Broj rada: 1.3
DOI: 10.65156/wws.sjdp.si.003

UTICAJ MIG POSTUPKA ZAVARIVANJA NA MEHANIČKA SVOJSTVA SUČEONIH ZAVARENIH SPOJEVA ISTOVRSNIH I RAZNOVRSNIH ALUMINIJUMSKIH LEGURA 2024-T351 I 6082-T6 – KOMPARATIVNA ANALIZA

EFFECT OF MIG WELDING PROCESS ON MECHANICAL PROPERTIES OF BUTT WELDED JOINTS OF SIMILAR AND DISSIMILAR ALUMINUM ALLOYS 2024-T351 AND 6082-T6 – A COMPARATIVE ANALYSIS

dr Dragan Milčić[1], redovni profesor, ORCID broj: 0000-0002-3936-7462
dr Miodrag Milčić[1], vanr. profesor, ORCID broj: 0000-0002-1089-8390
dr Tomaž Vuherer[2], docent, ORCID broj: 0000-0002-1866-8266
dr Nataša Zdravković[1], docent, ORCID broj: 0000-0001-6085-7522
dr Damjan Klobčar[3], vanr. profesor, ORCID broj: 0000-0002-6130-0328
dr Aleksija Đurić[4], docent, ORCID broj: 0000-0002-0251-6364

[1]Mašinski fakultet, Univerzitet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija
[2]Faculty of Mechanical Engineering, University of Maribor, Smetanova 17, 2000 Maribor, Slovenia
[3]Faculty of Mechanical Engineering, University of Ljubljana, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana, Slovenia
[4]Mašinski fakultet, Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Vuka Karadžića 30, 71123 Istočno Sarajevo, Bosna i Hercegovina, Republika Srpska

E-mail: dragan.milcic@masfak.ni.ac.rs

Abstrakt: U ovom radu prikazana je komparativna analiza uticaja MIG postupka zavarivanja na mehanička svojstva i mikrostrukturu sučeonih zavarenih spojeva istovrsnih aluminijumskih legura 2024-T351 i raznovrsnih aluminijumskih legura 2024-T351 i 6082-T6. Kao dodatni materijal korišćena je žica EN ISO 18273: S Al 4043A (AlSi5(A)), a kao zaštitni gas mešavina argona i helijuma (ISO 14175 - I3 – ArHe -30). Ocena mehaničkih svojstava zavarenih spojeva izvršena je ispitivanjem tvrdoće po Vikersu, zateznim ispitivanjem i ispitivanjem savijanjem. Analiza mikrostrukture sprovedena je primenom svetlosne (LM) i skenirajuće elektronske mikroskopije (SEM). Rezultati pokazuju da MIG postupak zavarivanja uzrokuje značajno smanjenje čvrstoće i tvrdoće u metalu šava i zoni uticaja toplote (ZUT) kod obe kombinacije legura. Lom pri zateznom ispitivanju spoja istovrsnih legura nastaje u metalu šava i ima karakter krtog loma, dok kod raznovrsnih legura lom nastaje u osnovnom metalu 6082-T6 i ima karakter žilavog loma.

Ključne reči: MIG postupak zavarivanja, aluminijumska legura 2024-T351, aluminijumska legura 6082-T6, istovrsni zavareni spojevi, raznovrsni zavareni spojevi, mehanička svojstva

Abstract: This paper presents a comparative analysis of the effect of the MIG welding process on the mechanical properties and microstructure of butt welded joints of similar

aluminum alloys 2024-T351 and dissimilar aluminum alloys 2024-T351 and 6082-T6. The filler material used was wire EN ISO 18273: S Al 4043A (AlSi5(A)), and the shielding gas was an argon-helium mixture (ISO 14175 – I3 – ArHe-30). The mechanical properties of the welded joints were evaluated by Vickers hardness testing, tensile testing, and bend testing. Microstructural analysis was performed using light microscopy (LM) and scanning electron microscopy (SEM). The results show that the MIG welding process causes a significant reduction in strength and hardness in the weld metal and heat-affected zone (HAZ) for both alloy combinations. Fracture during tensile testing of the similar alloy joint occurs in the weld metal and exhibits a brittle fracture character, whereas in the dissimilar alloy joint fracture occurs in the base metal 6082-T6 and exhibits a ductile fracture character.

Keywords: MIG welding process, aluminum alloy 2024-T351, aluminum alloy 6082-T6, similar welded joints, dissimilar welded joints, mechanical properties

1. UVOD

Primena lakih konstrukcija u savremenom transportu postala je jedan od ključnih inženjerskih imperativa u kontekstu globalne dekarbonizacije i povećanja energetske efikasnosti. Aluminijumske legure zauzimaju centralnu poziciju u ovom procesu zahvaljujući izuzetnom odnosu čvrstoće i mase, inherentnoj otpornosti na koroziju i visokoj stopi reciklabilnosti [1, 2]. U industriji šinskih vozila, brodogradnji, automobilskoj i vazduhoplovnoj industriji aluminijumske legure postepeno zamenjuju čelik u nosećim strukturama - u drumskim i železničkim vozilima aluminijum omogućava smanjenje mase konstrukcije i do 50% u poređenju sa čelikom [3].

U praksi se često javlja potreba za spajanjem komponenti od različitih aluminijumskih legura, od kojih svaka nosi specifičan kompromis između čvrstoće, zavarljivosti i otpornosti na koroziju. Legura AA 2024-T351 pripada seriji 2XXX (Al-Cu-Mg), dostiže zateznu čvrstoću od 425 MPa i odlikuje se visokom zamornom čvrstoćom, što je čini preferiranim materijalom za primarne nosive elemente vazduhoplovnih konstrukcija [4]. Međutim, zbog visokog sadržaja bakra, ova legura ima izuzetno širok interval očvršćavanja, što je čini visoko osetljivom na tople prsline pri fuzionom zavarivanju - MIG zavarivanje AA 2024 bez podložne trake i pažljivo odabranog dodatnog materijala praktično nije izvodivo [5, 6]. Legura AA 6082-T6 pripada seriji 6XXX (Al-Mg-Si), ima umerenu čvrstoću ($R_m \approx 310$ MPa) i odličnu zavarljivost fuzionim postupcima, zbog čega se široko koristi u konstrukcijama šinskih vozila i brodogradnji [7].

