



Ljubica Radović<sup>1</sup>, Igor Radisavljević<sup>1</sup>, Mihael Bučko<sup>2</sup>

# CORROSION BEHAVIOR OF FRICTION STIR WELDED AlMgMn ALLOY

## KOROZIONO PONAŠANJE AlMgMn LEGURE ZAVARENE POSTUPKOM TRENJEM ALATOM

**Originalni naučni rad / Original scientific paper**

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

**Rad primljen / Paper received:**

Oktobar 2017.

**Adresa autora / Author's address:**

<sup>1</sup>Military Technical Institute, Belgrade, Serbia E-mail: [ljubica.radovic@vti.rs](mailto:ljubica.radovic@vti.rs),

<sup>2</sup>University of Defense, Military Academy, Belgrade, Serbia

**Ključne reči:** AlMg6Mn, zavarivanje trenjem alatom, interkristalna korozija, raslojavajuća korozija.

**Key words:** AlMg6Mn, welding, FSW, intergranular corrosion, exfoliation corrosion.

### Abstract

Corrosion behaviour of friction stir welded (FSW) AlMg6Mn alloy was compared to corrosion behaviour of as-hot rolled alloy by means of NAML and ASSET tests. Corrosion testing revealed that base metal (hot rolled state) is more susceptible to intergranular corrosion (IGC) than FSW specimens. Surface morphology of the base metal after NAML revealed severe intergranular corrosion, while IGC resistance of AlMg6Mn alloy after FSW was significantly improved. It was attributed to different microstructure developed during welding, i.e. due to redistribution of  $\beta$ -phase particles and grain refining. On the other hand, both base metal and weld showed good exfoliation resistance evaluated by ASSET test.

### Rezime

Koroziono ponašanje zavarenog spoja legure AlMg6Mn dobijenog postupkom trenjem alatom je upoređeno sa korozionim ponašanjem legure u toplo valjanom stanju. Koroziono ponašanje ocenjeno je primenom metode gubitka mase (NAML), vizuelne ASSET metode i analizom morfologije površine uzoraka nakon korozionih ispitivanja. Rezultati su pokazali da je AlMg6Mn legura u toplo valjanom stanju osetljivija na interkristalnu koroziju od spojeva zavarenih postupkom trenjem alatom. Na površini uzoraka nakon NAML testa je uočena izrazita/intenzivna interkristalna korozija, dok je otpornost zavarenih spojeva na interkristalnu koroziju povećana. Ovakvo ponašanje je posledica razlike u mikrostrukturi osnovnog metala i zavarenih spojeva, pre svega različite raspodele  $\beta$ -faze i usitnjavanja zrna u zoni termomehaničkog uticaja i zoni uticaja toplote. S druge strane, AlMg6Mn legura i u toplo valjanom stanju i spojevi zavareni trenjem alatom su pokazali otpornost na raslojavajuću koroziju.

### 1. UVOD

Aluminijumske legure sa magnezijumom kao glavnim legirajućim elementom, serije 5xxx, predstavljaju važnu grupu komercijalnih Al legura koje imaju najveću primenu u automobilske, transportne, industrije ambalaže, brodogradnje, avioindustrije i raketne tehnici. Zahvaljujući prvenstveno efektu rastvarajućeg ojačavanja usled prisustva Mg, imaju veliku sposobnost deformacionog ojačavanja, čime se postiže dobar odnos između čvrstoće i sposobnosti oblikovanja. Poseduju i dobru korozionu otpornost i zavarljivost [1]. Zbog dobro izbalansiranih osobina, za sada najveću primenu od svih Al-Mg legura ima EN AW-5083 (Al-4.7Mg-0.7Mn), ali interes za povećanjem sadržaja Mg u Al-Mg legurama se povećava i predmet je istraživanja [2-5]. Legura sa

oko 6 mas.% Mg poseduje dobru zavarljivost i dobar odnos čvrstoće i sposobnosti oblikovanja [3, 5-6]. Međutim, povećanje sadržaja Mg, kao i prisustvo različitih intermetalnih faza povećava čvrstoću, ali dovodi do povećanja osetljivosti na vidove lokalne korozije [7]. Kod legura sa više od 3% Mg, usled ograničene rastvorljivosti Mg, dolazi do izdvajanja anodne  $\beta$ -Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub> faze, koja se preferentno izdvaja po granicama zrna ili na već postojećim česticama Mn-faza [8-10]. Zbog toga su ove legure osetljive na interkristalnu, naponsku i piting koroziju, budući da je faza elektrohemijski aktivnija od Al-osnove [11-15].

