

UDK : 693.827:621.791.9  
621.791.9:621.914.3

## UTICAJ PARAMETARA ZAVARIVANJA TRENJEM SA MEŠANJEM NA KARAKTERISTIKU ZAVAREN OG SPOJA PLOČA OD LEGURE ALUMINIJUMA 2024 T351

Miodrag Milčić<sup>1</sup>, Tomaž Vuherer<sup>2</sup>, Igor Radisavljević<sup>3</sup>, Dragan Milčić<sup>1</sup>

**Rezime:** Aluminijum je posle čelika najznačajniji građevinski material, iako nema dugu istoriju primene u građevinarstvu. Građevinske konstrukcije od aluminijuma potencijalno mogu naći veliku primenu zahvaljujući dobroj korozionoj postojanosti, lakoći legure, otpornosti na krti lom itd. U ovom radu opisan je uticaj zavarivanja trenjem sa mešanjem na strukturne i mehaničke karakteristike legure aluminijuma 2024 T351. Uzorci koji se zavaruju su ploče debljine 6mm. Zvarivanje je izvršeno glodalicom pomoću posredstvom posebno oblikovanog alata. Ploče su zavarene u tri različita režima parametara, pri čemu je rotacija alata u svim slučajevima bila 750 min<sup>-1</sup>, a menjao se posmak alata, 73 mm/min, 116 mm/min, 150 mm/min. Svi uzorci su zavareni bez grešaka i prekontrolisani radiografski i vizuelno.

**Ključne reči:** zavarivanje trenjem sa mešanjem, AA 2024 T351, mehaničke karakteristike zavarenog spoja, mikrostruktura materijala.

## INFLUENCE OF KINEMATIC FACTORS OF FRICTION STIR WELDING ON THE CHARACTERISTICS OF WELDED JOINTS OF PLATES MADE OF EN AW-2024 T351 A ALUMINIUM ALLOY

**Abstract:** Aluminum after steel is the most significant building material, although there is no long history of civil engineering applications. Aluminum architectural constructions are potentially found to be highly applied due to good corrosion resistance, light alloy, crack resistance, etc. This paper describes the impact of friction stir welding on the structural and mechanical properties of aluminum alloy 2024 T351. Samples that are welded are 6mm thick plates. The cracking is performed by a milling cutter by means of a specially developed tool. The plates were welded in three different parameter regimes, with the rotation of the tool in all cases being 750 rpm, and the tool shift, 73 mm/min, 116 mm/min, 150 mm/min. All the samples were welded without faults and checked radiographically and visually.

**Keywords:** friction stir welding, EN AW-2024 T351, mechanical characteristics of welded joint, microstructure of material..

<sup>1</sup> Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet u Nišu

<sup>2</sup> Univerzitet u Mariboru, Strojniški fakultet u Mariboru

<sup>3</sup> Vojno Tehnički Institut u Beogradu

## 1. UVOD

Primena aluminijskih legura za građevinske konstrukcije nema dugu tradiciju bez obzira na to što njihova granica elastičnosti i granica tečenja može biti veća nego kod običnih konstrukcijskih čelika.

Posle čelika aluminijum i legure aluminijuma su najznačajniji građevinski materijal i primenjuje se za:

- konstrukcije krovova srednjih i velikih raspona;
- fasadne konstrukcije,
- konstrukcije objekata sa izloženom konstrukcijom u primorskim krajevima, ili u agresivnim sredinama,
- konstrukcije sa pokretnim delovima (pontonski mostovi, pokretni mostovi),
- objekti za skladištenje i transport materija koji agresivno deluju na čelik (rezervoari, cevovodi...),
- konstrukcije koje se nalaze u teško pristupačnim predelima i koje je teško održavati (svetionici, dalekovodi,...),
- konstrukcije u predelima sa ekstremno niskim temperaturama,
- montažno-demontažne konstrukcije različite namene,
- postojeće konstrukcije kod kojih je predviđeno povećanje korisnog opterećenja.

