



Igor Radisavljević¹, Aleksandar Živković², Nenad Radović³, Vencislav Grabulov⁴

MECHANICAL AND STRUCTURAL PROPERTIES OF FRICTION STIR WELD OF DISSIMILAR ALUMINUM ALLOYS

MEHANIČKA I STRUKTURNA SVOJSTVA SPOJEVA OD RAZNORODNIH ALUMINIJUMSKIH LEGURA ZAVARENIH FSW POSTUPKOM

Originalni naučni rad / Original scientific paper

Rad primljen / Paper received:

Januar 2017.

Rad je u izvornom obliku objavljen u Zborniku sa savetovanja „ZAVARIVANJE 2016“ održanog na Srebrnom jezeru 14-17. Septembra 2016

Ključne reči: zavarivanje trenjem alatom, zavareni spoj, legura AA2024, legura AA5083.

Rezime:

U radu su predstavljeni rezultati strukturnih i mehaničkih ispitivanja sučeonih spojeva raznorodnih aluminijumskih legura AlCu_{4,5}Mg (AA2024) i AlMg_{4,5}Mn (AA5083) zavarenih postupkom FSW. Primenom optimizovanog alata za zavarivanje, spojene su ploče debljine 6 mm. Međusobni položaj ploča u spoju je variran tako da je u prvom slučaju ploča od AA2024 pozicionirana na strani napredovanja a ploča od AA5083 na povratnoj strani spoja. U drugom slučaju položaj ploča je bio obrnut. Korišćeni su sledeći parametri zavarivanja: brzina rotacije alata nije menjana i iznosila je 750 obr/min a brzina zavarivanja iznosila je 73 i 93 mm/min. Dobijeni su spojevi bez prisustva grešaka i sa glatkom odnosno prihvatljivo ravnom površinom spoja. Analiziran je uticaj parametra zavarivanja na dobijenu strukturu i mehanička svojstva spoja. Oblik grumena i u njemu prisutnih koncentričnih krugova, zavisi od brzine zavarivanja i položaja ploča u spoju. Do loma uvek dolazi na strani spoja gde je pozicionirana ploča od legure AA5083. Karakteristično je da se lom uvek dešava na rastojanju od oko 21 mm od centra spoja.

UVOD

Postupak zavarivanja trenjem alatom (FSW) obezbeđuje spajanje metala bez topljenja i korišćenja dodatnog materijala, kao što je šematski prikazano na slici 1. Zavareni spoj se dobija dejstvom alata na ploče; trenje dovodi do zagrevanja ploča a alat vrši mešanje i spajanje dve ploče. Toplota se generiše na kontaktnoj površini alata i ploča usled trenja zbog rotacije i translacije

Adresa autora / Author's address:

¹Vojnotehnički institut, Beograd,

E-mail: igor.radisavljevic@vti.vs.rs

²GOŠA FOM, Smederevska Palanka,

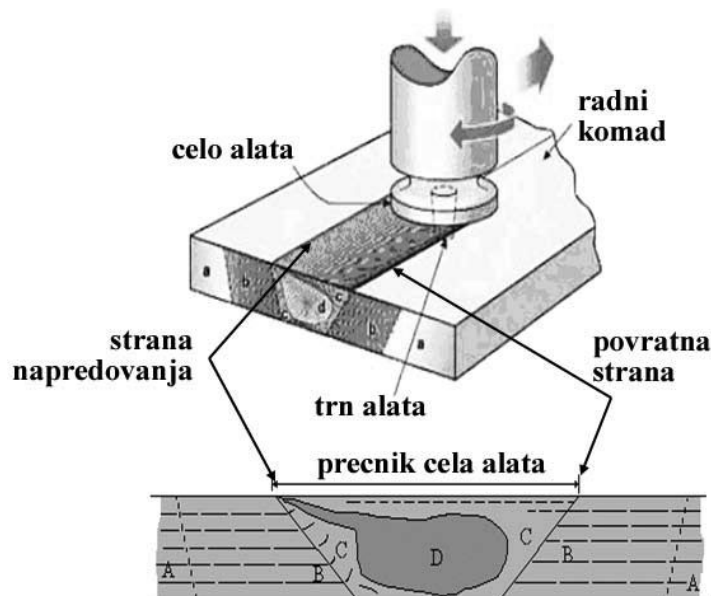
³Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, ⁴Institut za ispitivanje materijala, Beograd

Key words: FSW, alloy AA2024, alloy AA5083, welded joint, dissimilar alloys.