Ispitivanje korozione otpornosti zavarenih spojeva aluminijumskih legura do 5% Mg, uključujući i noviji postupak trenjem alatom (FSW-friction stir welding)



je predmet brojnih istraživanja [10, 16-20], ali nedostaju rezultati korozijske otpornosti legura sa većim sadržajem Mg. Zbog toga je cilj ovog rada bio da se ispita korozijsko-ponašanje zavarenog spoja AlMg6Mn legure.

## 2. EKSPERIMENT

### 2.1 Materijal

Za ispitivanje su korišćene ploče AlMg6Mn legure debljine 8 mm, u polaznom - toplo valjanom stanju (TV). Tvrdća legure u polaznom stanju je iznosila 87,5 HV5, a električna provodljivost i 26,04 %IACS. Hemijski sastav korišćene legure je dat u Tabeli 1.

Mg	Si	Cu	Mn	Fe	Zn	Ni	Ti	Al
5.95	0.12	0.015	0.54	0.36	0.07	0.01	0.01	Bal.

**Tabela 1.** Hemijski sastav AlMg6Mn legure (mass. %)

### Zavarivanje

Zavarivanje je izvršeno postupkom trenjem alatom na alatnoj glodalici, prilagođenoj potrebama zavarivanja. Zavarene su ploče, širine 65 mm, prethodno mašinski obrađene na debljinu 6 mm. Primenjeni su sledeći parametri zavarivanja:

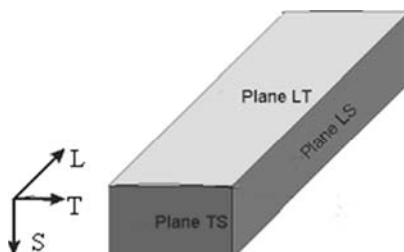
- Brzina rotacije alata 750 o/min
- Brzina zavarivanja 150 mm/min

Korišćen je trn konusnog oblika [21]. Pravac zavarivanja je normalan na pravac valjanja ploča.

### 2.3 Ispitivanje osetljivosti na interkristalnu koroziju

Osetljivost na interkristalnu koroziju ispitana metodom gubitka mase po standardu ASTM G 67-04 [22]. Metoda se sastoji od uranjanja uzoraka u koncentrovanu azotnu kiselinu na 30°C u trajanju od 24 sata, merenja gubitka mase i određivanje gubitka mase po jedinici površine, kao kvantitativne mere osetljivosti na interkristalnu koroziju.

Korišćena su po 3 uzorka dimenzija 50x6x8 mm, isečena iz osnovnog metala i 3 uzorka dimenzija 50x6x6 mm iz FSW zavarenog spoja. Dimenzija 50 mm je paralelna pravcu valjanja (L pravac, slika 1).



**Slika 1.** Označavanje ravni u valjanom limu: L-uzdužni (longitudinal); T-poprečni (transversal); S-kratki poprečni pravac (short transversal).

Uzorci su pripremljeni brušenjem brusnim papirom finoće P320. Merenje masa uzoraka je izvršeno na analitičkoj vagi sa tačnošću  $\pm 0,0001$  g. Merenja su ponovljena i nakon 24 i 48 sati, dok nije ustanovljeno da nema promene u masi uzoraka.

### 2.4 Ispitivanje otpornosti na raslojavajuću i piting koroziju

Ispitivanje na raslojavajuću i piting koroziju je ocenjena po vizuelno ASSET metodom koja je opisana u standardu ASTM G-66 [23]. Metoda se sastoji iz vizuelne ocene uzoraka nakon stajanja u rastvoru ( $\text{NH}_4\text{Cl} + \text{NH}_4\text{NO}_3 + ((\text{NH}_4)_2\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6 + \text{H}_2\text{O}_2)$ ), 24 sata na temperaturi od 65°C i poređenja sa izgledom referentnih uzoraka iz standarda.

Korišćeni su uzorci dimenzija 100x40x8 mm, koji su mehanički pripremljeni i pre uranjanja u ispitni rastvor držani 1 minut u 5 % rastvoru NaOH na 80°C, isprani u vodi i držani 1 minut u koncentrovanoj azotnoj kiselini na sobnoj temperaturi. Nakon testa su uzorci kratko uronjeni u koncentrovanu azotnu kiselinu dok izbebe, a zatim isprani i osušeni.