Sve veća primena legura aluminijuma u građevinskim konstrukcijama se bazira na sledećim karakteristikama:

- Al i Al legure 2,7 puta su lakše od čelika.
- Rm nekih Al legura je približno kao kod čelika (pa i veća).
- Mehaničke karakteristika se ne menjaju pri niskim temperaturama.
- Rm, A5 (relativno izduženje) i žilavost na 195°C se čak i povećavaju.
- Toplotna provodljivost je 13 puta veća od nerđajućih čelika, a 4 puta veća od čelika.
- Elektroprovodljivost je dva puta veća nego kod Cu pri istoj težini.
- Al je nemagnetičan što je bitno za određene oblasti primene.
- Ima dobru sposobnost oblikovanja savijanjem, istiskivanjem i dubokim izvlačenjem.
- Sa površine Al se reflektuje 75-80% sunčevih zraka. Al nije toksičan (bez uticaja na okolinu),

međutim kada se tope oksidi sa površine aluminijuma, dolazi do isparavanja u vidu plavog dima, tako da mora da postoji dobra ventilacija u radionici.

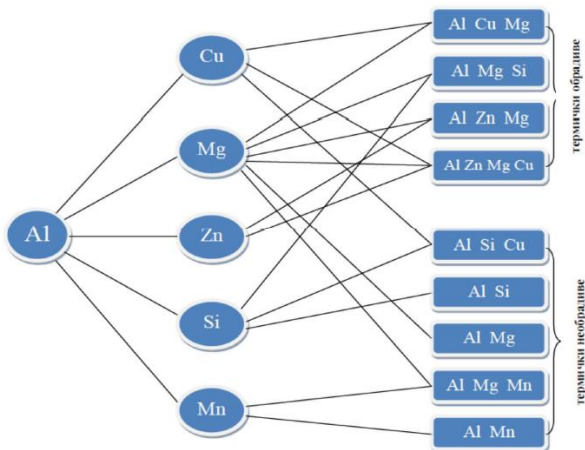
- Posедуje visok stepen samozaštite i korozione postojanosti u atmosferi i u određenim hemijskim sredinama.
- Ima velike mogućnosti dekorativne zaštite: lakiranjem, plastificiranjem i anodizacijom. Aluminijum i većina njegovih legure se dobro zavaruje TIG, MIG i FSW postupkom.

Potencijalno aluminijum i legure aluminijuma predstavljaju važne građevinske materijale zahvaljujući i sledećim karakteristikama [1-3]:

- Koroziona postojanost legura ne zahteva posebnu zaštitu konstrukcije, što smanjuje troškove održavanja i osigurava tražene zahteve u korozivnim sredinama;
- Mala težina omogućuje smanjenje ukupne težine konstrukcije, olakša transport montiranih sklopova, pojednostavljuje gradnju, smanjuje opterećenje na temelje i opseg fizičkog posla;
- Proizvodnja profila ekstruzijom omogućuje da se njihov presek namenski prilagodi minimalnoj težini i poželjnoj funkcionalnosti, predvide oblici za ojačavanje koji nisu velikih dimenzija i olakša njihovo povezivanje.
- otpornost na krti lom (u području niskih temperatura), mala osetljivost na temperaturni gradijent i zaostale napone;
- otpornost na udare (pozitivan uticaj brzine deformacije na čvrstoću i žilavost);
- vrlo velik izbor rešenja i savremenih tehnologija za spajanje elemenata.

Zahvaljujući dobrom legiranju aluminijuma s drugim metalima razvijeno je niz legura sa različitim mehaničkim osobinama što je doprinelo daljem proširenju primene Al i Al legura (slika 1). Aluminijum se legira sa: Mg, Mn, Cu, Zn, Si, Ni, Fe, a ređe sa Ti, Zr, Cr i An. Dodaci Cu, Mn, Mg i Fe povećavaju zateznu čvrstoću. Dodaci Si, Zn, Fe povećavaju A5 (relativno izduženje). Dodaci Mn i Mg znatno povećavaju otpornost prema koroziji.

Termički neobradljive legure (nekaljive, za gnjecenje) su Al legure, legirane sa Mn i Mg, oznaka 1xxx, 3xxx i 5xxx. Termički obradljive legure (kaljive) su legure legirane sa: Cu, Si, Mg, Si, Zn oznaka: 2xxx, 4xxx, 6xxx i 7xxx.



Slika 1 – Uobičajni sistemi legura aluminijuma

Legure serije 2XXX su legirane bakrom: AlCuMg, AlCuMgSi, AlCuSiMg, (Durali) tipično sadrže 2 – 10% bakra. Optimalna svojstva postiže rastvornim žarenjem. Osigurava visoku čvrstoću. Koristi se za delove aviona, zakovice, zavrtnje. Karakteristika je slabija zavarljivost. Imaju osjetljivost na tople prsline. Uopšte se zavaruju žicama serije 4xxx (4043 i 4145). Izuzetak su legure 2014 (AlCuMg), 2219 (AlCuMn), 2319 koje se zavaruju sa 4043 ili 2319. (4043-AlSi5 ; 4145-AlSi10; 2319-AlCu).

