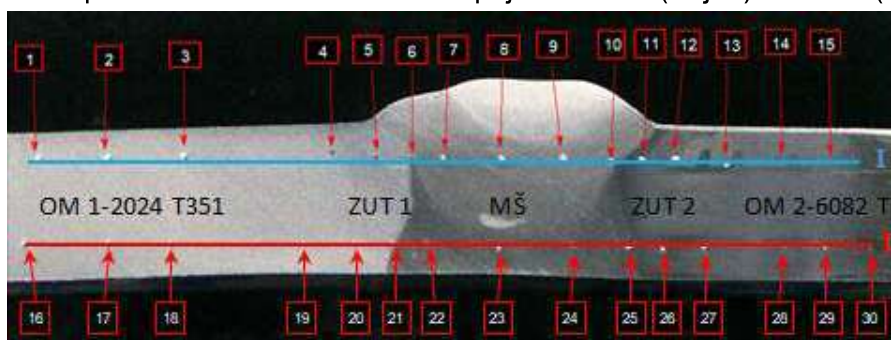
	MIG	TIG
Aparat za zavarivanje:	Fronius Trans Puls Synergic 4000	Magic Wave 4000 Job G/F -Fronius
Zaštitni gas:	I3-ArHe-30	I1-Ar (5.0)
Protok gasa:	18 l/min	12 l/min
Prečnik šobe:	Ø 12 mm	No.6 (Ø 9,5 mm)
Rastojanje šobe:	8 – 12 mm	10 – 12 mm
Ugao gorionika:	90°, Tehnika "unapred"	
Način predgrevanja: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

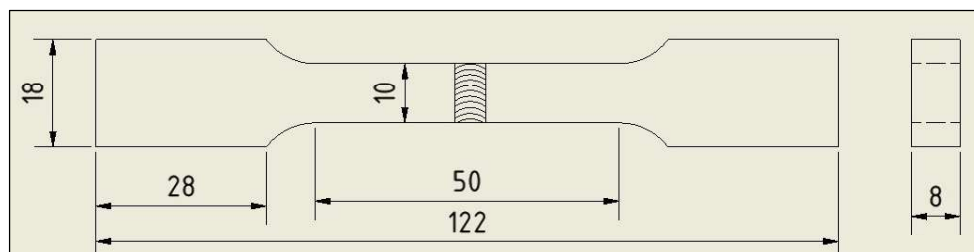


Slika 1. Mesta merenja tvrdoće na zavarenom spoju.

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)



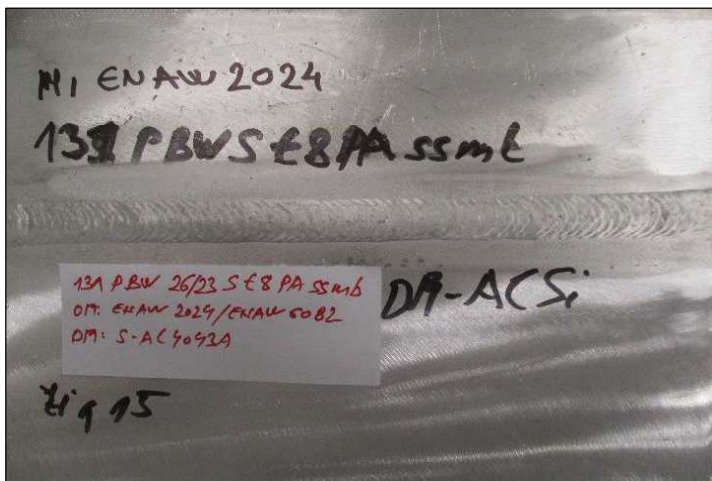
c)