### 2.5 Morfologija površine

Morfologija površine uzoraka nakon korozijskih testova je analizirana korišćenjem stereo optičkog mikroskopa Leica 205A, i skenirajućeg elektronskog mikroskopa (SEM) Jeol JSM 6610LV.



### 3. REZULTATI I DISKUSIJA

#### 3.1 Osetljivost na interkristalnu koroziju

##### 3.1.1 Gubitak mase

Rezultati merenja gubitka mase uzoraka legure i zavarenih spojeva nakon NAMLT testa su dati u tabeli 2, a izgled uzoraka nakon testa na slikama 2 i 3.

Rezultati kvantitativne ocene interkristalne korozije korišćenjem NAMLT testa, su pokazali da je gubitak mase kod TV AlMg6Mn legure 89,4 mg/mm<sup>2</sup>, što pokazuje da ona, po kriterijumima

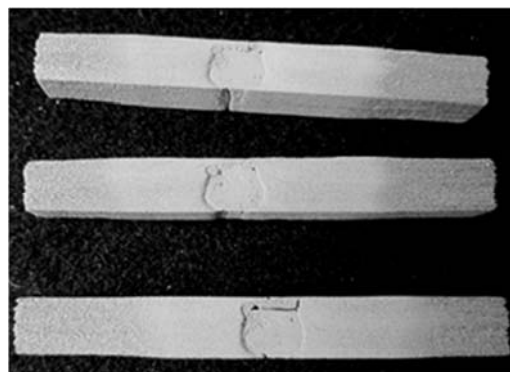
korišćenog standarda, ima veliku osetljivost na IGC. (Po ASTM G67 standardu legure su osetljive na IGC ukoliko je gubitak mase > 25 mg/cm<sup>2</sup>). Kod uzoraka FSW spoja gubitak mase je manji. Shodno ovim rezultatima veću otpornost na interkristalnu koroziju imaju uzorci zavarenih spojeva od legure u polaznom stanju. Gubitak mase od 50,4 mg/cm<sup>2</sup> kod uzoraka FSW spoja takođe pokazuje da su osetljivi na IGC, međutim, treba imati u vidu veličinu uzoraka i da oni sadrže i sam zavareni spoj, ali i osnovni metal (slika 3). Tako je dobijeni rezultat gubitka mase zavarenih spojeva predstavlja zbir gubitka mase samog zavarenog spoja i osnovnog metala.

Tip uzorka	Površina (cm <sup>2</sup> )	Masa pre testa (g)	Masa nakon testa (g)	Gubitak mase (mg/cm <sup>2</sup> )	
TV AlMg6Mn legura	14,42	5,9160	4,6277	89,34	89,4
	14,43	5,9345	4,6645	88,07	
	14,44	5,9231	4,6111	90,98	
FSW	12,37	4,4893	3,8841	48,92	50,4
	12,32	4,4867	3,8245	53,75	
	12,29	4,4361	3,8398	48,52	

**Tabela 2.** Gubitak mase, mg/cm<sup>2</sup>



**Slika 2.** Uzorci AlMg6Mn legure nakon NAMLT testa.

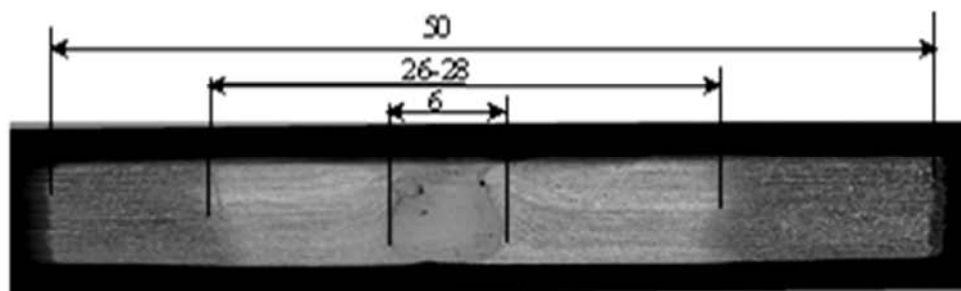


**Slika 3.** Uzorci FSW zavarenog spoja AlMg6Mn legure nakon NAMLT testa: a) L-S ravan; b) (L-T ravan, korena strana).



Na bazi rezultata gubitka mase i dimenzionih merenja, moguće je izvršiti približnu procenu gubitka mase u „samom“ FSW spoju. Vizuelnom analizom uzoraka nakon ispitivanja i poređenjem dimenzija uzoraka pre i nakon testa, je uočen različit korozioni uticaj po dužini uzoraka (slike 2 i 3). Uočeno je da su krajevi uzoraka „stanjeni“ u

odnosu na centralni deo uzorka, a što pokazuje da je rastvaranje OM intenzivnije u odnosu na zone zavarenog spoja. Makroskopskom analizom uzoraka na stereo mikroskopu jasno se uočavaju zone različitog uticaja korozionog medijuma (slika 4).



