

ZAVARIVANJE LEGURE ALUMINIJUMA 5086 FSW POSTUPKOM

Darko Bajić, Sanja Miljanić

Ključne riječi: FSW, trenje, čelo alata, trn alata, mehanička svojstva

Sažetak:

Pri konvencionalnim postupcima elektrolučnog zavarivanja aluminijuma i njegovih legura, pored velike visprenosti zavarivača, neophodna je kvalitetna priprema stranica spoja, dodatni elektrodni materijal, gasna zaštita zone zavarivanja i adekvatni parametri zavarivanja. Zahvaljujući razvoju principa FSW postupka, kvaliteta zavarivanja aluminija i njegovih legura, prije svega, zavisi od geometrije alata za zavarivanje i parametara zavarivanja: brzine rotacije, aksijalne sile i brzine translatornog kretanja alata.

FSW WELDING ALUMINIUM ALLOYS 5086

Key words: FSW, friction, shoulder, pin, mechanical properties

Abstract:

In conventional methods of electric arc welding of aluminum and its alloys, beside the great capacity and knowledge of welder, it is necessary a great quality of preparation of welded joint edges, extra material for electrode, gas protection of the welding zone, and adequate parameters of welding. Thanks to the development of the principles of FSW method, welding quality of aluminum and its alloys it primary dependens on geometry of tools and welding parameters: rotation speed, axial force and translational speed of tool.

1. UVOD

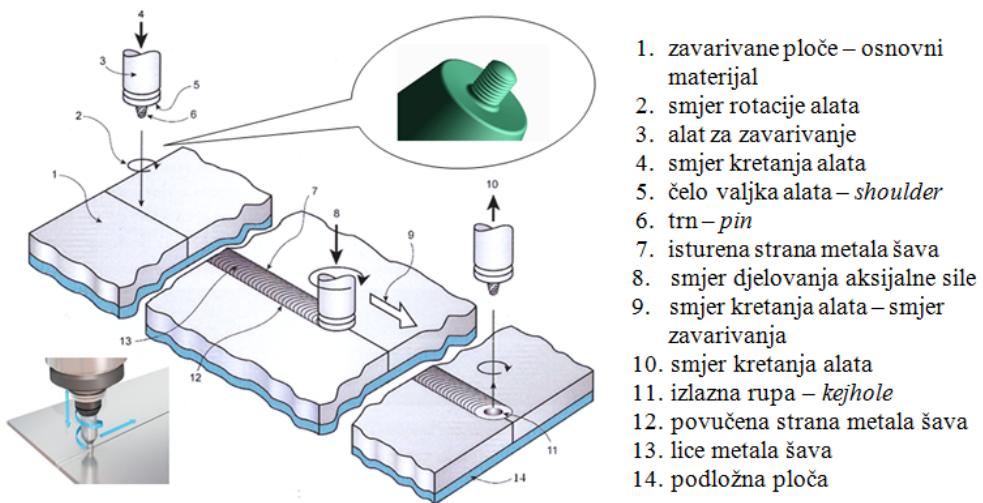
Zavarivanje trenjem koristi kombinaciju toplotne i mehaničke energije tako što se trenjem između dva elementa dobiva toplina na dodirnim površinama. Bar jedan od ova dva elementa mora vršiti rotaciono kretanje. Oslobođena toplota na kontaktnoj površini dva elementa materijal u tjestasto stanje, a djelovanjem osne sile ostvaruje se zavareni spoj.

Zahvaljujući istiskivanju dijela materijala, u tom vijencu izbacuju se oksidi i nečistoće, pa je mikrostruktura spoja povoljna. Kod elemenata kvadratnog poprečnog presjeka, primjenom tehnike rotacije jednog ili oba elementa daje rezultate i moguće je izvršiti spajanje materijala pod uslovom da im se poduzeće ose poklapaju.

Zavisno od raspoložive opreme, elemente pravougaonog poprečnog presjeka je takođe moguće zavariti trenjem. Potrebna toplota se generiše pomjeranjem, najčešće jednog elementa ili istovremeno suprotnosmjerno pomjeranje oba radna elementa.

Zavarivanje trenjem miješanjem ili FSW zavarivanje (*eng. Friction Stir Welding*) patentirano je 1991. godine od strane The Welding Institute of Cambridge U.K. (TWI). Prvenstveno je bilo namjenjeno zavarivanju aluminijuma i kao takvo je patentirano. Usled habanja alata za zavarivanje, postupak se najviše komercijalno koristi za zavarivanje mekih materijala: aluminijuma, bakra, cinka, magnezijuma, a u posljednje vrijeme i jednog broja čeličnih materijala.