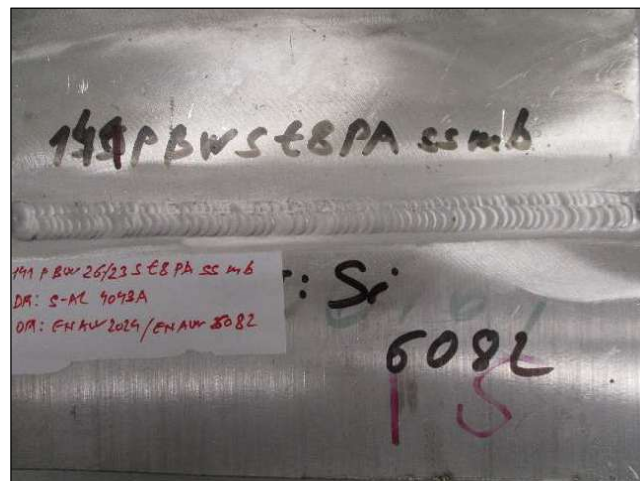
d)

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.



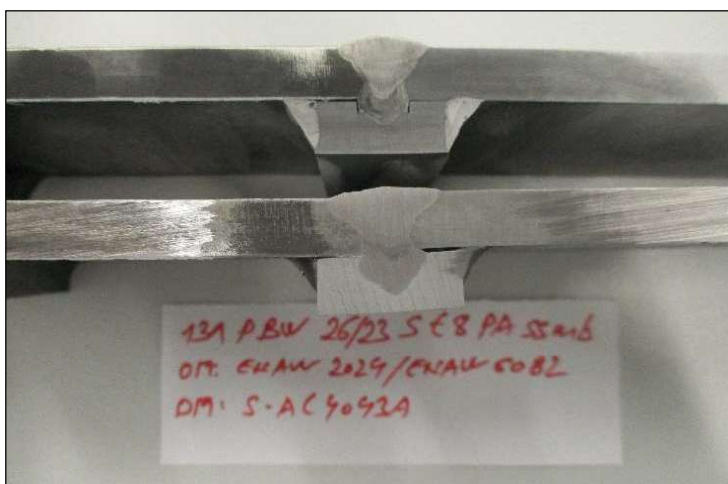
a)



b)

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

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



a)