**Slika 4.** FSW zavareni spoj AlMg6Mn legure nakon NAMLT testa, L-S ravan. Stereo mikroskop.

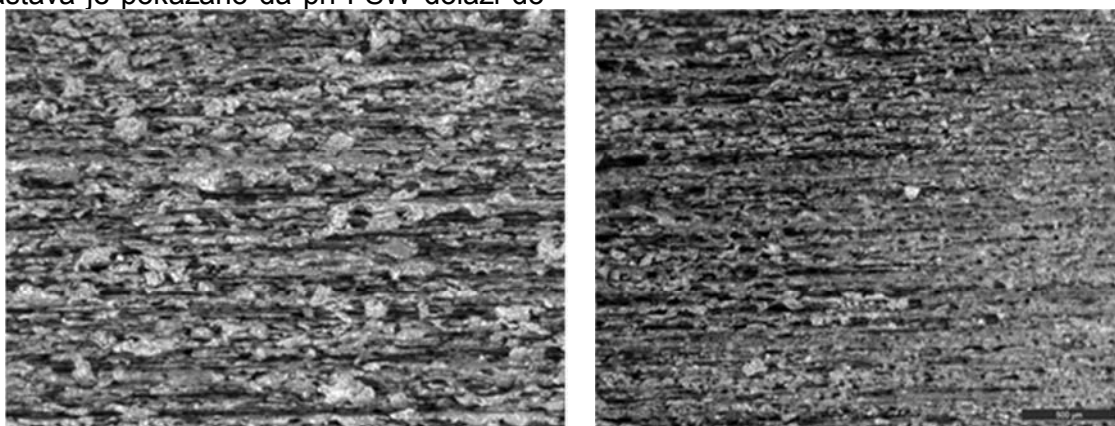
Analizom mikrostrukture uzoraka OM i zavarenog spoja, pre svega raspodele sekundarnih faza i anodne  $\beta$ -faze, moguće je objasniti smanjenje osetljivosti FSW spoja AlMg6Mn legure na interkristalnu koroziju. Mikrostruktura FSW spoja se znatno razlikuje od mikrostrukture TV legure u pogledu veličine i usmerenosti zrna i raspodele i veličine sekundarnih faza [24]. Mikrostrukturu zone grumena karakteriše veoma sitno, rekristalisano zrno, a čestice sekundarnih faza, su takođe sitne i homogeno raspoređene. Zonu TMUT karakterišu izdužena zrna, usmerena usled rotacije trna pri zavarivanju. Veličina zrna se smanjuje od osnovnog metala ka zoni grumena. Sekundarne faze u ovoj zoni su takođe usmerene i krupnije su nego u zoni grumena. S obzirom, da je za intenzitet interkristalne korozije najviše „odgovorna“  $\beta$ -faza koja ima tendenciju izdvajanja po granicama zrna [25], a koja se rastvara u prisustvu azotne kiseline, u nastavku ovog istraživanja će biti urađena karakterizacija mikrostrukture u pogledu raspodele  $\beta$ -faze. U radovima drugih autora na legurama sličnog sastava je pokazano da pri FSW dolazi do

promene raspodele-redistribucije  $\beta$ -faze tj. formira se diskontinuirana raspodela  $\beta$ -faze, što je ključni uzrok smanjenja rastvaranja, (gubitka mase u NAMLT testu) i povećanja otpornosti na interkristalnu koroziju [16-17].

### 3.1.2. Morfologija površine

Razlike u morfologiji površine uzoraka osnovnog metala i zavarenih spojeva nakon NAMLT testa su uočene već i golim okom (slike 2 i 3), a zatim su uzorci analizirani na stereo mikroskopu (slike 4 i 5), i SEM-u (slike 6 i 7).