Zavarivanje precipitaciono ojačanih aluminijumskih legura fuzionim postupcima nosi niz metalurških izazova koji direktno degradiraju mehanička svojstva zavarenog spoja. Termički ciklus zavarivanja izaziva rastvaranje, prezrevanje i rast ojačavajućih precipitata u zoni uticaja toplote (ZUT), što uzrokuje lokalno omekšavanje materijala - kod legura serije 6XXX omekšavanje ZUT može dostići i 50% u odnosu na osnovi metal [8, 9]. Pored toga, visoka toplotna provodljivost i visok koeficijent linearnog širenja aluminijuma pogoduju nastanku poroznosti, prslina pri skrućivanju i likvacionih prslina, posebno u legurama serije 2XXX [5]. Studije su pokazale da zatezna čvrstoća MIG zavarenih spojeva legure AA 2024-T351 ne prelazi 50% čvrstoće osnovnog metala, a lom ima izražen krto-transkristalni karakter [6].

Kao alternativa fuzionom zavarivanju, zavarivanje trenjem sa mešanjem (FSW) eliminiše probleme topljenja i skrućivanja, ostvaruje uže ZUT i znatno veće mehaničke performanse spojeva legure 2024-T351 - FSW spojevi dostižu i do 80% više vrednosti UTS od MIG i TIG spojeva iste legure [6]. Ipak, MIG postupak ostaje tehnološki i ekonomski relevantan u serijskoj industrijskoj proizvodnji zbog fleksibilnosti, brzine i mogućnosti automatizacije, te se istraživački napori usmeravaju ka razumevanju i optimizaciji ponašanja MIG zavarenih spojeva heterogenih aluminijumskih kombinacija [10].

U dosadašnjoj literaturi istovrsni MIG zavareni spojevi 2024-T351/2024-T351 i raznovrsni spojevi 2024-T351/6082-T6 nisu sistematično poređeni u istim eksperimentalnim uslovima. Prethodna istraživanja autora [11, 12] utvrdila su karakteristične obrasce degradacije mehaničkih svojstava i raspodale tvrdoće za oba tipa spoja, ali komparativna analiza uzroka i mehanizama razlike u lokaciji loma i iznosu pada čvrstoće nije bila predmet posebne studije.
Cilj ovog rada je da kroz sistematičnu komparativnu analizu MIG zavarenih spojeva 2024-T351/2024-T351 i 2024-T351/6082-T6 - izrađenih identičnim parametrima procesa i istim dodatnim materijalom - kvantifikuje razliku u mehaničkim svojstvima, identifikuje kritične faktore koji određuju mesto i karakter loma, i pruži osnovu za odabir optimalne tehnologije spajanja u industrijskim primenama.

2. MATERIJALI I METODE

Eksperimentalno istraživanje obuhvata dva seta uzoraka zavarenih MIG procesom:

- Sučeoni zavareni spoj iste aluminijumske legure AA 2024-T351/AA 2024-T351,
- Sučeoni zavareni spoj nesrodnih aluminijumskih legura AA 2024-T351/AA 6082-T6.

Hemijski i mehanički sastav osnovnih materijala i dodatnog materijala prikazani su u tabelama 1 i 2. Dimenzije ploča za zavarivanje bile su 300 mm × 125 mm × 8 mm. Za zavarivanje je korišćen uređaj Fronius Transpuls Synergic 4000. Zaštitni gas bio je mešavina argona i helijuma (ISO 14175 – I3 – ArHe–30).

Tabela 1. Hemijski sastav osnovnih materijala AA 2024-T351 i AA 6082-T6 (mas. %) (EN 573-3)

Legura	Mn	Fe	Mg	Si	Cu	Zn	Ti	Al
2024-T351	0,3-0,9	< 0,5	1,2-1,8	< 0,5	3,8-4,9	< 0,25	< 0,15	Osnova
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	Osnova

Tabela 2. Mehanička svojstva osnovnih materijala

Legura	R_{eh} (MPa)	R_m (MPa)	A (%)	Tvrdoća HV
2024-T351	310	425	10	137
6082-T6	260	310	10	95

Parametri MIG zavarivanja za oba seta uzoraka prikazani su u Tabeli 3. Uzorci su rezani hidroabrazivnim rezanjem. Ispitivanje mehaničkih svojstava obuhvata: merenje tvrdoće po Vikersu (aparat Wilson VH1150), zatezni test (Shimadzu AG-X 300 kN, prema ASTM E8M), test savijanja na troukladnoj prizi (lice i koren šava) i Charpy udarno ispitivanje. Analiza mikrostrukture sprovedena je na svetlosnom mikroskopu Leica Q500MC i skenirajućem elektronskom mikroskopu JEOL JSM-6610LV, nakon metalografske pripreme i nagrizanja Kellerovim reagensom.

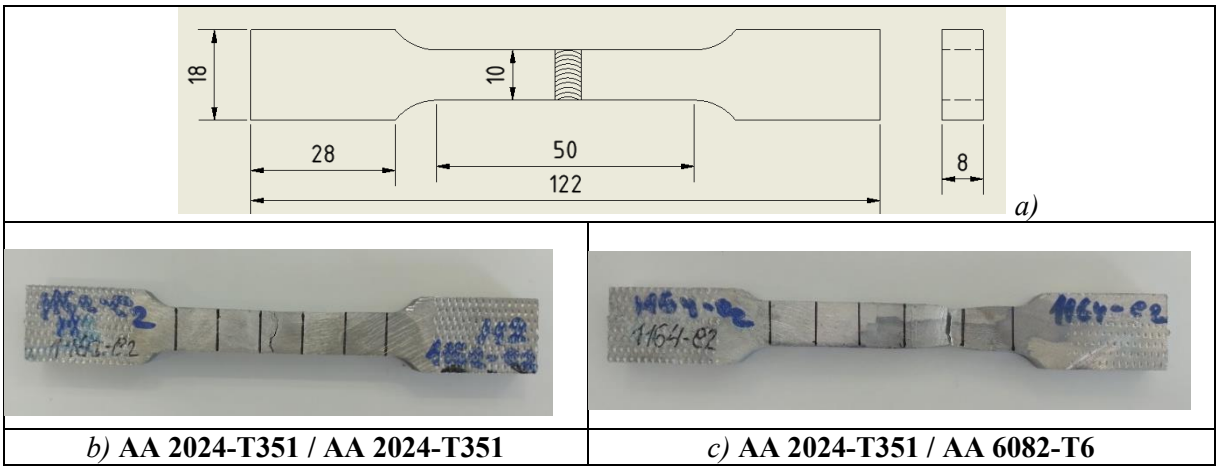
Tabela 3. Parametri MIG zavarivanja [12, 13]