Zahvaljujući razvoju, prije svega novih materija i mašina alatki, FSW postupak ima primjenu praktično u svim granama industrije, a posebno u avio, željezničkoj, automobilskoj i procesnoj industriji. Shematski prikaz FSW postupka zavarivanja dat je na slici 1.



Slika 1. Shematski prikaz zavarivanja trenjem miješanjem [1,2]

2. UTICAJNI PARAMETRI FSW POSTUPKA

Kvalitetu zavarenih spojeva izvedenih postupkom zavarivanja trenjem sa miješanjem determiniran je s više parametara kao i karakteristikama materijala koji učestvuju u procesu zavarivanja. Determinišući parametri i karakteristike materijala utiču na brzinu i količinu generiranje toplote, temperaturno polje, temperaturu hlađenja, obrtni moment i snagu. Najveći utjecaj na kvalitetu zavarivanja trenjem miješanjem imaju sljedeći parametri [3-8]:

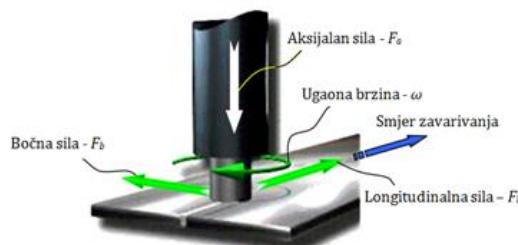
- Brzina obrtanja alata,
- Brzina zavarivanja – translatorna brzina,
- Sila u pravcu ose alata – aksijalna sila ,
- Nagibni ugao alata,
- Odnos brzine rotacije i brzine zavarivanja,
- Geometrija alata.

Tri osnovna parametra su:

Brzina obrtanja alata (ugaona brzina- ω): tokom procesa FSW zavarivanja je konstantna ($100 \div 1\,600$ o/min), jer svaka promjena predstavlja rizik koji dovodi do oštećenja alata.

Translatorna brzina: je brzina zavarivanja također. Njen izbor zavisi prvenstveno od mehaničkih svojstava zavarivanog materijala i njegove debljine, kao i od usvojene brzine obrtanja alata.

Aksijalna sila (F_a): omogućava prodiranje alata u osnovni materijal (slika 2). Maksimalnu vrijednost se postiže u trenutku prodiranja trna kroz materijal koji se zavaruje, a minimalnu vrijednost na završetku faze prodiranja, kada se formira početna rupa (eng. Keyhole). U literaturi se aksijalna sila često naziva i sila zavarivanja.



Slika 2. Sile koje djeluju na alat tokom procesa zavarivanja [1]

Da bi se dobio kvalitetno zavareni spoj FSW postupkom potrebna je optimalna kombinacija vrijednosti navedenih parametara koje je za sada isključivo moguće utvrditi eksperimentalnim metodama. Termo - fizičke karakteristike materijala koji se zavaruju i njihova debljina su dva osnovna faktora koja utiču na vrijednost parametara. Proces FSW zavarivanja dva radna elementa se odvija kroz dvije faze [1]:

- generisanje toplote u osnovnom materijalu i
- zavarivanje.

U prvoj fazi, alat vrši obrtno kretanje ugaonom brzinom većom od 600 o/min i translatorno se kreće prema radnim elementima. Pri prodiranju alata kroz materijal radnih elemenata javljaju se sile otpora velikog intenziteta, pa je neophodno posebnu pažnju posvetiti fiksiranju radnih elemenata (slika 3). Na samom početku procesa, neophodna je aksijalna sila koja treba da omogući, u sudjelovanjem sa generiranim topotom, prodiranje alata u osnovni materijal. S povećanjem vremena kontakta alata i radnih elemenata.

Na povećanje generirane toplote možemo uticati povećanjem prečnika valjka. Neophodno je zagrijavanje osnovnog materijala do njegove temperature tople plastične deformacije koja je $\approx 0.8 T_{topljenja}$. Prva faza FSW zavarivanja se završava potpunim provarivanjem radnih elemenata, koje se postiže kada trn (pin) alata prodre u OM na udaljenosti od $0,3 \div 0,6$ mm od njegove suprotne površine. Alat se pozicionira tako da je njegova podužna os upravna ili pod malim uglom unazad (do 3°) u odnosu na liniju spoja.

U drugoj fazi, sa postizanjem optimalne temperature osnovnog materijala alat ima složeno kretanje: pored konstantnog obrtnog, sada započinje i translatorno kretanje duž linije spoja dva radna elementa (osa trna se nalazi između limova). Tako nastaje monolitan spoj. Za formiranje korijenske strane šava koristi se pomoćna podložna ploča.