Abstract:

In this work, the structural and mechanical properties of friction stir welded dissimilar butt joints of AA2024-T351 to AA5083-H112 aluminum alloys were evaluated. Plates of 6 mm thick were friction stir welded with optimized tool. In the first case, plate of AA2024 was positioned on the advancing and plate of AA5083 was on the retreating side of the weld. In second case, position of the plate was opposite. Specimens were welded using rotation rate of 750 rpm and welding speed of 73 and 93 mm/min. Specimens were defect free, with good or acceptable weld surface. The effects of rotation and lateral speed of the welding tool were related to structural features and mechanical properties. The structural appearances of concentric rings in the nugget zone were controlled by tool speed and plate position. Structural analysis of the joint cross-section, revealed the distinct lamellar bands. The joints consistently failed on the AA5083 aluminum alloy plate. Failures were observed through the heat-affected zone at distance of approximately 21 mm from weld center.

alata, a spajanje se vrši usled dejstva trna alata. U strukturi zavarenog spoja uočava se nekoliko različitih oblasti (Slika 1): zona uticaja toplote (ZUT), zona termomehaničkog uticaja (ZTMU), zona grumena i osnovni metal. Centralna zona (grumen), u kojoj se mogu identifikovati linije tečenja materijala, je zona u kojoj je najveća plastična deformacija.



Slika 1. Šematski prikaz postupka zavarivanja trenjem alatom i poprečnog preseka zavarenog spoja: (A) – osnovni metal, (B) – ZUT, (C) – ZTMU, (D) – grumen.

Primenom ovog postupka dobijaju se zavareni spojevi sa zahtevanim nivoima čvrstoće i plastičnosti, uključujući i sisteme legiranja za koje je dokazano da su teško zavarljivi uobičajenim postupcima zavarivanja topljenjem [1, 2].

Sa druge strane, zavarivanje Al legura konvencionalnim postupcima zavarivanja topljenjem može da bude problematično usled obrazovanja sekundarnih krutih faza, pojave prslina tokom očvršćavanja, značajne deformacije i prisustva zaostalih napona [1, 3].

Aluminijumske legure serija 2xxx Al-Cu i 5xxx Al-Mg imaju široku primenu i jedne su od najčešće korišćenih legura u raznim granama industrije. Sa stanovišta zavarivanja konvencionalnim postupcima, legure serije 2xxx se smatraju „nezavarivim“ dok su legure serije 5xxx lako zavarljive. Međutim, veliki broj istraživanja je pokazao da je i tzv „nezavarljive“ legure moguće uspešno zavariti FSW postupkom zavarivanja. Kako su dosadašnja istraživanja pokazala da se FSW postupkom uspešno spajaju slične aluminijumske legure nametnuo se interes za ispitivanje mogućnosti međusobnog spajanja raznorodnih legura [4-15].

Cilj ovog rada je bio da se ispita mogućnost spajanja raznorodnih aluminijumskih legura AlCu4,5Mg i AlMg4,5Mn koje pripadaju različitim

sistemima legiranja (2xxx i 5 xxx, respektivno) i utvrdi kvalitet dobijenih spojeva.

2. EKSPERIMENT

2.1. Materijal

Međusobno su zavarene dve raznorodne aluminijumske legure iz dva različita sistema legiranja 2xxx i 5xxx. Zavarene su legure:

- AlCu4,5Mg (AA2024) u stanju T351, koja termički ojačava (termički je obradiva) a sa aspekta zavarljivosti spada u grupu teško zavarljivih/nezavarljivih legura,
- AlMg4,5Mn (AA5083) u stanju H112, koja termički ne ojačava (termički je neobradiva) a sa aspekta zavarljivosti se svrstava u grupu dobro/lako zavarljivih legura.