Uočena je znatna razlika u morfologiji površina nakon NAMLT testa u L-S ravni uzoraka OM i zavarenog spoja. Kod OM koroziona oštećenja su makroskopski homogena sa jasno izraženom usmerenosti duž pravca valjanja (slike 2 i 4). Posmatranjem na stereo mikroskopu jasno je uočen interkristalini karakter razaranja kod uzoraka OM (slika 5a) i uzorcima zavarenog spoja (slika 5b levo), što je potvrđeno i posmatranjem na SEM-u.

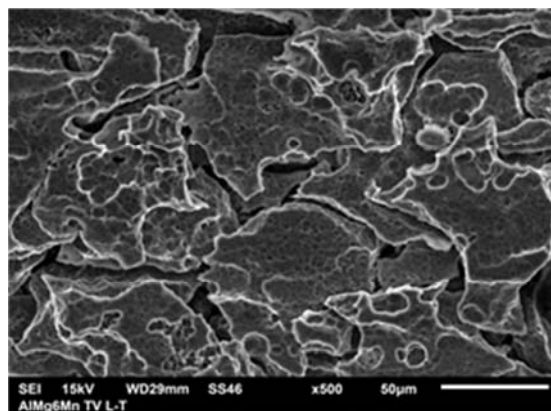
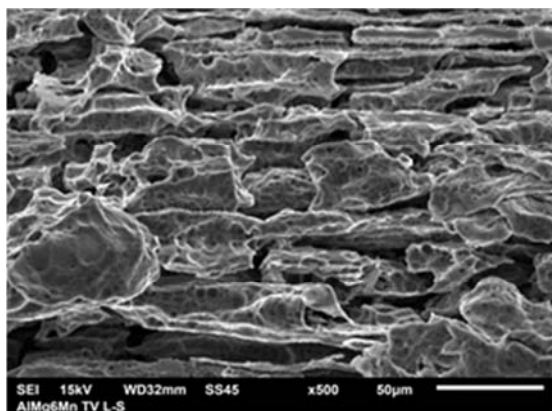


**Slika 5.** AlMg6Mn legura nakon NAMLT testa, L-S ravan: a) OM; b) FSW –prelaz između OM i ZUT-a. Stereo mikroskop



Uočeno je da je došlo do rastvaranja po faza i osnove granicama izduženih, deformisanih zrna i razdvajanja zrna (slika 6a). Budući da su zrna deformisana i izdužena u uzdužnom pravcu, pravcu

valjanja lima i da je najduži kontakt između zrna u tom pravcu, došlo je do raslojavanja. Interkristalni karakter razaranja je vidljiv i u ravni valjanja lima, L-T ravni (slika 6 b).

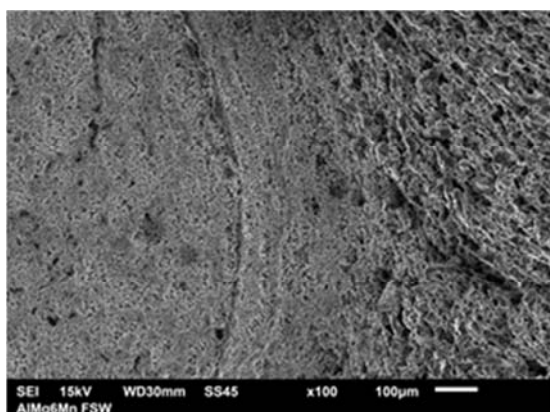


**Slika 6.** Morfologija površine AlMg6Mn legure nakon NMLT testa: a) L-S ravan; b) L-T ravan. SEM.

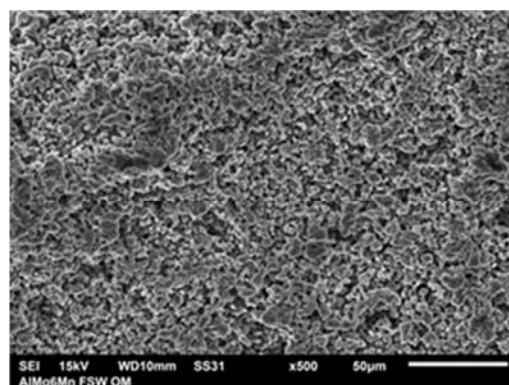
Uticaj korozione sredine na uzorke FSW spoja je nehomogen/neujednačen/različit (slika 4). Vizuelno je konstatovano najveće koroziono oštećenje u grumenu u L-S ravni, kao i krajevima uzorka, u osnovnom metalu. Promena dimenzija, tj. stanjenje uzorka na krajevima, dakle u osnovnim metalu, je vidljivo i u L-S i L-T ravni (slike 3 a i b). Ova zapažanja su u saglasnosti sa rezultatima određivanja gubitka mase, gde je najveći gubitak mase bio u OM (3.1). Na uzorcima FSW spoja se jasno uočavaju izdvojene zone različitog uticaja korozione sredine. Širina grumena je oko 6 mm, dok je zona širine oko 28 mm zona ZTMU+ZUT, gde je uočeno manje rastvaranje materijala nego na krajevima uzorka u osnovnom metalu, što je u skladu sa rezultatima drugih autora [17-19]. Ovi rezultati pokazuju da se zone ZTMU i ZUT mogu precizno odrediti u ovom testu, verovatno preciznije nego metodom merenja raspodele tvrdoće, koja je uobičajena, odnosno da je metoda ispitivanja na