Osobine koje mora ispuniti svaki materijal od koga se pravi alat jesu: zatezna čvrstoća, otpornost na zamor, otpornost na habanje, žilavost, hemijska postojanost. Sve pomenute osobine moraju biti na višem nivou od osobina materijala koji se zavaruje. Najčešći materijali koji se koriste za zavarivanje aluminijuma i njegovih legura su: H13 alatni čelik, od volfram-kalcijum karbonata. Osim aluminijuma i aluminijskih legura ovim alatom moguće je zavariti i druge materijale, kao što su: bakar i njegove legure, titanijum i njegove legure, legure magnezijuma, legure olova, cink, legure nikla, konstrukcioni čelici, mikrolegirani čelici, austenitni čelici i dupleks čelici, polimeri [9, 10].

3. EKSPERIMENTALNI DIO

U toku procesa zavarivanja, kao osnovni materijal korišćena je legura aluminijuma AlMg4,5 ($\#4$ mm) čiji je proizvođač Kombinat aluminijuma Podgorica. Ovoj leguri, prema standardu odgovara legura ASTM 5086, a njena alternativa je ASTM 5083. Dobija se kontinualnim limom trake debljine 8 mm, koja služi kao polufabrikat za hladno valjanje.

Da bi se dobila traka od 4 mm, potrebno je izvesti jednu operaciju međusobnog žarenja zbog toga što traka smanjenjem debljine očvršćava. U zavisnosti od stanja materijala, mehaničke karakteristike istog imaju sledeće vrijednosti [11]:

- **napon na granici tečenja $R_{p0,2}$** : $125 \div 295$ MPa;
- **zatezna čvrstoća R_m** : $265 \div 340$ MPa;
- **izduženje pri lomu A** : $9 \div 23$ %;

Hemijski sastav legure ASTM 5086 dat je u tabeli 1

Tabela 1. Hemijski sastav legure ASTM 5086 [11]

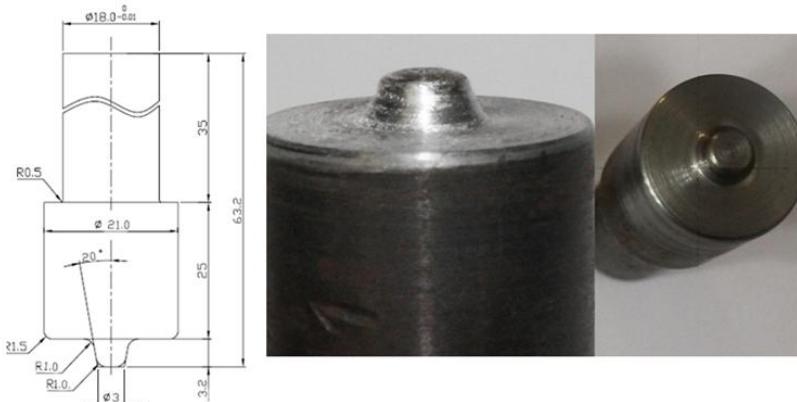
Legura	Maseni udio, %								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
ASTM 5086	0,40	0,50	0,1	0,20÷0,70	3,50÷4,50	0,05÷0,25	0,25	0,15	ostatak

Alati korišteni u eksperimentalnom dijelu FSW zavarivanja izrađeni su od kovačkog alatnog čelika 56NiCrMoV7 (DIN). Da bi se dobili alati sa zadovoljavajućim fizičko-mehaničkim karakteristikama, nakon strojne obrade podvrgnuti su termičkoj obradi (kaljenje + 2 x opuštanje). Izlaganjem na temperaturi od 850 °C u trajanju od 1,5 sata i hlađenjem u ulju izvršen je proces kaljenja, dok se proces popuštanja na temperaturi od 400 °C vršio u trajanju od 2 h, uz naknadno hlađenje na sobnoj temperaturi i bez strujanja zraka.

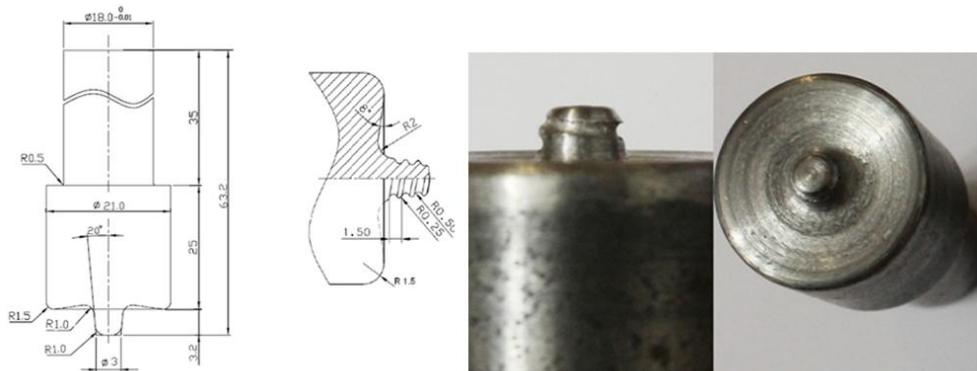
Geometrijske karakteristike korištenih alata u eksperimentalnom dijelu rada date su u tablici 2, a na slikama 4 - 6 prikazani su crteži i slike alata.