Hemijski sastav i mehanička svojstva zavarenih legura dati su u Tabeli 1. Hemijski sastav je određen na uređaju PHILIPS PW-1404 metodom rendgenske fluorescentne spektrometrije. Mehanička svojstva su određena na hidrauličnoj kitalici AMSLER SZBDA-599, testom jednoosnog zatezanja a tvrdoća je izmerena metodom Vickers HV10 na uređaju za ispitivanje tvrdoće WOLPERT.

legura	Cu	Mg	Mn	Fe	Zn	Rp _{0,2} (MPa)	Rm (MPa)	A ₅ (%)	HV10
	(mas %)								
AlCu4,5Mg	4,70	1,56	0,65	0,17	0,11	370	481	17,9	145
AlMg4,5Mn	0,05	5,2	0,34	0,37	0,05	165	261	9,5	146

Tabela 1. Hemijski sastav i mehanička svojstva korišćenih legura



2.2. Zavarivanje

Zavarivanje je izvedeno na alatnoj glodalici prilagođenoj potrebama procesa zavarivanja trenjem alatom. Za zavarivanje je korišćen alat izrađen od čelika 56 NiCrMoV7 (Č.5742) sa profilisanom radnom površinom i konusnim trnom sa urezanim zavojnicom (Slika 2).

Pločasti uzorci dimenzija 300x65x6 mm su zavareni sučeono. Ukupno su izrađena 4 zavarena spoja pri čemu je dužina svakog iznosila oko 280 mm. Međusobni položaj ploča, u odnosu na pravac zavarivanja, je variran tako da se primenom istih

parametra zavarivanja dobiju dva spoja koja se međusobno razlikuju po položaju ploča u njemu. Odnosno, u jednom slučaju, ploča od AlCu4,5Mg se nalazi na strani napredovanja alata a ploča od AlMg4,5Mn na povratnoj strani. U drugom slučaju raspored ploča je obrnut (Tabela 2). Parametri zavarivanja, brzina rotacije alata (V_{rot}) i brzina zavarivanja (V_{zav}) iznosili su 750 obr/min odnosno 73 i 93 mm/min. Odnos brzine rotacije i brzine zavarivanja iznosio je 10,27 i 8,06, respektivno. Ugao nagiba alata u odnosu na vertikalu je držan konstantnim i iznosio je 1°



Slika 2. Alat oznake 310 korišćen za zavarivanje.

spoj	(V_{rot}) obr/min	(V_{zav}) mm/min	V_{rot} / V_{zav}	položaj ploča u spoju
A1	750	73	10,27	AlCu4,5Mg na strani napredovanja
A2				AlMg4,5 na povratnoj strani
B1	750	93	8,06	AlMg4,5 na strani napredovanja
B2				AlCu4,5Mg na povratnoj strani

Tabela 2. Oznake zavarenih spojeva i primenjeni parametri zavarivanja

2.3. Ispitivanja zavarenih spojeva

Zavareni spojevi su ispitani metodama sa i bez razaranja. U cilju otkrivanja površinskih i/ili unutrašnjih grešaka, zavareni spojevi su podvrgnuti vizuelnom pregledu i ultrazvučnoj kontroli. Dalja

ispitivanja su obuhvatala određivanje električne provodljivosti, analizu makrostrukture optičkom mikroskopijom i ispitivanja jednoosnim zatezanjem. Kompletna procedura ispitivanja svakog pojedinačnog spoja data je u Tabeli 3.