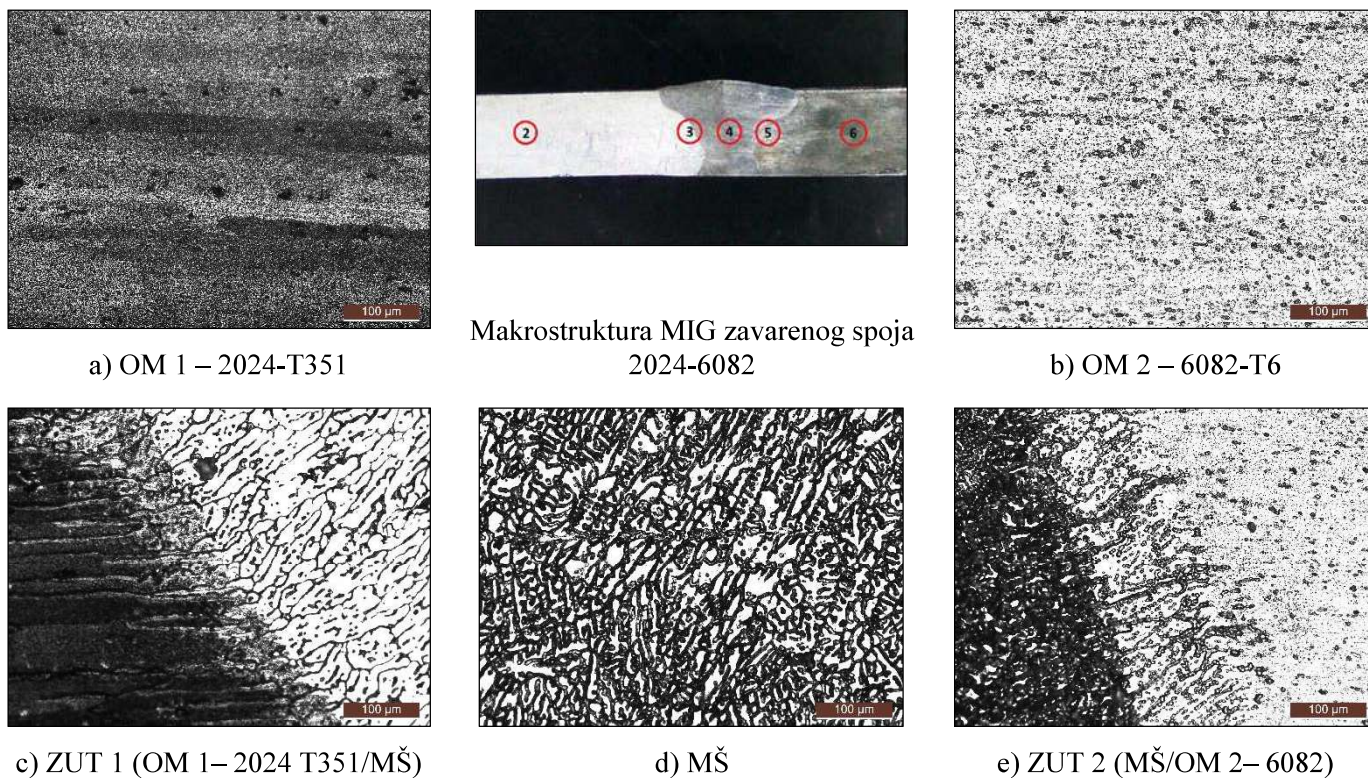


b)

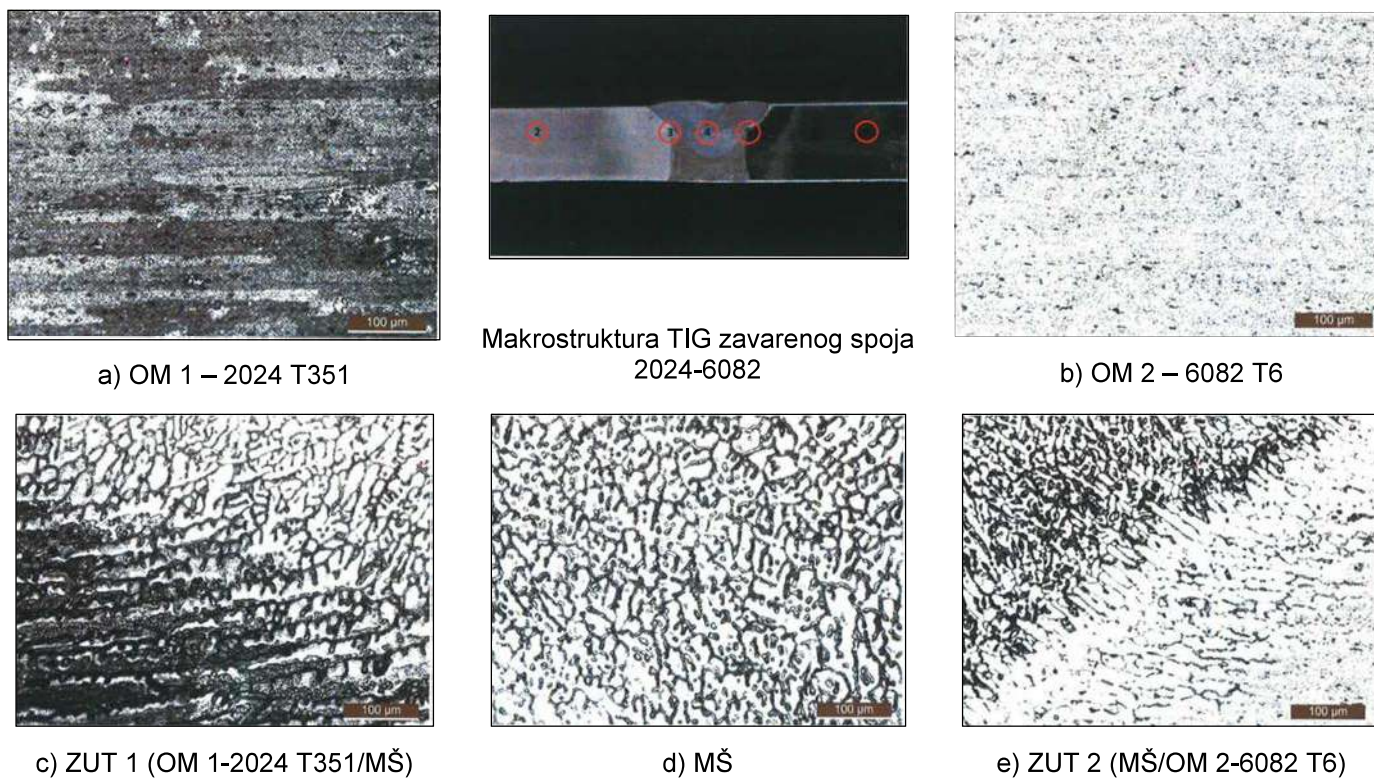
Slika 5. Makrostruktura zavarenog spoja rađenog sa korenom letvom: a) MIG; b) TIG.