Za zavarivanje aluminijuma i njegovih legura najviše se upotrebljavaju fuzioni postupci zavarivanja TIG (*Tungsten Inert Gas*) i MIG (*Metal Inert Gas*). Kako aluminijum ima veliku provodljivost toplote, odnosno odvođenje toplote, iako je tačka topljenja niska (oko 660°C) potrebna je velika toplota za topljenje legure. Unošenjem toplote u osnovni materijal poništavaju se neke od obrada kroz koje je prošla legura. To dovodi do promene svojstava aluminijuma u blizini zavara. Ta promena se manifestuje u formiranju zone smanjene nosivosti u okolini šava HAZ (heat affected zone) ili prevedeno ZUT (zona uticaja toplote).

Legure serije 2XXX su fuzionim postupcima praktično nezavarive, pa se za zavarivanje legura ove serije uglavnom koristi FSW postupak zavarivanja.

## 2. ZAVARIVANJE TRENJEM SA MEŠANJEM

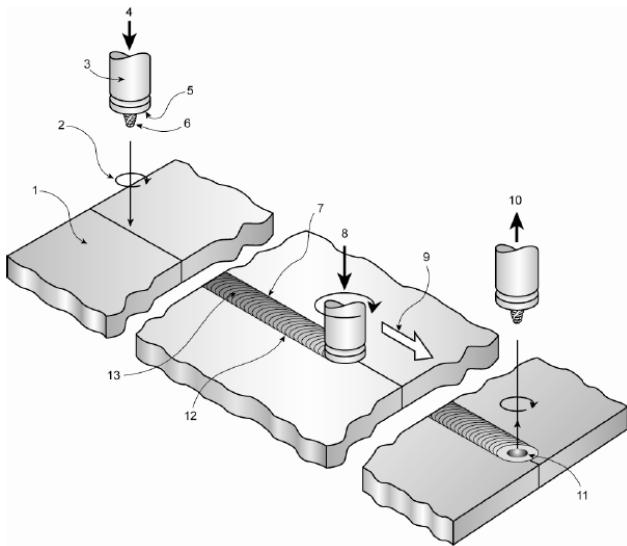
Postupak zavrivanja trenjem sa mešanjem (eng. FSW- Friction Stir Welding) osmišljen u Engleskoj (1991) [1], prvi put primenjen na industrijskom nivou u Švedskoj (1995), postupak je izazvao posebno interesovanje u SAD i Japanu. Za kratko vreme u ovim zemljama počela je industrijska primena ovog

postupka za zavarivanje legura lakih metala kao što su aluminijum i magnezijum, čak i pre potpunog razumevanja samog procesa zavarivanja.

Tokom FSW postupka alat i osnovni materijal se nalaze u relativnom kretanju jedan u odnosu na drugi. Alat tokom zavarivanja rotira oko svoje ose konstantnom ugaonom brzinom  $\omega$ , pri čemu se tokom pojedinih faza postupka alat i osnovni materijal translatorno kreću jedan u odnosu na drugi. Alat izvodi glavno, obrtno kretanje, dok pomoćno translatorno kretanje mogu da izvode ili osnovni materijal ili alat ili osnovni materijal i alat istovremeno. Najčešća je varijanta da osnovni materijal vrši translatorno kretanje, a ako se zavarivanje vrši na specijalizovanoj mašini za FSW moguće je da alat istovremeno vrši i obrtno i translatorno kretanje, pri čemu osnovni materijal može ili da miruje ili da se translatorno kreće. Zavarivanje počinje tako što alat usled dejstva pritisne sile prodire u osnovni materijal. Usled kontakta između osnovnog materijala i rotirajućeg alata, mehanička energija alata se najvećim delom transformiše u toplotnu energiju što za posledicu ima zagrevanje i alata i osnovnog materijala. Alat je izrađen od materijala koji ima znatno višu tačku topljenja i veću čvrstoću, pa je postojaniji od osnovnog metala. Termomehaničke promene alata pri procesu zavarivanja su zanemarljive, što nije slučaj kod osnovnog metala. Osnovni metal omekšava i postaje deformabilniji a alat u zahvatu ga deformiše, meša i formira zavareni spoj.