Tabela 2. Geometrijski parametri i opis alata za izvođenje eksperimenta [12]

Oznaka alata	Prečnik čela alata, mm	Ugao trna alata, °	Opis čela alata	Opis trna apata
A1	21	20	Ravno i glatko	Glatki konus
A2	21	20	Konkavno i glatko	Konus sa lijevom zavoјnicom
A3	21	20	Ravno sa koncentričnim krugovima	Konus sa pravim žljebovima



Slika 4. Alat A1 [12]



Slika 5. Alat A2 [12]



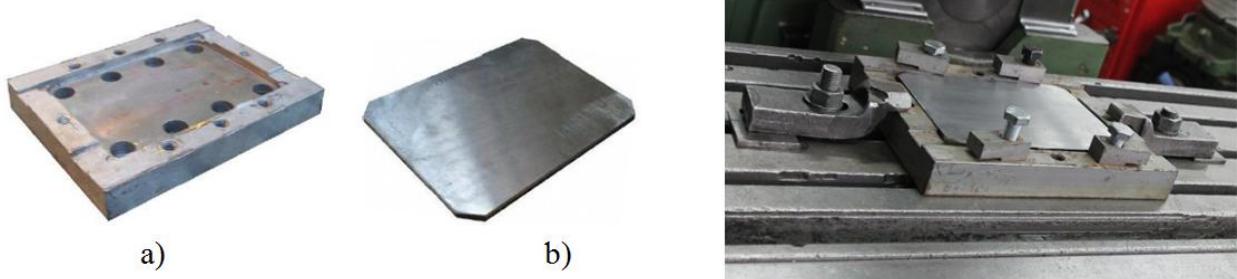
Slika 6. Alat A3 [12]

Ploče za zavarivanje 180x65x4 mm dobivene su tehnološkim postupcima sječenja škarama i obradom skidanjem strugotine na glodalici. Eksperimentalno je utvrđeno je da su optimalni parametri za zavarivanje trenjem mijеšanjem radnog materijala ASTM 5086:

- brzina zavarivanja: $v = 63 \text{ mm/min}$,
- broj obrtaja: $n = 800 \text{ o/min}$,
- dubina prodiranja čela alata: $h = 0,2 \text{ mm}$ i
- nagibni ugao alata: $\alpha = 1,5^\circ$.

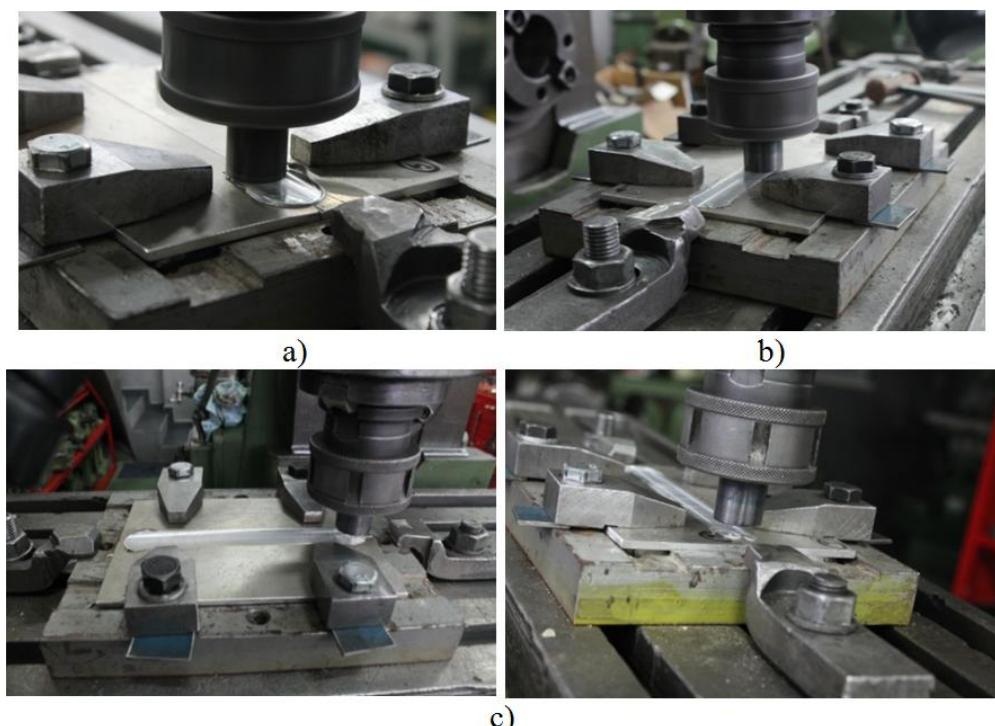
Eksperimentalno zavarivanje izvedeno je na univerzalnoj vertikalnoj glodalici sa stepenastom regulacijom broja obrtaja i posmaka. Snage elektromotora za pogon glavnog kretanja vertikalnog vretena od 11 kW, broj obrtaja 1600 o/min, prečnika vretena 63 mm, dimenzije stola 400x1000 mm.