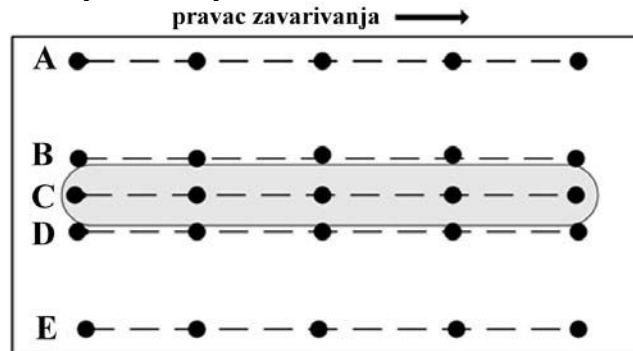
ispitivanja bez razaranja	korak 1	vizuelni pregled
	korak 2	ultrazvučna kontrola
	korak 3	određivanje električne provodljivosti
ispitivanja sa razaranjem	korak 4	analiza makrostrukture
	korak 5	ispitivanje zatezanjem

Tabela 3. Metodologija ispitivanja zavarenih spojeva



Za vizuelni pregled korišćena je lupa. Ultrazvučna kontrola je izvršena kosom sondom MSEB 4MHz na uređaju za ispitivanje ultrazvukom KRAUTKRAMER USM-22. Za određivanje električne provodljivosti, korišćen je uređaj FORESTER SIGMATEST D2.086. Električna provodljivost je merena na čeonj i korenoj strani

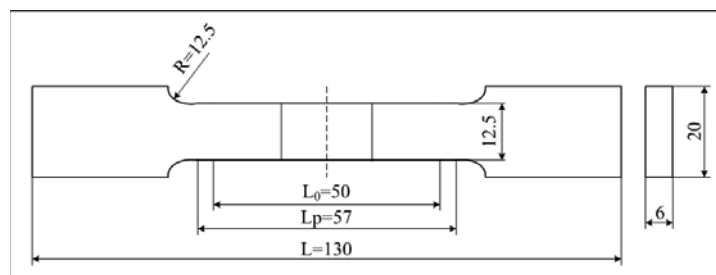
spoja na po 5 mernih mesta duž linija merenja prikazanih na slici 3 a postavljenih tako da su pokrivene oblasti osnovnog metala (linije A i E), ZTMU/ZUT (linije B i D) i zavarenog spoja (linija C). Vrednost električne provodljivosti je određivana u jedinicama %IACS.



Slika 3. Šematski prikaz mernih mesta za određivanje električne provodljivost

Uzorci za makrostrukturnu analizu poprečnog preseka spoja ispitivani su na stereo metalografskom mikroskopu LEICA 205A sa integrisanim računarskim sistemom i softverom za akviziciju i obradu slike. Priprema uzoraka se sastojala od klasičnih postupaka mašinske obrade, mehaničkog brušenja brusnim papirima i poliranja dijamantskim pastama. Razvoj makrostrukture obezbeđen je potapanjem i držanjem uzorka u Tuckers-ovom reagensu (45ml HCl, 15ml HNO₃,

15ml HF, 25ml H₂O), ispiranjem vodom i alkoholom i sušenjem u struji toplog vazduha. Zatezna svojstva zavarenog spoja kao celine i mesto preloma, određeni su na epruvetama izrađenim prema standardu ASTM E-8M (Slika 4). Epruvete su izrađene poprečno na zavareni spoj i u svom mernom delu obuhvataju OM, ZUT, ZTMU i grumen. Zatezna ispitivanja su urađena na hidrauličnoj kitalici SHIMADZU SERVOPULSER.



Slika 4. Šematski prikaz epruvete za ispitivanje zatezanjem

REZULTATI I DISKUSIJA

Vizuelnim pregledom nije uočeno prisustvo površinskih grešaka. Izgled lica zavarenih spojeva prikazan je slikom 5. Dobijeni su spojevi sa glatkom/relativno glatkom površinom spoja. Ultrazvučnom kontrolom nije registrovano prisustvo zapreminskih grešaka tipa neprovara niti je uočena pojava tzv tunela na strani napredovanja kao greške karakteristične za FSW postupak zavarivanja [16-20].