interkristalnu koroziju osetljivija na mikrostrukturne promene od metode merenja tvrdoće. Na slici 5 b (pri povećanju od oko 30x) prikazana je „prelazna“ zona gde se uočava prelaz od interkristalnog razaranja (u OM), preko mešovito, ka transkristalnom (jamičastom) tipu oštećenja.

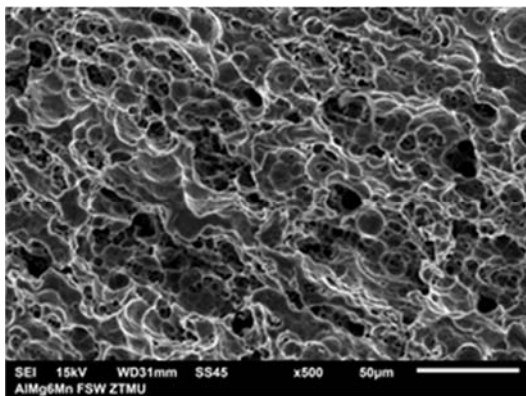
Morfologija površine uzoraka FSW zavarenog spoja je prikazana na slici 7. Saglasno metalografskoj analizi [24] koja je pokazala znatnu razliku u veličini i orijentaciji zrna, očekivan je i različit uticaj korozione sredine. Površina u zoni grumena je granularna (slika 7b), za razliku od ostalih delova spoja, gde je površina jamičasta (slike 7c i d), što je posledica rastvaranja faza unutar zrna (fine  $\beta$ - faze i krupnije  $Mg_2Si$ ) i osnove u okolini krupnih katodnih faza ( $(Fe, Mn)Al_6$ ,  $Al_3Fe$ ) koje su raspoređene unutar zrna [20, 26-27]. Jamice u ZTMU su sitnije nego u ZUT-u i usmerene u pravcu deformacije, što odgovara pravcu usmeravanja sekundarnih faza [24]



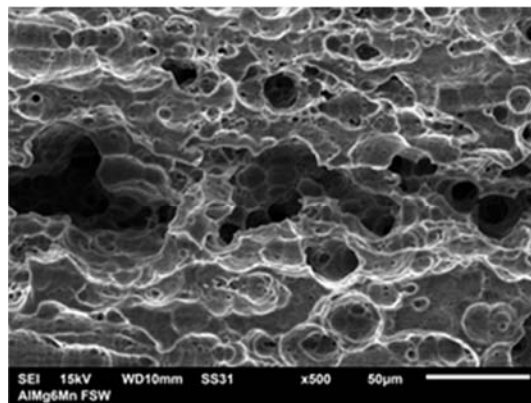
a)



b)



c)

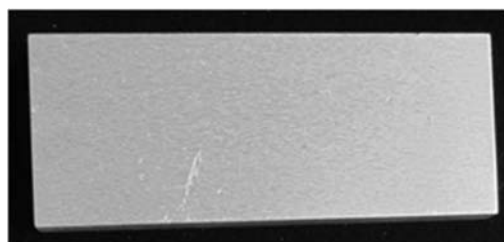


d)

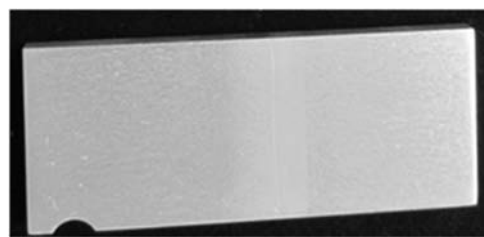
**Slika 7.** Morfologija površine u FSW zavarenom spoju AlMg6Mn legure: a) grumen-ZTMU; b) grumen; c) ZTMU; d) ZUT