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).



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



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



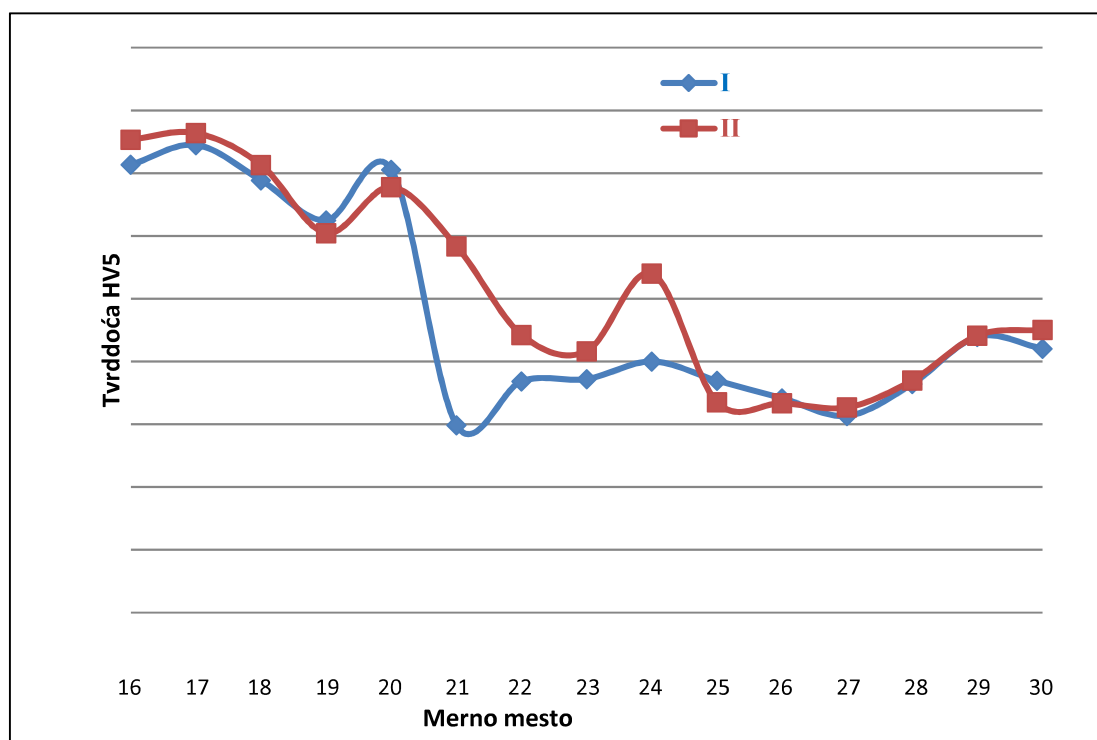
Rezultati merenja tvrdoće MIG zavarenog spoja su dati u Tabeli 6, a dijagram profila tvrdoće sa merenjima duž dva horizontalna pravca blizu lica i blizu korena zavarenog spoja je dat na Slici 8.

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 sučeonu 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.