Vrednosti električne provodljivosti u samom zavarenom spoju su ujednačene i iznose u proseku oko 31,48 %IACS na licu spoja odnosno oko 32,5 %IACS za korenu stranu spoja. Navedene

vrednosti su bliske vrednosti osnovnog materijala legure AlMg4,5 koja iznosi 32,68 %IACS i nešto više od vrednosti 29,52 %IACS za leguru AlCu4,5Mg. Na korenoj strani spoja, kod ploča od AlCu4,5Mg, u ZTMU/ZUT registrovano je značajno povećanje vrednosti električne provodljivosti (oko 38 %IACS). Kod legure AA2024, gledano od OM ka centru spoja, uočava se gradijent vrednosti električne provodljivost dok je za leguru AA5083 gotovo konstantna. Promena primenjenih parametara zavarivanja i pozicije ploča u spoju, nemaju uticaja na vrednosti električne provodljivosti.



spoj		linija A (osnovni metal)	linija B (ZTMU/ZUT)	linija C (spoj)	linija D (ZTMU/ZUT)	linija D (osnovni metal)
A1	lice	29,52	31,83	32,03	32,65	32,68
	koren		38,58	34,27	32,25	
A2	lice	32,68	32,61	31,41	36,05	29,52
	koren		32,26	32,01	38,25	
B1	lice	29,52	31,56	31,70	32,88	32,68
	koren		38,07	32,53	32,54	
B2	lice	32,68	32,83	30,79	33,13	29,52
	koren		32,64	32,50	38,13	

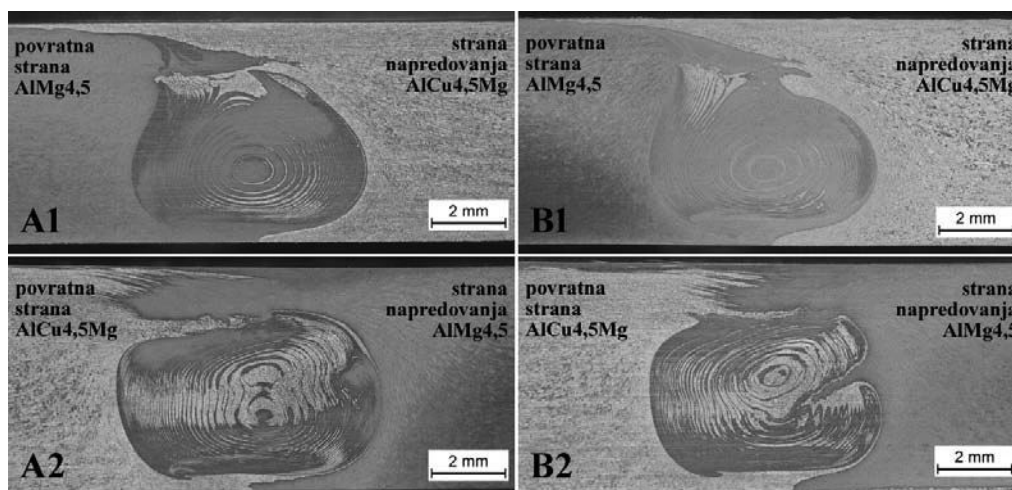
Tabela 4. Srednje vrednosti električne provodljivosti, %IACS



Slika 5. Zavareni spojevi – izgled lica spoja

Makrostruktura zavarenih spojeva prikazana je na slici 6. Ni kod jednog uzorka nije uočeno prisustvo poroznosti ili neprovara kao ni tunela na strani napredovanja. Jasno se razlikuju oblasti ZTMU, ZUT-a i zone intezivnog mešanja tzv grumena. U grumenu se jasno uočava postojanje karakterističnih koncentričnih prstenova, koji predstavljaju naizmeničnu mešavinu lamela

osnovnih materijala [21]. Oblik grumena i u njemu prisutnih koncentričnih krugova, zavisi od brzine zavarivanja i položaja ploča u spoju. U zavisnosti od položaja ploča u spoju, na licu spoja je prisutan materijala ploče koja je bila pozicionirana na strani napredovanja a što je posledica odvijanja procesa zavarivanja tj. rotacije alata.