### 3.2 Osljivost na raslojavajuću i piting koroziju

Izgled uzoraka nakon ispitivanja osetljivosti na raslojavajuću koroziju ASSET metodom po ASTM G66, prikazan je na slici 8.



a)



b)

**Slika 8.** Uzorci nakon testa G 66: a) AlMg6Mn legura-OM; b) FSW zavareni spoj

Vizelnom ocenom je konstatovano da nema vidljivih znakova pitinga i raslojavanja na površini uzoraka, pa se prema datom standardu opisuje slovom N (N - no appreciable attack), što znači da su svi uzorci otporni na piting i raslojavajuću koroziju, prema ovom standardu.

### 4. ZAKLJUČAK

Ispitana je osetljivost na interkristanu (IGC), raslojavajuću koroziju i piting AlMg6Mn legure u toplo valjanom stanju i zavarenih spojeva dobijenih postupkom trenjem alatom (FSW).

AlMg6Mn legura u toplo valjanom stanju je pokazala veliku osetljivost na IGC. Gubitak mase u NAMLT testu od 89,4 mg/mm<sup>2</sup> je u saglasnosti sa uočenom morfologijom površine uzoraka nakon testa. Pretpostavljeno je da je gubitak mase posledica intenzivnog rastvaranja anodnih sekundarnih faza i Al osnove po granicama izduženih, deformisanih zrna.

FSW spoj ima veću otpornost na IGC od osnovnog metala. Gubitak mase u NAMLT testu (koji uključuje i zavareni spoj i OM) je 50,4 mg/mm<sup>2</sup>, dok je proračunato je da je gubitak mase u samom zavarenom spoju (grumen, ZTMU i ZUT)

19,7 mg/mm<sup>2</sup>. Smanjenje gubitka mase, tj. povećanje korozione otpornosti FSW spoja u odnosu na osnovni metal je posledica smanjenja veličine zrna i homogenije raspodele čestica sekundarnih faza u zavarenom spoju, u odnosu na deformisanu, usmerenu mikrostrukturu osnovnog metala lima.

Ispitivanja korozione postojanosti FSW spojeva primenom NAMLT testa su pokazala da je zona uticaja toplote (ZUT) veća u odnosu na ZUT uočen makroskopskim ispitivanjima. Ovo ukazuje da je ova metoda ispitivanja korozione otpornosti osetljivija na mikrostrukturne promene u zavarenom spoju od klasičnog ispitivanja makrostrukture. Osnovni metal i zavareni spojevi AlMg6Mn legure su u po vizuelnoj oceni, saglasno saglasno ASTM G66 standardu, pokazali otpornost na piting i raslojavajuću koroziju.

### LITERATURA

[1] Sanders Jr.R. E., HollinsheadP. A., SimielliE. A., Industrial Development of Non-Heat Treatable Aluminum, Materials Forum, Vol. 28, Ed. by J.F. Nie, A.J. Morton, B.C. Muddle, 2004.