Zavareni spoj	Prolaz	I (A)	U (V)	Brzina žice (m/min)	Brzina zav. (mm/s)	Unos toplote (J/mm)
AA 2024 / AA 2024	1	155	21,7	6,3	6,98	385
	2	180	23,2	7,5	8,82	379
	3	170	22,7	7,3	8,33	371
AA 2024 / AA 6082	1	150	21,0	6,2	7,00	360
	2	160	22,0	6,5	11,5	245
	3	160	22,0	6,5	7,70	366

3. REZULTATI

3.1. Zatezna čvrstoća

Zatezna svojstva zavarenih spojeva su određena na sobnoj temperaturi korišćenjem kidalice Shimadzu AG-X 300 kN. Za ispitivanje su korišćene epruvete dimenzija definisanih standardom ASTM E8M. Na slici 1a date su dimenzije epruvete korišćene za ispitivanje zateznih svojstava zavarenih spojeva AA 2024-T351 / AA 2024-T351 i AA 2024-T351 / AA 6082-T6 ostvarenih MIG postupkom zavarivanja.



b) **AA 2024-T351 / AA 2024-T351** | *c)* **AA 2024-T351 / AA 6082-T6**

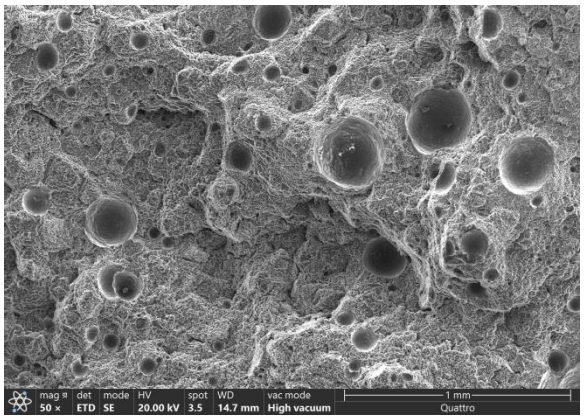
Slika 1. a) Dimenzije epruvete za ispitivanje na zatezanje, b) i c) Epruvete nakon ispitivanja na zatezanje

Rezultati zateznih ispitivanja prikazani su u Tabeli 4. Zavareni spoj legure 2024-T351 (ista legura) pokazao je maksimalnu zateznu čvrstoću od 261 MPa, što predstavlja pad od oko 40% u odnosu na osnovi metal (425 MPa). Lom je nastupio u metalu šava i bio je krtog karaktera, na šta ukazuje mala vrednost izduženja pri lomu (1,2%). Zavareni spoj nesrodnih legura 2024-T351/6082-T6 pokazao je zateznu čvrstoću od 198 MPa, što je smanjenje od oko 36% u odnosu na slabiji od dva osnovna metala (legura 6082-T6, R_m = 310 MPa). Lom je nastao u zoni legure 6082-T6, žilavog karaktera, sa izdužanjem od 7,3%.

Tabela 4. Rezultati zateznih ispitivanja zavarenih spojeva [12, 13]

Zavareni spoj	$R_{p0,2}$ / R_{eh} (MPa)	R_m (MPa)	A (%)	Mesto loma
AA 2024-T351/ AA 2024-T351	209	261	1,2	Metal šava (krto)
AA 2024-T351/ AA 6082-T6	113	198	7,3	Osnovi metal 6082-T6 (žilavo)

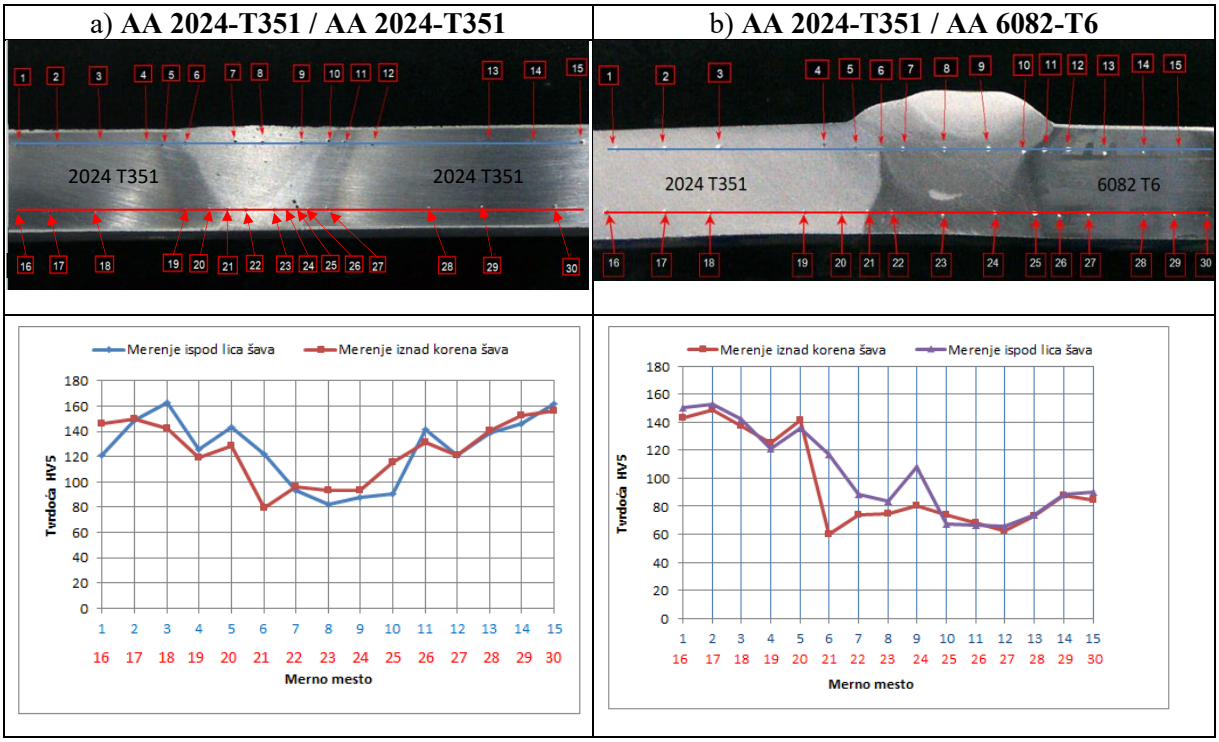
SEM analiza površine loma zateznih epruveta spoja 2024-T351/2024-T351 pokazala je prisustvo krupnih pora i transkristalnih prslina karakterističnih za krti lom u metalu šava (Sl. 2). Pore u metalu šava nastaju tokom očvršćavanja zbog visokog sadržaja vodonika rastvorenog u tečnom aluminijumu, koji se oslobađa pri naglom padu rastvorljivosti tokom solidifikacije [3, 5]. Kod spoja 2024-T351/6082-T6, lom je žilavog karaktera sa izraženim jamičastim (dimple) morfologijama na površini loma, što odgovara mestu loma u osnovnom metalu 6082-T6 unutar oslabljenog ZUT-a [11].