Slika 6. Makrostrukture poprečnog preseka zavarenih spojeva

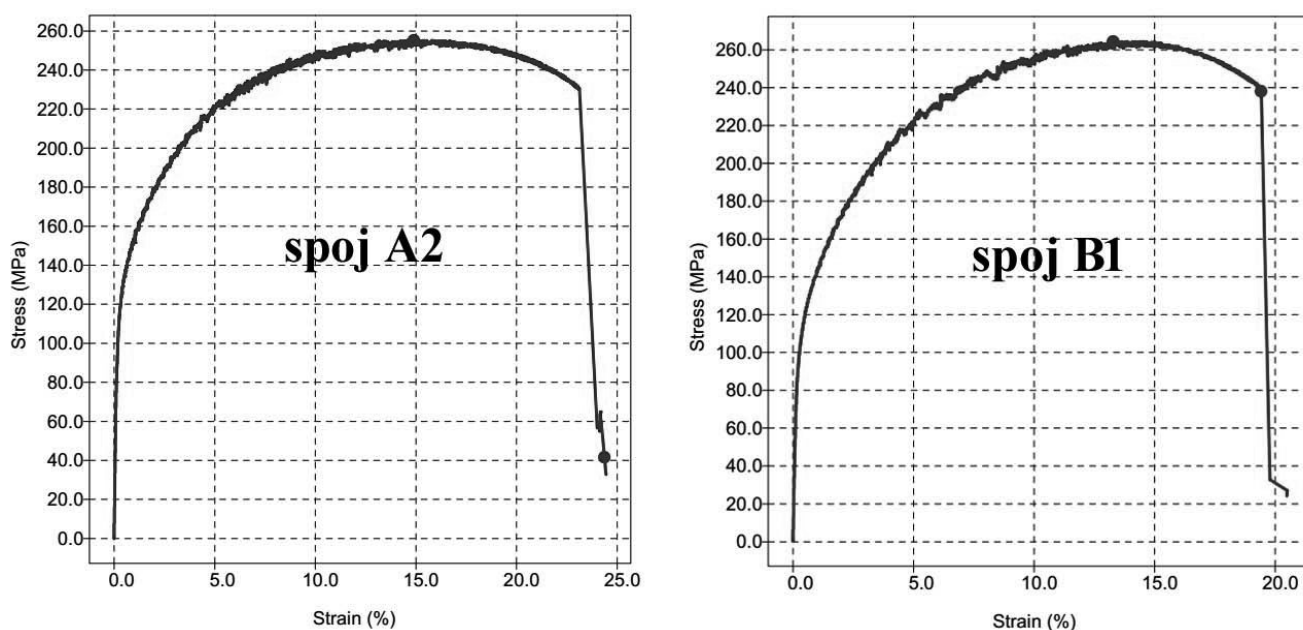


Srednje vrednosti ispitivanja zateznih svojstava zavarenih spojeva date su u Tabeli 5 a izgled tipičnih dijagrama napon-deformacija na slici 7. Nezavisno od primenjenih parametara zavarivanja i pozicija ploča u spoju, do loma uvek dolazi u oblasti ZUT-a legure AA5083 na gotovo identičnom rastojanju od 21 mm od centra spoja. Karakteristično mesto i izgled preloma prikazani su slikom 8. Vrednosti zatezne čvrstoće Rm su nešto niže od čvrstoće OM u kome je došlo do loma