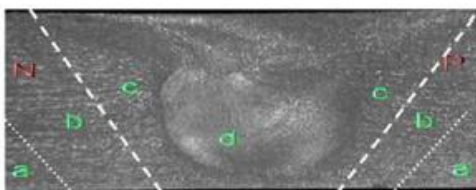
Kod FSW postupka važi princip minimalno potrebne ali dovoljne dovedene količine energije, kako bi se zavarivanje izvelo sa minimalnim promenama u zavarenom spoju i zoni uticaja toplote. Kod FSW postupka veoma je teško odrediti kolika je to minimalno potrebna količina dovedene energije, međutim kao apsolutno tačno, može se tvrditi da količina energije koja se unese u zavar direktno zavisi od [3]- [12]:

- 1) Mehaničkih karakteristika materijala alata i osnovnog metala,
- 2) Geometrijskih parametara alata i
- 3) Tehnoloških parametara samog procesa zavarivanja.



Slika 2 [2] - Nomenklatura postupka zavarivanja trenjem sa mešanjem, 1-osnovni metal, 2-smer rotacije alata (u smeru kazaljke na satu), 3-alat za zavarivanje, 4-spuštavanje alata, 5-rame alata, 6-klin (trn), 7-strana napredovanja zavara, 8-aksijalna sila, 9-smer zavarivanja, 10-podizanje alata, 11-izlazni otvor, 12-povratna strana zavara, 13-lice šava

Mikrostruktura spoja dobijenog FSW postupkom značajno zavisi od konstrukcionog rešenja alata, brzine rotacije, brzine zavarivanja (translacije), pritiska alata na ploče duž vertikalne ose i karakteristika materijala koji se zavaruje. U strukturi zavarenog spoja može se identifikovati veći broj zona (slika 3): zona uticaja toplote u klasičnom smislu, (HAZ), zona termomehantičkog uticaja (TMAZ), zona grumen i osnovni metal. Centralna zona – grumen, u kojoj se mogu identifikovati linije tečenja materijala, je zona u kojoj je najveća plastična deformacija.



Slika 3 – Makrostruktura FSW zavarenog spoja a-osnovni materijal, b-zona uticaja toplote (ZUT), c-zona termomehantičkog uticaja (TMAZ), d-zona mešanja (grumen)

Dakle, na strukturu zavarenog spoja, a samim tim i na mehaničke karakteristike zavarenog spoja utiču u velikoj meri parametri zavarivanja. U radu su data eksperimentalna istraživanja uticaja parametara

zavarivanja trenjem sa mešanjem pri sučeonom zavarivanju ploča od legure aluminijuma 2024 T351 na mehaničke i strukturne karakteristike zavarenih spojeva.

### 3. EKSPERIMENTALNI DEO

Cilj eksperimenta bio je istraživanje uticaja kinematskih parametara zavarivanja, kao što su brzina zavarivanja  $v$  i brzina rotacije alata  $n$  na metalurške i mehaničke karakteristike zavarenih spojeva. Osnovni materijal je bila legura aluminijuma EN AW-2024 T351. Hemijski sastav legure aluminijuma 2024 T351 je dat u tabeli 1, a mehanička svojstva u Tabeli 2. [3].

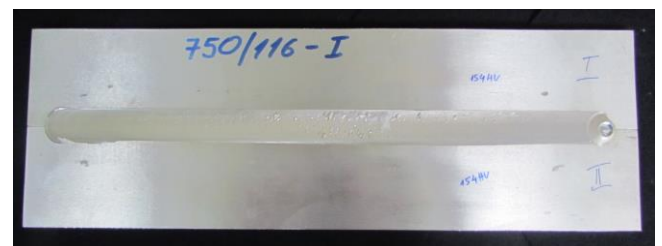
Tabela 1- Hemijski sastav legure aluminijuma 2024 T351

Hemijski sastav	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti
%	4,70	1,56	0,65	0,17	0,046	0,11	0,032

Tabela 2 – Mehanička svojstva legura aluminijuma 2024 T351

Granica tečenja	Zatezna čvrstoća	Elongacija	Tvrdoća
$R_{eh}, \text{MPa}$	$R_m \text{ Mpa}$	$A_5, \%$	HV
370	481	17.9	137

Eksperimentalno zavarene ploče su dimenzija 500 mm × 65 mm × 6 mm. Obe strane ploča koje se zavaruju obrađene su na brusilici. Ispod ploča koje se zavaruju postavljena je osnovna ploča koja je napravljena od austenitnog čelika. Mašina kojom je izvršeno zavarivanje trenjem sa mešanjem je glodalica. Dužina zavara iznosila je oko 400 mm (slika 2). Za eksperimentalno zavarivanje korišćena je alatna mašina glodalica (Slika 5) sa mogućnošću stepenastog biranja brzine rotiranja alata i podužnog kretanja.