Slika 2. Površina loma zatezne epruvete spoja AA 2024-T351/AA 2024-T351 – prisustvo pora (SEM).

3.2. Raspodela tvrdoće

Merenje tvrdoće prema Vikersu je vršeno na uređaju za merenje tvrdoće Wilson VH1150. Prema standardnoj proceduri po tri merenja tvrdoće su rađena u osnovnom metalu (OM1), tri u zoni uticaja toplote (ZUT1) na strani OM1, tri u metalu šava (MŠ), tri u zoni uticaja toplote (ZUT2) na strani osnovnog metala (OM2) i tri u osnovnom metalu (OM2). Na slici 3a i 3b prikazana su mesta merenja tvrdoće u zavarenom spoju blizu lica šava i blizu korena šava.



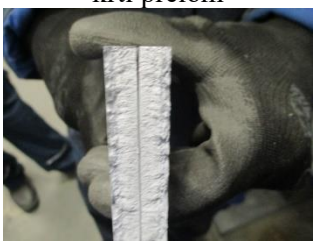
Slika 3. Raspodela tvrdoće kroz sučeoni MIG zavareni spoj legura a) AA 2024-T351/AA 2024-T351 b) AA 2024-T351/AA 6082-T6 [12, 13]

Kod zavarenog spoja istorodnih legura AA 2024-T351/AA 2024-T351, tvrdoća metala šava iznosi oko 85–95 HV, što je znatno niže od tvrdoće osnovnog metala (oko 160 HV). U ZUT-u izmerena je tvrdoća od oko 120–140 HV. Pad tvrdoće u metalu šava iznosi oko 40% u odnosu na osnovi metal. Kod zavarenog spoja raznorodnih legura AA 2024-T351/AA 6082-T6,

tvrdoća metala šava iznosi oko 80 HV, što je manje od oba osnovna metala (150 HV za 2024-T351 i 90 HV za 6082-T6). Tvrdoća ZUT-a prema strani legure 6082-T6 je oko 60 HV, a prema strani 2024-T351 oko 120 HV. Ovakva raspodela tvrdoće posledica je termodinamičkih promena u legiranim fazama tokom zavarivanja.

3.3. Test savijanja

Test savijanja (lice i koren šava) pokazao je mali ugao savijanja do pojave prsline kod oba tipa zavarenog spoja, što ukazuje na ograničena plastična svojstva zavarenih spojeva. Spoj 2024-T351/2024-T351 pokazao je izrazito krti karakter loma pri savijanju. Kod spoja nesrodnih legura 2024-T351/6082-T6, spoj pokazuje nešto veću sposobnost deformacije pri testu lica šava u poređenju sa testom korena šava.

Zavareni spoj	**a) Savijanje oko korena MIG zavarenog spoja**	**b) Savijanje oko lica MIG zavarenog spoja**
AA 2024-T351 / AA 6082-T6		
Ugao savijanja	≈50 °	≈80 °
AA 2024-T351 / AA 2024-T351		Vrlo mali ugao savijanja ≈10° – krti prelom 

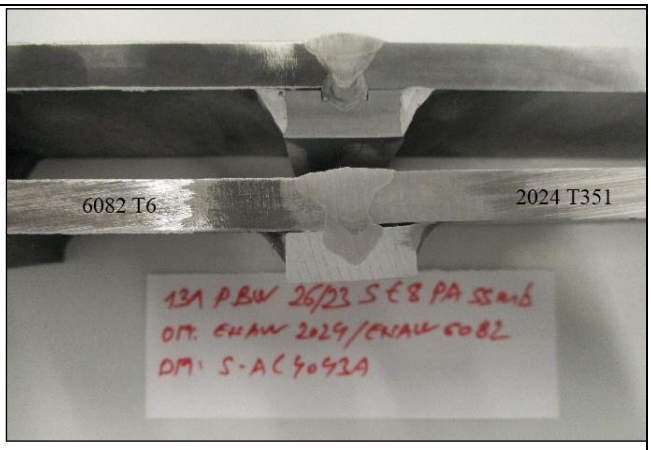
Slika 4. Ispitivanje na savijanje MIG zavarenih spojeva Al legura AA 2024-T351/AA 6082-T6 [12, 13]

3.4. Mikrostrukturna analiza

Pre mikrostrukturne analize pojedinih zona zavarenih spojeva, prikazana je makrostruktura poprečnog preseka oba zavarena spoja. Makrostruktura spoja AA 2024-T351/AA 2024-T351 (Slika 5) i spoja AA 2024-T351/AA 6082-T6 (Slika 6) pokazuje pravilan simetričan oblik šava bez vidljivih defekata kao što su prsline, zajedi i poroznost.

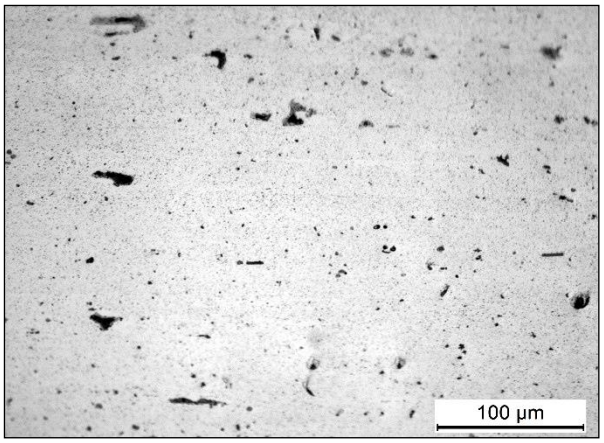


Slika 5. Makrostruktura sučeonog zavarenog spoja AA 2024-T351/AA 2024-T351 [12].

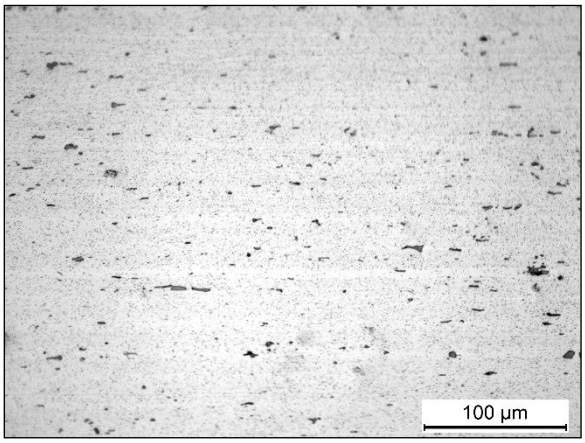


Slika 6. Makrostruktura sučeonog zavarenog spoja AA 2024-T351/AA 6082-T6. [13]

Slike 7 i 8 prikazuju mikrostrukturu osnovnih materijala: aluminijumske legure 2024-T351 i aluminijumske legure 6082-T6. Na uzorku legure 2024-T351 uočena su izdužena zrna u pravcu valjanja.