Za radni sto pričvršćena je podložna ploča dimenzija 300x200x25 mm, od čelika za poboljšanje 42 CrM04, termički obrađenog na 850 MPa i površinski okaljenog na $44 \pm 2 \text{ HRC}$ (slika 7 a i b).

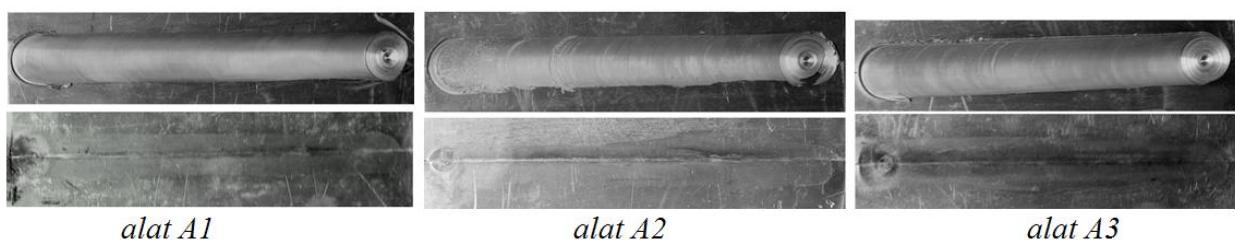


Slika 7. Dodatni alat za zavarivanje: a) podložna ploča, b) pomoćna podložna ploča [12]

Na slici 8 prikazane su faze zavarivanja, a na slici 9 izgled realizovanih zavarenih spojeva upotreboom tri alata.



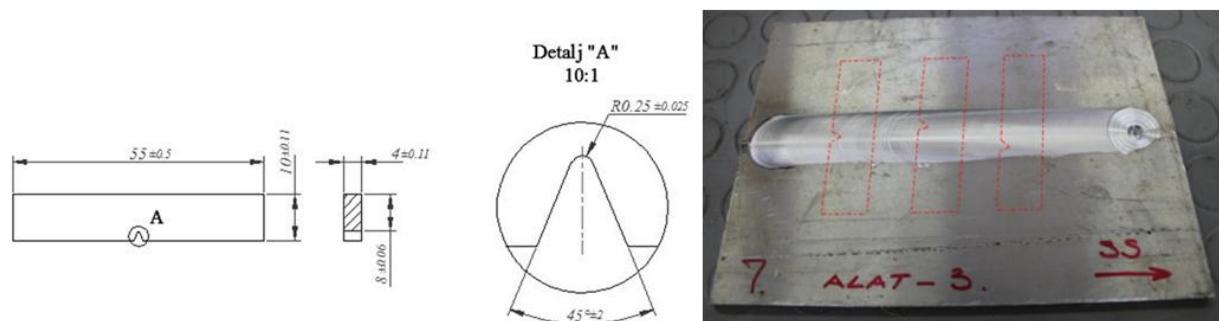
Slika 8. Početak zavarivanja (a), tokom zavarivanja (b) i završetak zavarivanja (c) [12]



Slika 9. Dobiveni zavareni spoj FSW postupkom primjenom različitih alata [12]

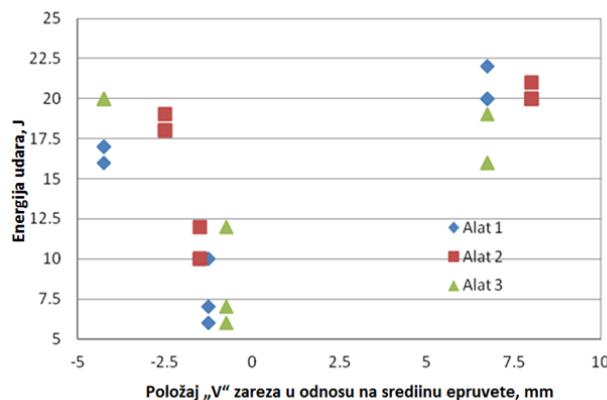
3.1 Ispitivanje žilavosti zavarenih spojeva