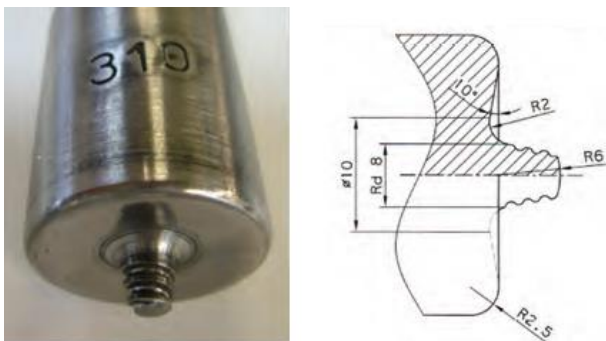


Slika 4 – Sučeono zavarene ploče FSW postupkom



Slika 5 – Primena alatne mašine – glodalice za zavarivanje ploča postupkom trenjem sa mešanjem

Za zavarivanje trenjem sa mešanjem korišćen je alat čija je geometrija data na slici 6.



Slika 6 – Geometrija alata za zavarivanje trenjem sa mešanjem

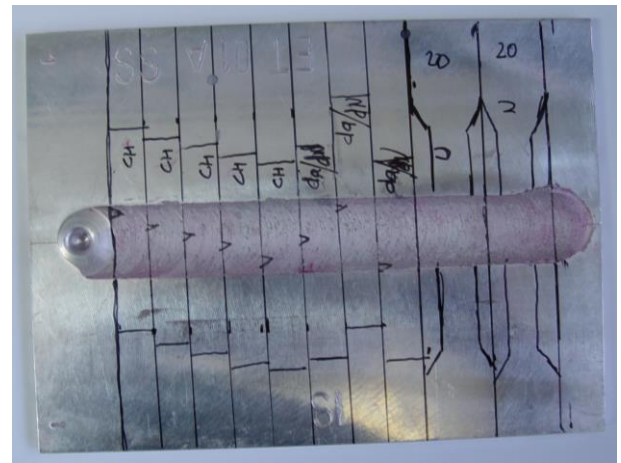
Zavarivanje je izvedeno sa varijacijama broja obrtaja alata  $n$  i brzine zavarivanja  $v$ , Tabela 3. Ostali parametri zavarivanja su sa istim vrednostima.

Tabela 3 – Parametri zavarivanja

Uzorak	Broj obrtaja $n$ min <sup>-1</sup>	Brzina zavarivanja $v$ mm/min	Odnos $n/v$ obr/mm
A – I	750	73	10,27
B – II		116	6,47
C – III		150	5

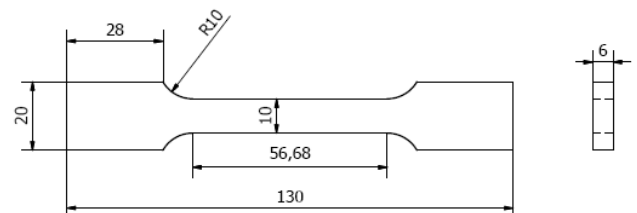
Kada je proces zavarivanja završen, primenjena je vizuelna i radiografska kontrola lica i korena zavarenih uzoraka. Prilikom ovih ispitivanja, nisu uočene greške zavarivanja.

Iz zavarenih uzorka ploča izrađene su epruvete za dalja ispitivanja. Šema po kojoj su pripremljene epruvete data je na slici. Izrađene su dve vrste epruveta, za ispitivanje zatezanjem i ispitivanja udarne žilavosti sa V žlebom u različitim zonama zavarenog spoja.

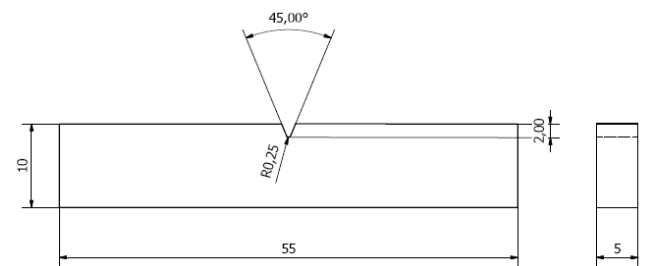


Slika 7 – Plan pripreme izrada epruveta za ispitivanje zavarenog spoja ostvarenog zavarivanjem trenjem sa mešanjem

Dimenzije epruveta za ispitivanje na zatezanje date su na slici 8, a dimenzije epruveta za ispitivanje udarne žilavosti na slici 9.