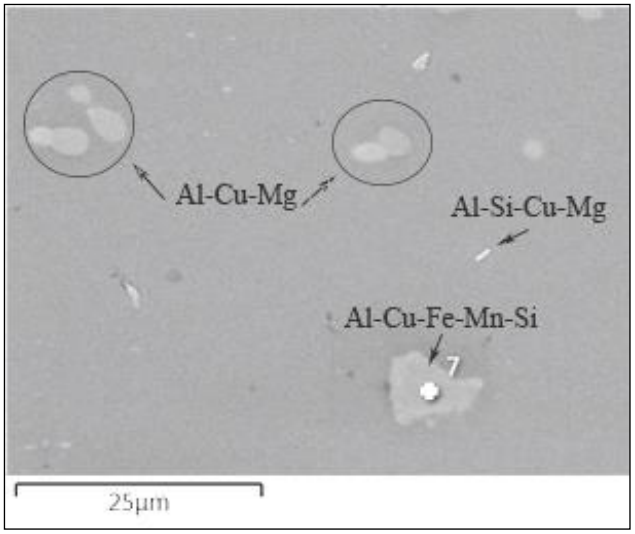


Slika 7. Raspodela čestica druge faze u leguri aluminijuma AA 2024-T351 (LM).

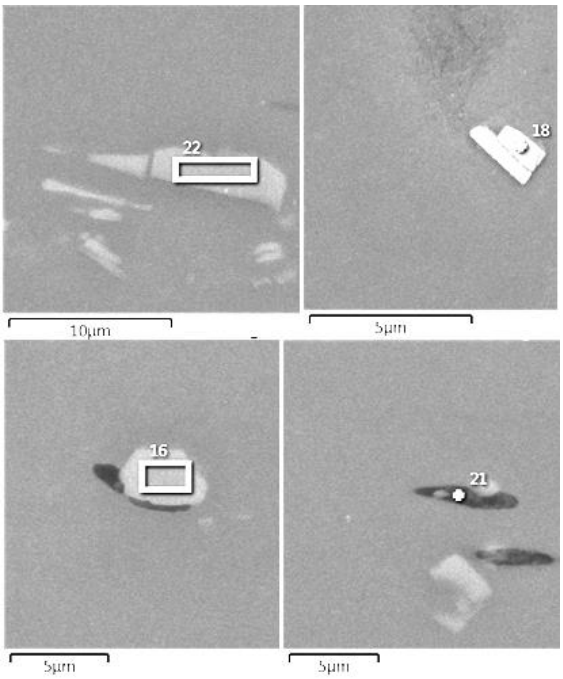


Slika 8. Raspodela čestica druge faze u leguri aluminijuma AA 6082 T6 (LM).

Mikrostruktura osnovnog metala legure AA 2024-T351 karakteriše se izduženim zrnima u pravcu valjanja sa koherentnim precipitatima S′ (Al_2CuMg) i θ′ (Al_2Cu) koji su nosioci precipitacionog ojačavanja u T351 stanju [12]. SEM/EDS analizom identifikovane su krupne intermetalne čestice (IMP) tipa Al–Cu–Fe–Mn (Al_7Cu_2Fe, veličine ~10 µm) i finije čestice Al–Cu–Mg baze, nasumično raspoređene po matrici i granicama zrna (Slika 9). Mikrostruktura osnovnog metala legure AA 6082-T6 sadrži izdužena zrna u pravcu valjanja i intermetalne faze Al–Fe–Mn–Mg–Si–Cr i Al–Mg–Si–Mn (Slika 10), kao i fine precipitate tipa Mg_2Si nastale procesom veštačkog starenja, koji su primarni nosioci ojačavanja ove legure [12].



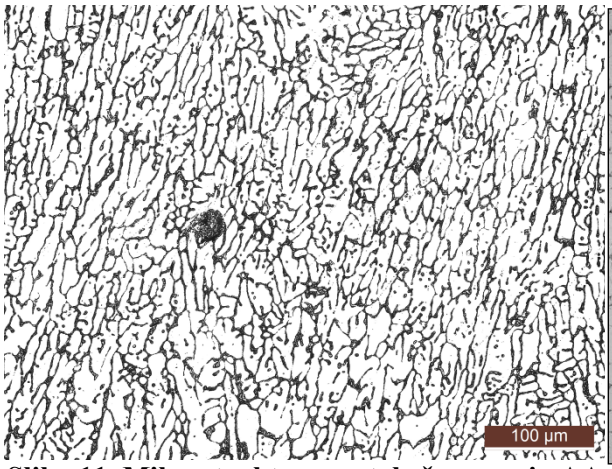
Slika 9. Čestice druge faze u legurama aluminijuma AA 2024-T351 (SEM).



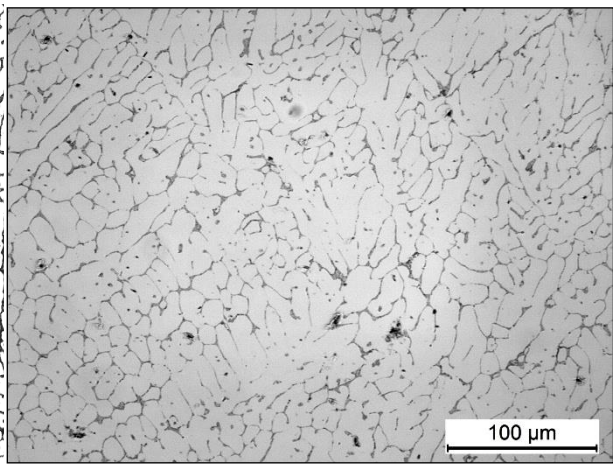
Slika 10. Čestice druge faze u legurama aluminijuma AA 6082-T6. Al-Fe-Mn-Mg-Si-Cr, Al-Si-Mg, Al-Mg-Si-Mn, Al-Mg-Si,. (SEM).

Mikrostruktura metala šava (MS) kod oba zavarena spoja nastala je topljenjem i mešanjem osnovnog i dodatnog materijala (AlSi5 / EN ISO 18273: S Al 4043A), te se značajno razlikuje od mikrostrukture osnovnih metala. Zona topljenja, odnosno oblast metala šava, formirana je popunjavanjem prethodno pripremljenog žleba rastopljenim dodatnim materijalom koji se meša sa rastopljenim osnovnim metalima.