U cilju ispitivanja žilavosti dobijenih alatima A1, A2 i A3, Water Jet tehnologijom uzorkovane su epruvete prema standardu EN 895. Nakon toga, epruvetama su na glodalici napravljeni V - zarezi, na sredini metala šava (zona grumena, ZTMU), na lijevoj i u desnoj polovini šava, za svaki alat (slika 10) [12].

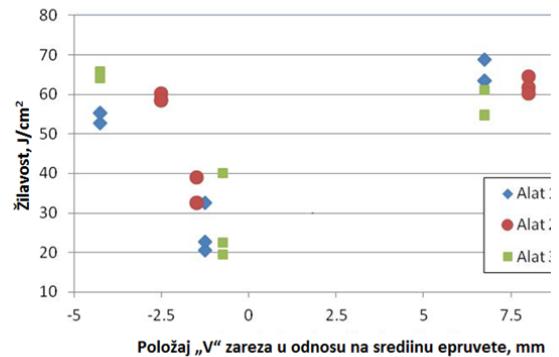


Slika 10. Geometrija epruveta za određivanje žilavosti materijala i prikaz njihovog uzorkovanja

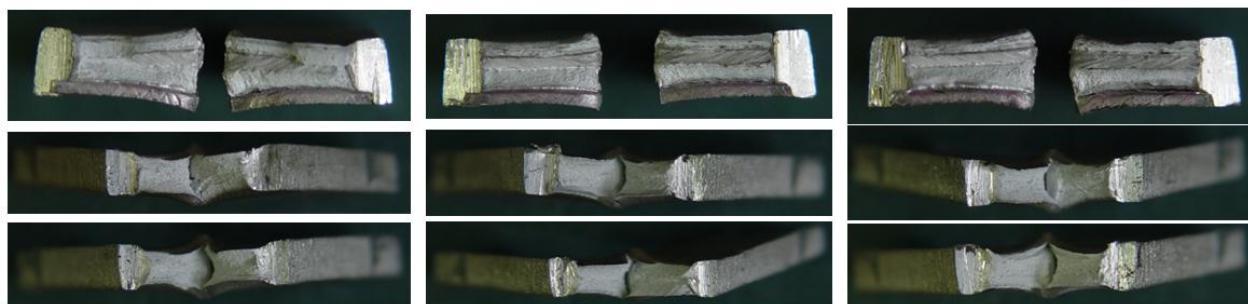
Ispitivanje žilavosti je izvršeno prema standardu EN 10045, a određivana su dva parametra: energija udara (slika 11) i žilavost (slika 12) [12]. Ispitivanje žilavosti urađeno je na Charpijevom klatnu. Karakteristični oblici površine loma epruveta, prikazani su na slikama 13 - 15 [12].



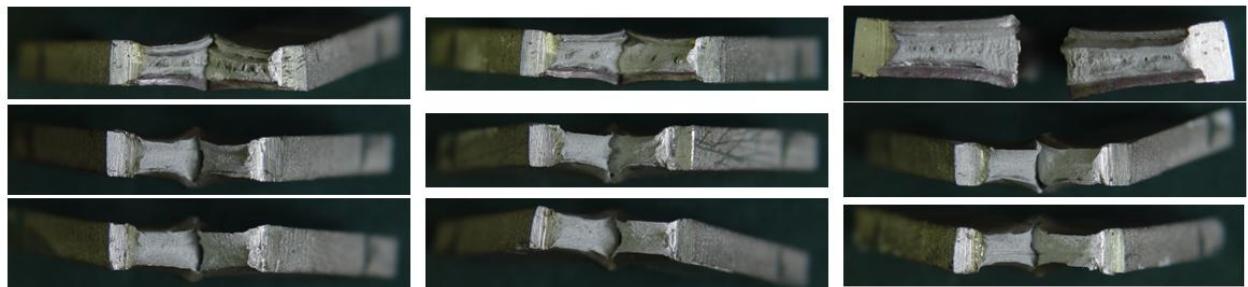
Slika 11. Energije udara zavarenih spojeva dobivenih korištenjem alata A1, A2, A3