Slika 8 – Dimenzije epruvete za ispitivanje na zatezanje



Slika 9 -Dimenzije epruveta za ispitivanje udarne žilavosti testom prema Šarpiju

Deo izrađenih epruveta date su na slici 10. Ispitivanje zatezanjem rađeno je na sobnoj temperaturi pri brzini naprežanja  $3,3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , u skladu sa standardom ASTM E8M na poprečno opterećenim uzorcima. Ispitivana su po dva uzorka kako bi bilo moguće pratiti prosečne vrednosti. Ispitivanje savijanjem rađeno je uskladu sa EN 910 standardom. Savijanje je rađeno i sa strane lica zavara i sa strane korena zavara. Rezultati ispitivanja su dati u tabeli 4.



Slika 10 –Epruveta za ispitivanje zavarenih spojeva na zatezanje i testom za ispitivanje udarne žilavosti po Šarpiju

Tabela 4 – Dijagrami  $\sigma$ - $\epsilon$  dobijeni ispitivanjem zatezanjem za zavarene spojeve ostvarene različitim parametrima zavarivanja

	750/73
	$R_{p0,2}=281,9$ MPa
	$R_m=371,00$ MPa
	Z=2,29%
	750/116
	$R_{p0,2}=330,9$ MPa
	$R_m=469,06$ MPa
	Z=7,43%
	750/150
	$R_{p0,2}=337,6$ MPa
	$R_m=352,03$ MPa
	Z=0,33%

Metalografska ispitivanja vršena su optičkom mikroskopijom (OM) na optičkom mikroskopu Leica M205A. Epruvete su polirane pomoću Tucekr-ovog reagensa (45 ml HCl, 15 ml HNO<sub>3</sub>, 5 ml HF and 25 ml H<sub>2</sub>O). Makrostruktura zavarenih uzoraka je data u tabeli 5.

Tabela 5 – Makrostruktura zavarenih uzoraka

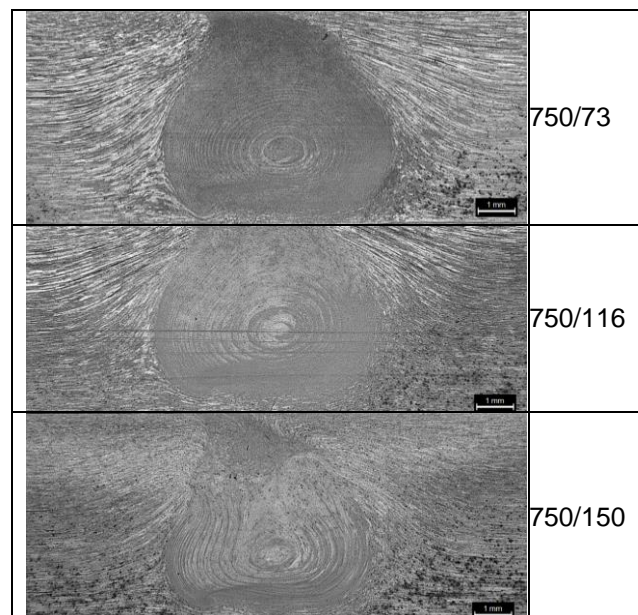


Tabela 6 – Rezultati ispitivanja udarne žilavosti zavarenih uzoraka testom prema Šarpiju

	750/73
	E=7.8 J
	e=19.5 J/cm <sup>2</sup>
	Ei=2.88 J
	750/116
	E=8.34 J
	e=20.85 J/cm <sup>2</sup>
	Ei=3.19 J
	750/150
	E=6.91 J
	e=17.28 J/cm <sup>2</sup>
	Ei=0 J
	750/150
	E=6.91 J
	e=17.28 J/cm <sup>2</sup>
	Ei=0 J

Ispitivanje udarne žilavosti je vršeno na instrumentiranom Šarpijevom klatnu. Definirana je energija udara i specifična udarna žilavost. Zahvaljujući ispitivanju na instrumentiranom klatnu, ispitivanjem je određena energija inicijacije prsline  $E_i$  i energija propagacije (rasta) prsline  $E_p$ .