Mikrostrukturu metala šava spoja AA 2024-T351/AA 2024-T351, datu na slici 11, karakteriše livačka dendritska struktura sa zrnima različitih veličina i usmerenošću rasta u pravcu odvođenja toplote od kupke ka hladnijem osnovnom metalu. Slična morfologija uočava se i na slici 12, koja prikazuje metal šava spoja AA 2024-T351/AA 6082-T6 — dendritska struktura je prisutna i u ovom slučaju, s tim što heterogen hemijski sastav metala šava, nastao mešanjem dva osnovna metala različitih legirnih sistema (Al-Cu-Mg i Al-Mg-Si) sa dodatnim materijalom AlSi5, rezultuje nešto izraženijom hemijskom nehomogenošću međudendritskih oblasti u poređenju sa istovrsnim spojem.

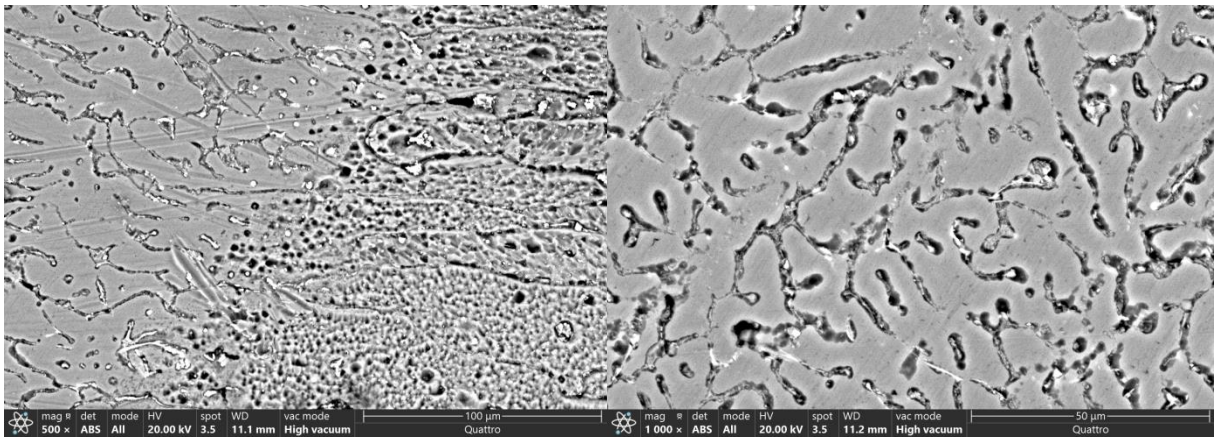


Slika 11. Mikrostruktura metala šava spoja AA 2024-T351/ AA 2024-T351 (LM).



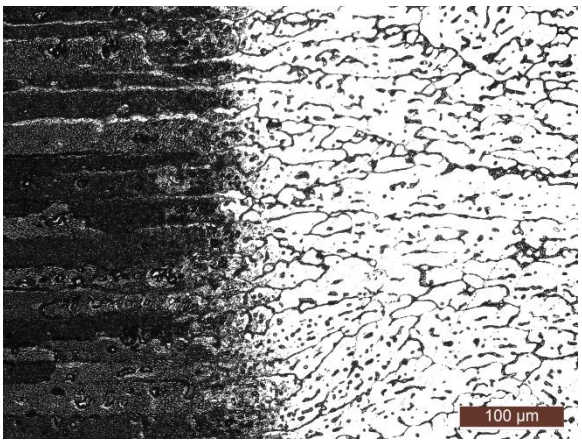
Slika 12. Mikrostruktura metala šava spoja AA 2024-T351/AA 6082-T6 (LM).

Kod sučeonog zavarenog spoja istovrsnih legura AA 2024-T351/AA 2024-T351, u metalu šava su SEM analizom uočene intermetalne čestice tipa $Al_2CuFeMn$ (svetla faza) na granicama i unutar zrna, nasumičnog rasporeda i različitih dimenzija (Slika 13) [6, 12]. Visok sadržaj bakra u leguri 2024-T351 doprinosi nastanku pomenutih krupnih IMP tokom skrućivanja metala šava, koje deluju kao mesta inicijacije prslina i uzrokuju krt karakter loma zavarenog spoja [5]. Dodatni materijal AlSi5 unosi povišen udeo Si (~5 mas. %) koji snižava tačku topljenja i poboljšava tečnost kupke, čime se smanjuje osetljivost na tople prsline, ali istovremeno doprinosi krtosti metala šava [10, 12].

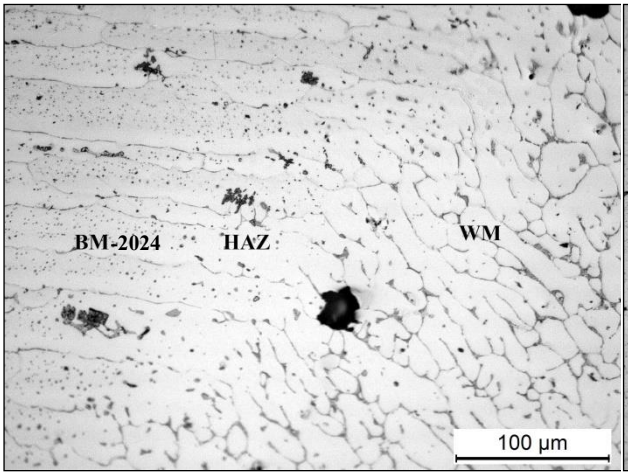


Slika 13. Mikrostruktura metala šava spoja AA 2024-T351/ AA 2024-T351 (SEM).

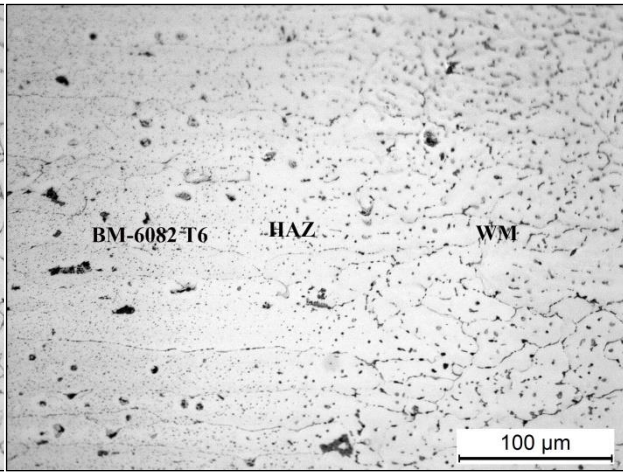
U zoni uticaja toplote (ZUT) spoja 2024-T351/2024-T351 uočava se niža gustina precipitata u poređenju sa osnovnim metalom (Slika 14). Toplotni ciklus zavarivanja uzrokuje rastvaranje i grubljenje ojačavajućih precipitata S′/θ′ u ZUT-u, što rezultuje padom tvrdoće i čvrstoće u toj zoni [5, 8]. Granica stapanja prema leguri 2024-T351 karakteriše se prisustvom IMP precipitovanih na granicama zrna u kolumnarnoj orijentaciji, dok su u ZUT-u prisutne krupne IMP na granicama zrna [6].