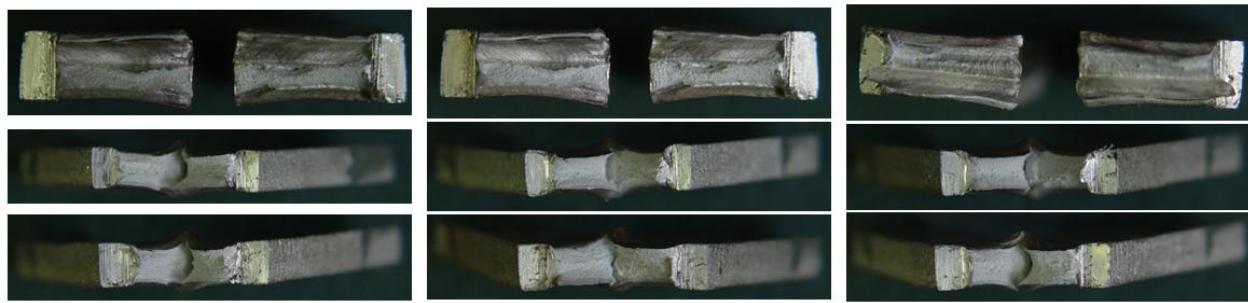
Slika 12. Žilavost zavarenih spojeva dobijenih korišćenjem alata A1, A2, A3



Slika 13. Površine loma epruveta (alat A1)



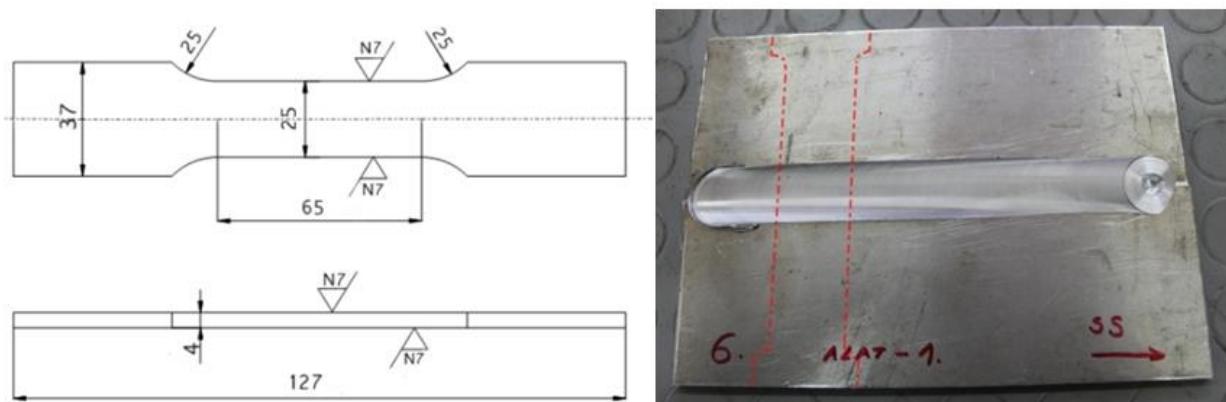
Slika 14. Površine loma epruveta (alat A2)



Slika 15. Površine loma epruveta (alat A3)

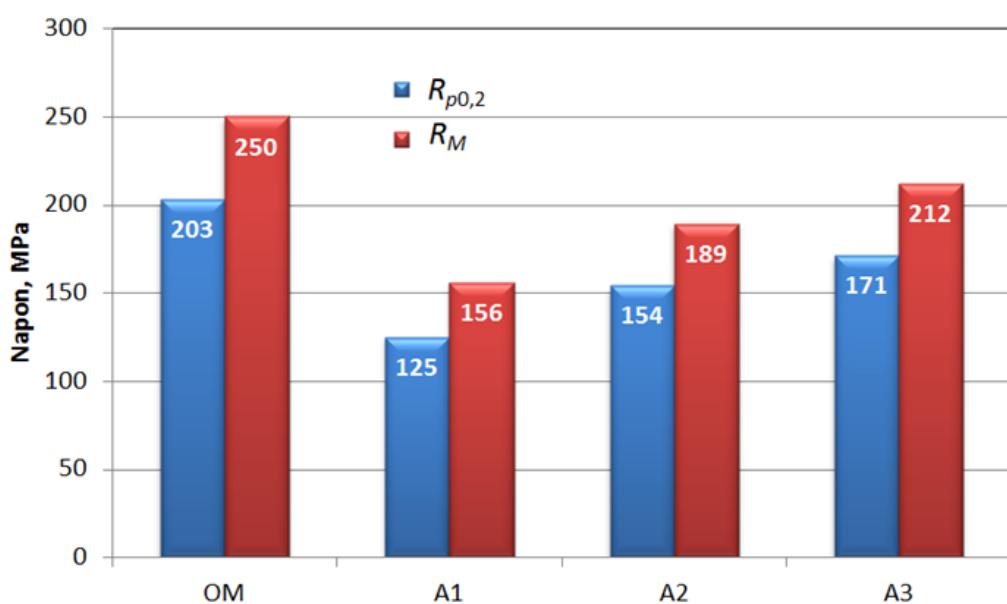
3.2 Određivanje $R_{p0,2}$ i R_M zavarenih spojeva

Water Jet tehnologijom uzorkovane su epruvete čije su dimenzije prikazane na slici 16.