Bitna karakteristika zavareni spojeva je i svojstvo savijanja. U tabeli 7 dati su rezultati ispitivanja na savijanje zavarenih uzoraka različitim parametrima zavarivanja.

**Tabela 7 – Rezultati ispitivanja svojstva savijanja zavarenih uzoraka**

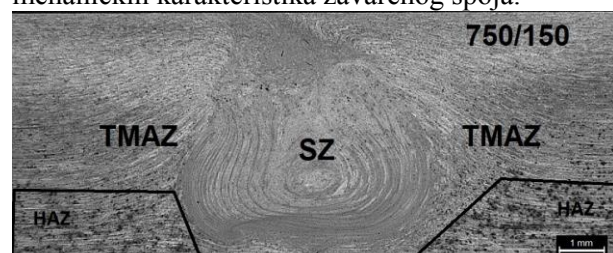
	750/73
	Ugao savijanja
	24°
	750/116
	Ugao savijanja
	42°
	750/150
	Ugao savijanja
	26°

#### 4. DISKUSIJA REZULTATA

Istraživanja su rađena sa FSW zavarenim uzorcima sa različitim parametrima zavarivanja. Svi uzorci su zavareni pri istoj brzini rotacije alata 750  $\text{min}^{-1}$ . Brzina zavarivanja je menjana i iznosila je 73, 116 i 150  $\text{mm/min}$ . Ispitivanjem bez razaranja (vizuelno i radiografsko ispitivanje) svih FSW zavarenih uzoraka u zavarenim spojevima nisu detektovane greške. U zavisnosti od parametara zavarivanja primećene su različite zone mešanja (SZ) (tabela 5).

Pri najnižoj brzini zavarivanja, ulazna energija je bila najveća – uzorak A-I, i obrnuto, sa najvećom

brzinom zavarivanja, energija je bila najmanja – uzorak C-III. I u jednoj i drugoj situaciji u donjoj zoni TMAZ pojavljuju se mikro pore. Znatno više mikro pora javlja se pri najvećoj brzini zavarivanja. Sa velikim unosom toplote, odnosno sa niskom brzinom zavarivanja, dolazi do intenzivnog mešanja materijala i kretanja materijala prema gornjoj površini. Pri zavarivanju velikim brzinama, suprotno je prethodnom nedovoljnom mešanju materijala, što takođe dovodi do veće proizvodnje mikro pora u donjoj zoni HAZ (slika 11). Pojava mikro pora u strukturi zavarenog spoja utiče na pogoršanje mehaničkih karakteristika zavarenog spoja.

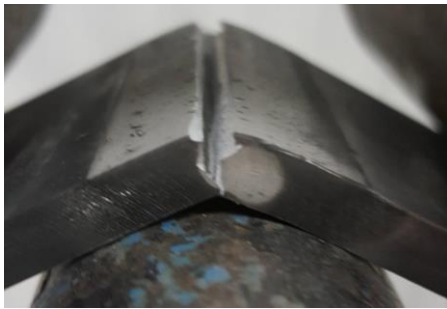


**Slika 11 – Makrostruktura FSW spoja parametara zavarivanja 750/150 sa mikroporama u zoni uticaja toplote HAZ**

Rezultati ispitivanja zavarenih spojeva ostvarenih različitim parametrima zavarivanja (tabela 4) su pokazali da najbolja svojstva granice tečenja i zatezne čvrstoće i duktilnosti imaju zavareni spojevi B-II ostvareni parametrima zavarivanja 750/116. Duktilnost uzoraka ostvarenih malom i velikom brzinom zavarivanja je izuzetno mala 2,29% i 0,33%. Zavareni spoj ostvaren parametrima zavarivanja 750/150 karakteriše krti lom, što pokazuju i rezultati ispitivanja udarne žilavosti gde je u ovom slučaju energija inicijacije prsline  $E_i=0$  J.

Slični rezultati su dobije i ispitivanjem epruveta zavarenih uzoraka na savijanje. Ispitivanje zavarenih spojeva vršeno je na savijanju, oko lica i oko korena. Zavareni FSW spoj ima slabe karakteristike savijanja. Poredeći rezultate dobijenih rezultata savijanja, najveći ugao savijanja kod prvog pojavljivanja prsline je za parametre zavarivanja 750/116 i iznosi 42 °. Saglasno rezultatim ispitivanja na zatezanje, zavareni uzorci koji su imali najveću duktilnost, imaju i najbolja svojstva na savijanje.

Interesantno je da su se svi prelomi FSW zavarenih spojeva pojavili na ili u blizini zone mešanja i TMAZ-a, kao što je prikazano na slici 12.