Slika 14. Zavareni spoj 2024-T351/2024-T351 - Mikrostruktura Zone uticaja toplote između metala šava i osnove AA 2024-T351 (LM).



Slika 15. Zavareni spoj AA 2024-T351/AA 6082-T6 - Mikrostruktura Zone uticaja toplote između metala šava i osnovnog metala AA 2024-T351 (LM).



Slika 16. Zavareni spoj AA 2024-T351/AA 6082-T6 - Mikrostruktura Zone uticaja toplote između metala šava i osnovnog metala AA 6082-T6 (LM).

Kod sučeonog zavarenog spoja nesrodnih legura AA 2024-T351/AA 6082-T6, mikrostruktura metala šava nastaje mešanjem oba osnovna metala i dodatnog materijala AlSi5, što rezultuje heterogenim hemijskim sastavom metala šava sa povišenim sadržajem Si. Mikrostruktura je dendritskog karaktera sa IMP raspoređenim na granicama i unutar zrna [11]. ZUT prema strani legure 6082-T6 pokazuje asimetričan karakter u odnosu na ZUT prema strani 2024-T351. Na strani legure 6082-T6, u ZUT-u su prisutni krupni precipitati Mg-Si tipa na granicama i unutar zrna globularnog oblika (Slika 16), dok se simultano zapaža niža gustina finih precipitata β″ (Mg_2Si faze) koji su nosioci ojačavanja u T6 stanju ove legure [14, 15]. Mehanizam omekšavanja ZUT-a prema leguri 6082-T6 leži u gubitku koherentnih β″ precipitata usled grubljenja i rastvaranja tokom termičkog ciklusa zavarivanja, što direktno korelira sa padom tvrdoće na ~60 HV u ZUT-u prema ovoj strani spoja [14]. ZUT prema strani legure 2024-T351 pokazuje nižu gustinu finih precipitata Al-Cu i Al-Cu-Mg baze, a tvrdoća u ovoj zoni iznosi oko 120 HV (Slika 15) [11].

Mikrostrukturna analiza oba zavarena spoja potvrđuje da MIG postupak zavarivanja izaziva značajne promene u rasporedu i morfologiji precipitata kako u metalu šava, tako i u ZUT-u, koje su direktan uzrok smanjenja mehaničkih svojstava. Precipitaciono ojačanje, koje je primarni mehanizam čvrstoće u legurama AA 2024-T351 (precipitati S′/θ′ Al-Cu i Al-Cu-Mg baze) i AA 6082-T6 (precipitati β″/β′ Mg-Si baze), ozbiljno je narušeno toplotnim ciklusom zavarivanja [5, 8, 14]. Livačka dendritska struktura metala šava sa krupnim IMP i poroznošću predstavlja mikrostrukturnu osnovu za povišenu krtost i smanjena mehanička svojstva zavarenih spojeva aluminijumskih legura serije 2XXX i kombinacije 2XXX/6XXX zavarenih MIG postupkom.

4. DISKUSIJA

Komparativna analiza mehaničkih svojstava zavarenih spojeva iste legure 2024-T351 i nesrodnih legura 2024-T351/6082-T6, zavarenih MIG procesom, ukazuje na sledeće ključne razlike i zajedničke karakteristike:

Pad čvrstoće zavarenog spoja prisutan je kod oba tipa spoja. Kod spoja iste legure 2024-T351/2024-T351 iznosi oko 40%, dok kod spoja nesrodnih legura 2024-T351/6082-T6 iznosi oko 36% u odnosu na slabiji osnovni metal. Ova razlika je posledica toga što se kod nesrodnog spoja za referencu uzima legura 6082-T6 koja je znatno niže čvrstoće od 2024-T351.

Mesto loma razlikuje se između dva tipa spoja. Krto lomljenje u metalu šava karakteristično je za spoj 2024-T351/2024-T351 i ukazuje na prisustvo poroznosti i krupnih intermetalnih čestica u metalu šava. Kod nesrodnog spoja, lom nastaje u zoni legure 6082-T6, žilavog karaktera, što znači da je metal šava, zahvaljujući dodatnom materijalu AlSi5, osetno čvršći od oslabljene ZUT legure 6082-T6.

Raspodela tvrdoće kod oba tipa spoja pokazuje najizraženiji pad tvrdoće u metalu šava, što je posledica otapanja ojačavajućih precipitata tokom termalnog ciklusa zavarivanja i njihovog grubog prekristalisanja. Kod legura serije 2XXX, precipitati Al2Cu i Al-Cu-Mg baze igraju ključnu ulogu u ojačavanju; njihovim otapanjem i pregrevanjem dolazi do pada tvrdoće. Kod legura serije 6XXX (6082-T6), precipitati Mg-Si tipa podložni su sličnim procesima u ZUT-u. Dodati materijal AlSi5 (4043A) povoljno utiče na smanjenje osetljivosti metala šava na vrele prsline, zahvaljujući visokom sadržaju Si koji snižava tačku topljenja i poboljšava tečnost rastopa. Ipak, visok Si sadržaj doprinosi krtosti metala šava, što se ogleda u lošim rezultatima ispitivanja savijanjem.

Zajednički zaključak za oba tipa spoja jeste da MIG zavarivanje legura serije 2XXX i kombinacija 2XXX/6XXX dovodi do degradacije mehaničkih svojstava, posebno žilavosti i plastičnosti. Za zahtevne primene u avio i transportnoj industriji preporučuje se razmatranje alternativnih postupaka spajanja, kao što je zavarivanje trenjem mešanjem (FSW).