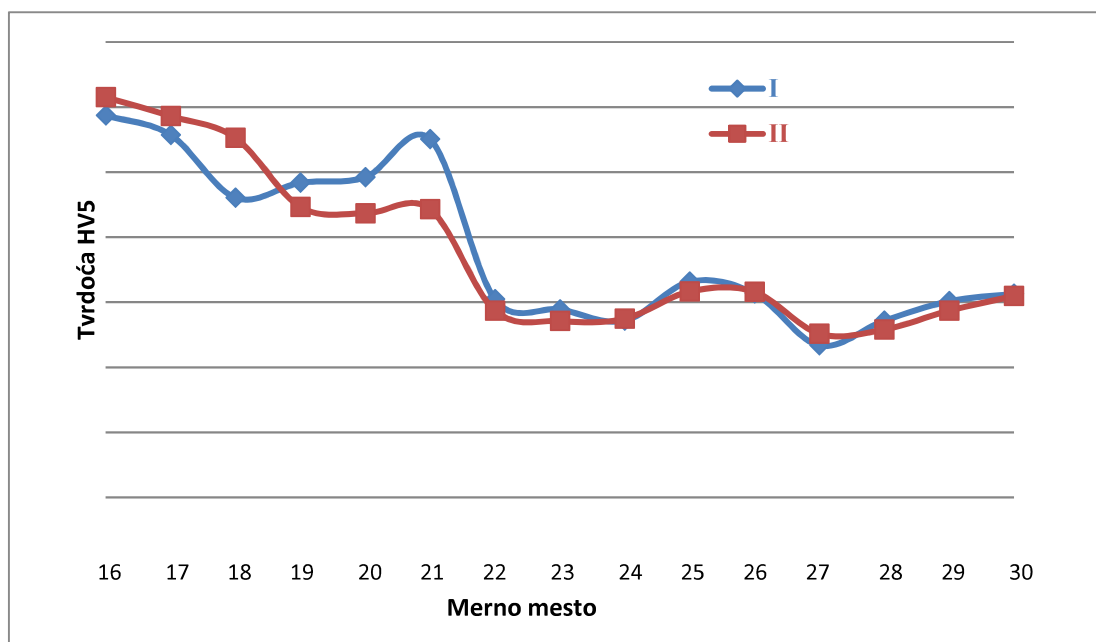


Tabela 7. Rezultati merenja tvrdoće TIG zavarenog spoja 2024-T351/6082 T6 [21].

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 sučeonu 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

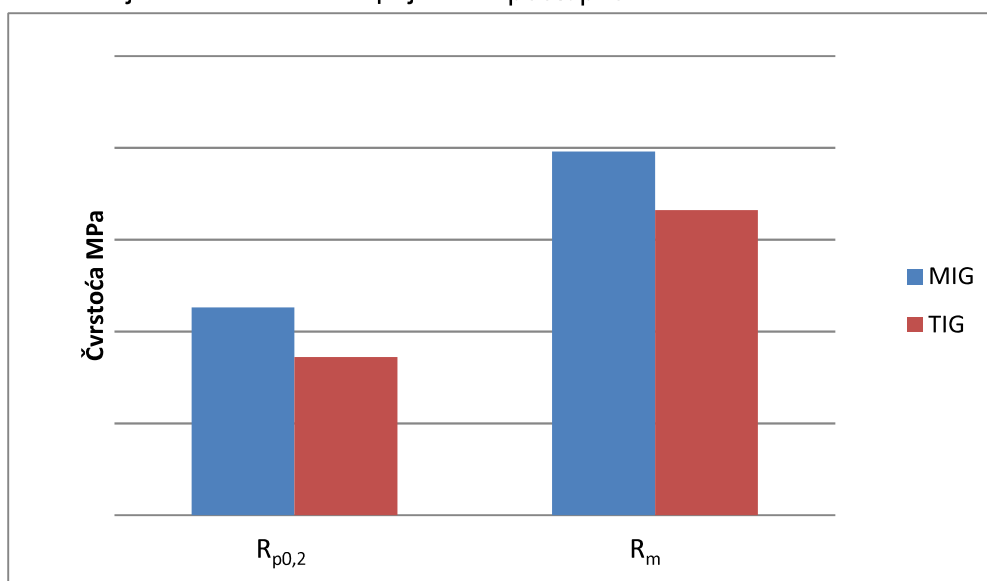


do ZUT-a, talog je izdvojen po granicama zrna stubaste morfologije.

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>.