Slika 12. Oblik preloma pri ispitivanju na savijanje

Najbolje karakteristike udarne žilavosti imaju zavareni uzorak sa parametrima zavarivanja 750/116 i energijom udara od 8,34 J i specifičnom udarnom žilavošću od 20,85 J/cm<sup>2</sup>.

## 5. ZAKLJUČAK

Količina generisane toplote kod postupka FSW zavisi od mnogobrojnih parametara, kako svojstava materijala, triboloških uslova, tako i od kinematsko-tehnološko-geometrijskih uslova pri kojima se formira zavareni spoj.

Najkritičnije mesto zavarenog spoja je deo koji se nalazi u ZTMU na vodećoj strani zavara, neposredno uz grumen.

Jasno izražene linije tečenja ukazuju na karakter i smer toka materijala pri odvijanju procesa zavarivanja.

Količina generisane toplote mora biti u odgovarajućim granicama jer usled procesa otpuštanja dolazi do degradacije materijala.

Formiranje kvalitetnog spoja uslovljeno je odgovarajućim odnosom brzine rotacije alata i brzine zavarivanja te je za dobijanje spoja zadovoljavajućeg kvaliteta neophodno usaglasiti zahteve za minimalno potrebnom količinom unete toplote u zavar a pri tom održati odgovarajući odnos brzina.

## LITERATURA

- [1] *Friction stir butt welding*, W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P. Temple-Smith, C.J. Dawes, GB Patent No. 9125978.8, International patent application No. PCT/GB92/02203, (1991).
- [2] *Osnovni pojmovi kod postupaka zavarivanja trenjem sa mešanjem prema AWS D17.3/D17.3M:2010 I ISO 25239-1* M. Mijajlović, D. Milčić, M. Đurđanović, V. Grabulov, A. Živković, M. Perović, 2011, ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE, 2/2012, str. 61-68.
- [3] *Influence of Processing Parameters on Induced Energy, Mechanical and Corrosion Properties of FSW Butt Joint of 7475 AA*, R. K. Gupta, H. Das, T. K. Pal, JMEPEG (2012) 21, pp.1645–1654
- [4] *Microstructural Investigation of Friction Stir Welded 7050-T651 alloy*, J.Q. Su, T.W. Nelson, R. Mishra, and M. Mahoney, Acta Mater., 2003, 51, p 713–729
- [5] *Materials science and engineering*, Z. Y. Ma and R. S. Mishra, "Friction stir welding and processing, vol. 1, no. 1, August 2005, pp. 1-78.
- [6] *Experimental investigation of the influence of the FSW plunge processing parameters on the maximum generated force and torque*, S. Zimmer, L. Langlois, J. Laye, R. Bigot, Int J Adv Manuf Technol (2010) 47, pp.201–215
- [7] *Evaluation of parameters of friction stir welding for aluminium AA6351 alloy*, A. K. Hussain, International journal of engineering science and technology, vol. 2, no. 10, 2010, pp. 5977-5984.
- [8] *Microstructural evolution in the friction stir welded 6061 aluminum alloy (T6-temper condition) to copper*, J. Ouyang, E. Yarrapareddy, R. Kovacevic, "Microstructural evolution in the friction stir welded 6061 aluminum alloy (T6-temper condition) to copper" Journal of Materials Processing Technology, 2006, 172, pp 110–122
- [9] *AWS D17.3/D17.3M: 200x Specification for Friction Stir Welding of Aluminium Alloys for Aerospace Hardware // An American National Standard*, American Welding Society/ Miami, Florida, January 2010, p. 60.
- [10] *Influence of pin geometry on mechanical and structural properties of butt friction stir welded 2024-T351 aluminum alloy*, I. Radisavljević, A. Živković, V. Grabulov, N. Radović, Hem. Ind. 69 (3), 2015., 323–330.
- [11] *Influence of kinematic factors of friction stir welding on the characteristics of welded joints of forged plates made of EN AW 7049 a aluminium alloy*, M. Perović, S. Baloš, D. Kozak, D. Bajić, T. Vuherer, Tehnical gazette 24, 3, 2017., 723-728.
- [12] *Structural connections for lightweight metallic structures*, P. Vilaça, W. Thomas, Friction Stir Welding Technology in: P.M.G.P Moreira, L.F.M da Silva, P.M.S.T. de Castro (Eds.), Adv. Struct. Mater. 8 (2012) 85-124.