Slika 16. Geometrija epruveta za određivanje $R_{p0,2}$ i R_M i prikaz njihovog uzorkovanja [12]

Ispitivanje je izvršeno prema standardu MEST EN 6892-1:2012 (slika 17). Na slici 18 prikazane su karakteristične epruvete prije i nakon ispitivanja zatezanjem.



Slika 17. Dobiveni rezultati $R_{p0,2}$ i R_M korištenjem alata A1, A2, A3 pri zavarivanju [12]



Slika 18. Izgled epruveta prije i nakon ispitivanja [12]

4. ZAKLJUČAK

Vizualnim pregledom polomljenih epruveta ispitivanih Charpijevim klatnom uočava se značajna razlika u mehanizmima nastanka loma. Orientacija prekida u zoni grumena je pravilna i bez elemenata čupanja materijala. Kod površina nastalih prekidom epruveta u ZTMU, bez obzira da li se radi o istosmjernoj ili suprotnosmjernoj strani, uočavaju se tragovi razvlačenja materijala, što predstavlja posledicu metalurških transformacija koje se odvijaju u zavisnosti od stepena mehaničke deformacije i toplotne raspodjele.

Kada je pitanju usporedna analiza vrijednosti zatezne čvrstoće i granice tečenja, ove vrijednosti su povoljne kod spojeva ostvarenih alatima A_2 i A_3 . Objasnjenje se može naći u činjenici da ova dva alata generišu veću količinu toplote i bolje miješanje materijala uz redukciju njegovog istiskivanja.

5. LITERATURA

- [1] D.Bajić: Postupci zavarivanja, Univerzitetski udžbenik, Univerzitet Crne Gore, Mašinski fakultet, Podgorica, 2014, page 326, ISBN 978-9940-527-38-9, COBISS.CG-ID 25645840.
- [2] ISO/DIS 25239-1 Friction stir welding - Aluminium - Part 1: Vocabulary
- [3] Jonathan Baggs, "Marshall Star", Serving the Marshall Space Flight Center Community (Jan.24, 2002)
- [4] D.Stamenković, M.Đurđanović, D.Mitić: Zavarivanje postupkom FSW, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, Br. 2, str. 59 – 66, 2006.
- [5] R. Nandan, T. DebRoy and H. K. D. H. Bhadeshia, Recent Advances in Friction Stir Welding – Process, Weldment Structure and Properties. Progress in Materials Science, 53 (2008) 980-1023.str
- [6] Dong P, Lu F, Hong JK, Cao, Analysis of Weld Formation Process in Friction Stir Welding, 1st International Symposium on Friction Stir Welding @ Thousand Oaks, Cal June 1999.
- [7] Y. Sato, M. Urata, H. Kokawa. Parameters controlling microstructure and hardness during friction-stir welding of precipitation-hardenable aluminum alloy 6063. Metallurgical & Materials Transactions A, 33(3):625–635, 2002.
- [8] M. J. Peel, A. Steuwer, P. J. Withers, T. Dickerson, Q. Shi, and H. Shercliff. Dissimilar friction stir welds in AA5083-AA6082. part 1: Process parameter effects on thermal history and weld properties. Metallurgical and Materials Transactions A, 37A(7):2183–2193, 2006.
- [9] D.Veljić: Tehnologija zavarivanja aluminijumskih legura trenjem pomoću alata, magistarski rad, Mašinski fakultet, Beograd, 2006.
- [10] M. Santella, G. Grant, W. Arbegast, " Plunge testing to evaluate tool materials for friction stir welding" in Proceedings of the Fourth International Symposium on Friction Stir Welding, Park City, Utah, USA, 14-16, May 2003.
- [11] D.Bajić: Ocena nosivosti zavarenih boca od legure aluminijum-magnezijum za skladištenje propan butana, Magistarski rad, Univerzitet Crne Gore, Mašinski fakultet, Podgorica, 1997.
- [12] S. Miljanjić: Uticaj oblika alata pri FSW postupku zavarivanja na kvalitet zavarenog spoja aluminijuma 5086, Magistarski rad, Univerzitet Crne Gore, Mašinski fakultet, Podgorica, 2014.