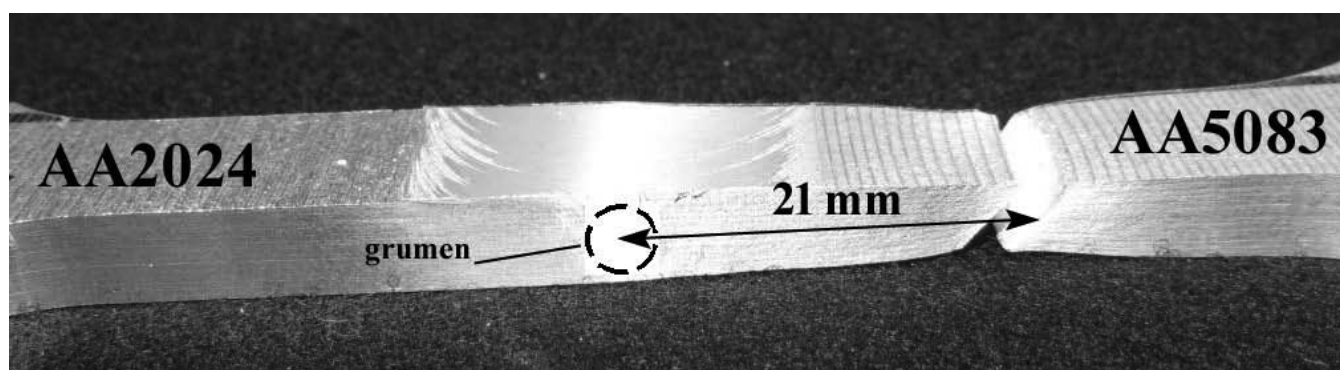
(AA5083). Sa povećanjem količine unete toplote smanjuje se vrednost zatezne čvrstoće. U prilog ovome ide činjenica da je Rm spojeva A1 i A2 nešto niža od spojeva B1 i B2. Količina unete toplote je iskazana preko pseudo toplotnog indeksa koji predstavlja odnos V_{rot}^2 / V_{zav} . Vrednosti izduženja su veće, što se tumači uticajem koji redefinisana struktura materijala u samom spoju ima na duktilnost.

spoj	parametri zavarivanja		količina unete toplote (vrednost pseudo toplotnog indeksa)	Rm (MPa)	A ₅ (%)	mesto loma
	V _{rot} (obr/min)	V _{zav} (mm/min)				
A1	750	73	7705	254	23	ZUT - AlMg4,5Mn
A2				256	21	
B1	93	6048	263	20		
B2			262	22		

Tabela 5. Mehanička svojstva



Slika 7. Tipičan izgled dijagrama zatezanja.



Slika 8. Karakterističan izgled i mesto preloma.



ZAKLJUČAK

Za primenjene parametre zavarivanja dobijeni su spojevi bez površinskih i zapreminskih grešaka, dobrih mehaničkih svojstava i prihvatljivog izgleda lica spoja.

Promena pozicija raznorodnih Al legura u spoju, nema vidljivog uticaja na proces formiranja spoja i njegova svojstva.

Malo povećanje brzine zavarivanja pri istoj brzini rotacije, prouzrokuje neznatno povećanje zatezne čvrstoće.

Kritična oblast u kojoj dolazi uvek do loma locirana je ZUT-u na strani legure AA5083 na rastojanju od 21 mm od centra spoja. Njen položaj ne zavisi od primenjenih parametara zavarivanja niti pozicije ploča u spoju.

Primenom FSW postupka međusobno su uspešno zavarene raznorodne legure serija 2xxx i 5xxx.

ZAHVALNOST

Autori se zahvaljuju Ministarstvu prosvete i nauke Srbije za finansijsku pomoć kroz projekat TR 34018.