- [2] Sen R., Kaiser S, Mitra M K, Banerjee M K., Plane strain fracture toughness of scandium doped Al-6Mg alloy, *Journal of Alloys and Compounds* 457, (2008), pp. 135-143.
- [3] Romhanji E, Popović M, Radmilović V. Room temperature deformation behaviour of AlMg6.5 alloy sheet, *Z Metallkd* (1999),90(4),pp.305-310.
- [4] RadovićLJ., NikačevićM., Microstructure and properties of cold rolled and annealed Al-Mg alloys, *Scientific Technical Review*, 2, Military Technical Institute, Beograd, 2008.
- [5] RadovićLj., NikačevićM., JordovićB., Deformation behaviour and microstructure evolution of AlMg6Mn alloy during shear spinning *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 22(2012), pp. 991-1000.
- [6] Timoshenko Y B., On the relation between the Luders deformation and grain boundary structure in aluminium alloy, *Revue Phys Appl*, (1990), 25: pp. 1001-1004.
- [7] RomhanjiE., PopovićM., Problems and Prospect of Al-Mg Alloys Application In Marine Constructions, *MJOM Metalurgija - Journal of Metallurgy*, Vol 12, No4 (2006), pp. 297-307..
- [8] GaoJ., QuesnelD.J., Enhancement of the Stress Corrosion Sensitivity of AA5083 by Heat Treatment, *Met Mat Trans A*, Vol. 42A (2011),pp. 356-364.
- [9] GoswamiR., SpanosG., PaoP.S., HoltzR.L., Precipitation behavior of the phase in Al-5083 R. *Materials Science and Engineering A* 527, (2010), 1089-1095.
- [10] ChoiD. H., AhnB.W., QuesnelD.J., JungS.B., Behavior of  $\beta$ -phase ( $\text{Al}_3\text{Mg}_2$ ) in AA 5083 during friction stir welding, *Intermetallics* 35 (2013), pp. 120-127.
- [11] VargelC., *Corrosion of Aluminium*, Elsevier, 2004.
- [12] GoswamiR., SpanosG., PaoP.S., HoltzR.L., Microstructural Evolution and Stress Corrosion Cracking Behavior of Al-5083, *Met Mat Trans Vol. 42A*, (2011), 348-355.
- [13] JonesR.H., BaerD.R., DanielsonM.J., J.S. Vetrano, Role of Mg in the Stress Corrosion Cracking of an Al-Mg Alloy, *Met Mat Trans A*, Vol. 32A, 2001, pp. 1699-1711.
- [14] SearlesJ.L., GoumaP.I., BuchheitR.G., Stress Corrosion Cracking of Sensitized AA5083 (Al-4.5Mg-1.0Mn), Vol. 32A, *Met Mat Trans A*, Vol. 32A, (2001), pp. 2859-867.
- [15] KhoshnawF.M., GardiR.H., Effect of aging time and temperature on exfoliation corrosion of aluminum alloys 2024-T3 and 7075-T6, *Mater. Corros.* 58 (2007),pp. 345-347.
- [16] WinsleyR., DavenportA., AfsethA., ScamansG, Corrosion resistance of heat-treated and friction stir welded AA5083-H116, 212th ECS Meeting, Washington, 2007.
- [17] BehnaghR.A., Besharati GiviM.K., AkbariM., Mechanical Properties, Corrosion Resistance, and Microstructural Changes during Friction Stir Processing of 5083 Aluminum Rolled Plates, *Materials and Manufacturing Processes*, 27 (2012), pp. 636-640.
- [18] VilaçaP., PépeN., QuintinoL., Metallurgical and corrosion features of friction stir welding of AA5083-H111, *Welding in the World*, Vol. 50(9-10), 2006.
- [19] ZucchiF., Trabanelli G., GrassiV., Pitting and stress corrosion cracking resistance of friction stir welded AA5083, *Materials and Corrosion* 52, (2001), pp. 853-859.
- [20] MeredithG. S., Friction stir processing for the reversal and mitigation of sensitisation and intergranular corrosion in aluminium alloy 5083-H321, Ph.D. Thesis, The School of Metallurgy and Materials, College of Engineering and Physical Sciences The University of Birmingham, UK, 2014.
- [21] RadisavljevićI., ŽivkovićA., RadovićN., GrabulovV., Influence of FSW parameters on formation quality and mechanical properties of Al 2024-T353 butt welded joint, *Trans Nonferr Met Soc China*, Volume 23, Issue 12, December 2013, pp. 3525-3539.
- [22] Standard Test Method for Determining the Susceptibility to Intergranular Corrosion of 5xxx Series Aluminum Alloys by mass Loss After Exposure to Nitric Acid (NAMLT Test), ASTM G67-04, ASTM International, 2004
- [23] Standard Test Method for Visual Assessment of Exfoliation Corrosion Susceptibility of 5XXX Series Aluminum Alloys (ASSET Test), ASTM G66-99, 1999.
- [24] RadovićLj., Ocena korozijske postojanosti zavarenih spojeva aluminijumskih legura, Tehnički izveštaj, VTI-04-01- 0939, Vojnotehnički institut, 2015, Beograd, Srbija.
- [25] KramerL., PhillippiM., TackW.T., WongC., Locally Reversing Sensitization in 5xxx Aluminum Plate, *JMatEngPerform*, DOI 10.1007/s11665-011-9998-9, (2011).
- [26] TruebaM., TrasattiS. P., Study of Al alloy corrosion in neutral NaCl by the pitting scan technique, *Materials Chemistry and Physics* 121 (2010), pp.523-533.
- [27] GhaliE., *Corrosion Resistance of Aluminum and Magnesium Alloys: Understanding, Performance, and Testing*, ISBN 9780471715764, John Wiley & Sons, Inc, 2010.