5. ZAKLJUČAK

Na osnovu komparativne analize MIG zavarenih spojeva aluminijumskih legura 2024-T351/2024-T351 i 2024-T351/6082-T6 mogu se izvesti sledeći zaključci:

1. Zatezna čvrstoća zavarenog spoja 2024-T351/2024-T351 iznosi 261 MPa, što predstavlja pad od oko 40% u odnosu na osnovi metal (425 MPa). Lom je nastao u metalu šava, krtog karaktera.
2. Zatezna čvrstoća zavarenog spoja 2024-T351/6082-T6 iznosi 198 MPa, što je pad od oko 36% u odnosu na slabiji osnovi metal 6082-T6 (310 MPa). Lom je nastao u zoni osnovnog metala 6082-T6, žilavog karaktera.
3. Tvrdoća metala šava kod oba spoja je značajno niža od tvrdoće osnovnih metala: oko 40% niža kod spoja 2024-T351/2024-T351 i oko 55% niža u odnosu na tvrđi osnovi metal 2024-T351 kod nesrodnog spoja.
4. Rezultati testa savijanja ukazuju na loša tehnološka svojstva zavarenih spojeva – mali ugao savijanja do pojave prsline zabeležen je kod oba tipa spoja.
5. Mikrostrukturna analiza pokazala je da MIG postupak zavarivanja uzrokuje značajne promene u rasporedu i morfologiji precipitata u metalu šava i zoni uticaja toplote (ZUT) kod oba zavarena spoja. Livačka dendritska struktura metala šava sa krupnim intermetalnim česticama (IMP) tipa Al–Cu–Fe–Mn i poroznošću predstavlja mikrostrukturnu osnovu za povišenu krtost i smanjena mehanička svojstva spoja 2024-T351/2024-T351.
6. Precipitaciono ojačanje, kao primarni mehanizam čvrstoće legure AA 2024-T351 (precipitati S′/θ′ Al-Cu i Al-Cu-Mg baze) i legure AA 6082-T6 (precipitati β″/β′ Mg-Si baze), ozbiljno je narušeno toplotnim ciklusom zavarivanja. Asimetrični ZUT spoja 2024-T351/6082-T6, sa padom tvrdoće na ~60 HV prema strani 6082-T6, direktna je posledica gubitka koherentnih β″ precipitata, što objašnjava lokaciju loma u osnovnom metalu 6082-T6.
7. Za postizanje boljih mehaničkih svojstava zavarenih spojeva preporučuje se optimizacija parametara MIG zavarivanja i razmatranje alternativnih procesa zavarivanja (FSW) koji ne zahtevaju topljenje materijala.

ZAHVALNICA

Ovaj istraživački rad finansijski je podržalo Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije (Ugovor br. 451-03-33/2026-03/200109).

LITERATURA

[1] Sharma, V., Živić, F., Adamović, D., Ljušić, P., Kotorčević, N., Slavković, V., Grujović, N. (2023). Multi-criteria decision making methods for selection of lightweight material for railway vehicles. *Materials*, 16(1), 368. https://doi.org/10.3390/ma16010368

[2] Cascino, A., Meli, E., Rindi, A. (2023). A strategy for lightweight designing of a railway vehicle car body including composite material and dynamic structural optimization. *Railway Engineering Science*, 31, 340–350. https://doi.org/10.1007/s40534-023-00312-6

[3] Xiaoguang, S., Xiaohui, H., Chaofang, D., Xiaogang, L. (2021). Applications of Aluminum Alloys in Rail Transportation. U: *Aluminium Alloys and Composites*. IntechOpen, Chapter 5. DOI: 10.5772/intechopen.96442; https://www.intechopen.com/chapters/75650

[4] Heinz, A., Haszler, A., Keidel, C., Moldenhauer, S., Benedictus, R., & Miller, W.S. (2000). Recent development in aluminium alloys for aerospace applications. *Materials Science and Engineering A*, 280(1), 102–107. https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00674-7

[5] Novakova, I., Moravec, J., Novak, J., Solfronk, P. (2021). Influence of preheating temperature on changes in properties in the HAZ during multipass MIG welding of alloy AW 6061 and possibilities of their restoration. *Metals*, 11(12), 1902. https://doi.org/10.3390/met11121902

[6] Milčić, M., Klobčar, D., Milčić, D., Zdravković, N., Đurić, A., Vuherer, T. (2024). Comparison between Mechanical Properties and Joint Performance of AA 2024-T351 Aluminum Alloy Welded by Friction Stir Welding, Metal Inert Gas and Tungsten Inert Gas Processes. *Materials*, *17*(13), 3336. https://doi.org/10.3390/ma17133336

[7] Missori, S., Sili, A. (2000). Mechanical behavior of 6082-T6 aluminum alloy welds. *Metallurgical Science and Technology*, 18(1), 12–18. https://www.fracturae.com/index.php/MST/article/view/1057

[8] Bunaziv, I., Tomstad, A.J., Kvam-Langelandsvik, G., Eriksson, M. (2025). A through-process modelling approach of aluminium heat-affected zone softening and weld joint performance. *Int J Adv Manuf Technol* 137, 4011–4022. https://doi.org/10.1007/s00170-025-15395-0

[9] Machfuroh, T., Witono, K., Agustriyana, L., Rosady., S.D.N., Puspitasari, E., Emzain, .F. (2026). Mechanical performance and haz softening behavior of mig-welded AA6061 aluminium under varying welding parameters. *Journal of Engineering and Applied Science* 73, 71. https://doi.org/10.1186/s44147-026-00939-2

[10] Naing, T.H., Muangjunburee, P. (2022). Metallurgical and mechanical characterization of MIG welded repair joints for 6082-T6 aluminum alloy with ER 4043 and ER 5356. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 75, 1583–1593. https://doi.org/10.1007/s12666-022-02523-7

[11] 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, Proceedings OTEH 2022, Beograd, 2022.

[12] Milčić, D., Milčić, M., Klobčar, D., Đurić, A., Zdravković, N.: Structure and mechanical properties of MIG welded butt-joints of aluminum alloy 2024 T351, DEMI 2023, Banja Luka, 2023.

[13] Milčić, D., Milčić, M., Đurić, A., M., Klobčar, D., Zdravković, N., Cvetković, P.R., Grabulov, V. (2024). 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. *Zavarivanje i zavarene konstrukcije*, 1/2024, 31-40. https://doi.org/10.46793/Zavarivanje24.S2.1M

[14] Yang, S., Yang, X., Lu, X., Li, M.V., Zuo, H., Wang, Y.,: Strength calculation and microstructure characterization of HAZ softening area in 6082-T6 aluminum alloy CMT welded joints, Mater Today Commun, 37 (2023), Article 107077

[15] Cui, S., Tian, F., Ma, R., Yu, Y., & Xu, L. (2023). Study on the Morphology, Microstructure, and Properties of 6082-T6 Aluminum Alloy Joints in MIG Welding. *Metals*, *13*(7), 1245. https://doi.org/10.3390/met13071245