LITERATURA

- [1] Squillace A., de Fenzo A., Giorleo G., Bellucci F., A comparison between FSW and TIG welding techniques: Modifications of microstructure and pitting corrosion resistance in AA 2024-T3 butt joints, *Journal of Materials Processing and Technology*, 152 (2004), pp 97-105.
- [2] Lockwood W. D., Tomaz B., Reynolds A. P., Mechanical response of friction stir welded AA 2024: Experiment and modeling, *Materials Science and Engineering A*, 323 (2002), pp 348-353.
- [3] Gibson B. T., Lammlein D. H., Prater T. J., Longhurst W. R., Cox C. D., Ballun M. C., et al., Friction stir welding: process, automation, and control, *J. Manuf. Process*, 16 (2014), pp 56–73.
- [4] Murr L. E., A review of FSW research on dissimilar metal and alloy systems, *J. Mater. Eng. Perform.*, 19 (2010), pp 1071–1089.
- [5] Ouyang J. H., Kovacevic R., Material flow and microstructure in the friction stir butt welding welds of the same and dissimilar aluminum alloys, *J. Mater. Eng. Perform.*, 11 (2002).
- [6] Guo J. F., Chen H. C., Sun C. N., Bi G., Sun Z., Wei J., Friction stir welding of dissimilar materials between AA6061 and AA7075 Al alloys effects of process parameters, *Mater. Des.*, 56 (2014), pp 185–192.
- [7] Murr L. E., Li Y., Elizabeth R. D. F., Intercalation vortices and related microstructural features in the friction-stir welding of dissimilar metals, *Mater. Res. Innov.*, 2 (1998), pp 150–163.
- [8] Lee W. B., Yeon Y. M., Jung S. B., The joint properties of dissimilar formed Al alloys by friction stir welding according to the fixed location of materials, *Scr. Mater.*, 49 (2003), pp 423–428.
- [9] Cavaliere P., Nobile R., Panella F. W., Squillace A., Mechanical and microstructural behaviour of 2024-7075 aluminium alloy sheets joined by friction stir welding, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 46 (2006), pp 588–594.
- [10] Palanivel R., Koshy Mathews P., Murugan N., Dinaharan I., Effect of tool rotational speed and pin profile on microstructure and tensile strength of dissimilar friction stir welded AA5083-H111 and AA6351-T6 aluminum alloys, *Mater. Des.*, 40 (2012), pp 7–16.
- [11] I. Shigematsu, Y. Kwon, K. Suzuki, T. Imai, N. Saito, Joining of 5083 and 6061 aluminum alloys by friction stir welding, *J. Mater. Sci. Lett.*, 22 (2003), pp 353–356.
- [12] Palanivel R., Koshy Mathews P., Dinaharan I., Murugan N., Mechanical and metallurgical properties of dissimilar friction stir welded AA5083-H111 and AA6351-T6 aluminum alloys, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 24 (2014), pp 58–65.



- [13] Amancio-Filho S. T., Sheikhi S., dos Santos J. F., Bolfarini C., Preliminary study on the microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welds in aircraft aluminium alloys 2024-T351 and 6056-T4, *J. Mater. Process Technol.*, 206 (2008), pp 132-142.
- [14] Da Silva A., Arruti E., Janeiro G., Aldanondo E., Alvarez P., Echeverria A., Material flow and mechanical behavior of dissimilar AA2024-T3 and AA7075-T6 aluminium alloys friction stir welds, *Mater. Des.*, 32 (2011), pp 2021-2027.
- [15] Koilraj M., Sundareswaran V., Vijayan S., Koteswara Rao S. R., Friction stir welding of dissimilar aluminum alloys AA2219 to AA5083 – optimization of process parameters using Taguchi technique, *Mater. Des.*, 42 (2012), pp 1-7.
- [16] Radisavljević I., Radović N., Živković A., 4th International Conference Processing and Structure of Materials, Palić, 27-29 Maj, 2010, Proceedings, pp. 117-123.
- [17] Radisavljević I., Radović N., Živković A., Grabulov V., Influence of FSW parameters on formation quality and mechanical properties of Al 2024-T351 butt welded joints, *Transaction of Nonferrous Metals Society China*, 23 (2013), pp 3525-3539.
- [18] Radisavljević I., Radović N., Grabulov V., Nikačević M., Influence of process parameters on tunnel type defect appearance and weld quality in FSW welded Al 2024 plates, 5th International Scientific Conference on Defensive Technologies, OTEH 2012, Serbia, Belgrade, 18-19 September 2012, Proceedings on CD, pp 625-630.
- [19] Kumar K., Kailas S., The role of friction stir welding tool on material flow and weld formation, *Materials Science and Engineering A*, 485 (2008), pp 367-374.
- [20] Arbegast W. A flow-partitioned deformation zone model for defect formation during friction stir welding, *Scripta Materialia*, 58 (2008), pp 372-376.
- [21] Rodriguez R. I., Jordon J. B., Allison P. G., Rushing T., Garcia L., Microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welding of 6061-to-7050 aluminum alloys, *Materials & Design*, 83 (2015), pp 60-65.