

**UTICAJ PARAMETARA ZAVARIVANJA TRENJEM SA MEŠANJEM  
SAMOPODESIVIM ALATOM NA EFIKASNOST SPOJA****INFLUENCE OF FRICTION STIR WELDING PARAMETERS WITH SELF-REACTIVE  
TOOL ON JOINT EFFICIENCY**Kristofer Solar, Sebastian Baloš, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – MAŠINSTVO**

**Kratak sadržaj** – U radu je prikazan postupak zavarivanja trenjem sa mešanjem sa samopodesivim alatom. Navedena je problematika korišćenih materijala, geometrija i kinematika alata. Posebna pažnja je poklonjena alatima sa kalemom, odnosno, dvostranim alatima koji igraju i ulogu pribora i vrše zavarivanje osnovnog materijala sa obe strane formirajući i lice i naličje šava. Eksperimentalni rad je izvršen na šest uzoraka, sa dve geometrije alata, tri različite brzine obrtanja alata, uz jednaku brzinu zavarivanja, na tehnički čistom aluminijumu. Rezultati su pokazali da se kvalitetniji zavareni spojevi dobijaju u slučaju upotrebe alata sa većim uglom ramena i sa većom brzinom obrtanja alata.

**Ključne reči:** zavarivanje trenjem sa mešanjem, samopodesivi alat, mehaničke osobine, mikrostruktura

**Abstract** – In this work, friction stir welding with self-reacting tool is presented. Materials used for friction stir welding tools are presented, as well as the geometry and tool kinematics. A special attention is paid to self-reacting tools, two sided tools that also act as base plate and weld the base material by forming both the face and the root of the weld. Experimental work was done on six specimens, with two tool geometries, three different rotational speeds and a single welding speed, on technical aluminium. The results shown that a higher weld quality was obtained by applying the tool with a higher shoulder angle and a higher rotational speed.

**Keywords:** friction stir welding, self-reacting tool, mechanical properties, microstructure

**1. UVOD**

U mašinstvu posebnu pažnju dobijaju razvoj i praktična primena tehnologija, koje omogućavaju spajanje materijala. Toj oblasti pripadaju i različite tehnologije zavarivanja.

„Zavarivanje je proces nerastvorljivog spajanja istorodnih ili raznorodnih materijala, koje stvaraju međuatomske sile“ [1]. Zavarivanje trenjem sa mešanjem (eng. friction stir velding) je relativno nov postupak zvarivanja. Otkriven je 1991. godine na institutu The Wleding Institut (TWI). Metoda je postala revolucionarna

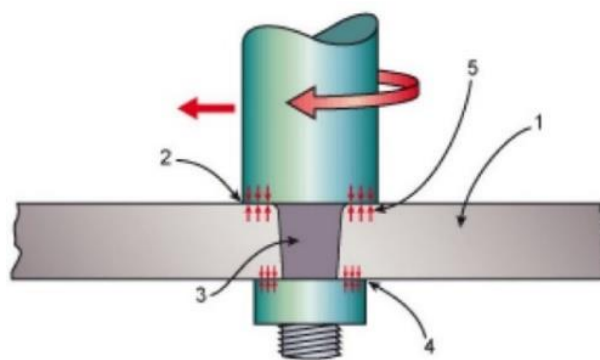
**NAPOMENA:**

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji je mentor dr Sebastian Baloš, red.prof.

za zavarivanje teško zavarljivih materijala, kao što su pojedine legure aluminijuma, magnezijuma i raznorodnih materijala. Trenutno je metoda široko primenjena u raznim industrijama, na primer avio, svemirskoj, železničkoj, automobilskoj industriji, kao i u brodogradnji [2].

Zavarivanje trenjem sa mešanjem (ZTM) je postupak koji se izvodi pod visokim pritiscima, pri temperaturama od oko  $0,8T_{toplj}$ , pri čemu je materijal u čvrstom stanju, ali razmekšan. Toplota i zavareni spoj se ostvaruju pomoću namenskog alata. Alat čine čeona površina i trn alata, koji dolaze u kontakt sa osnovnim materijalom (OM). Zavareni spoj se realizuje pomoću toplote, koja se generiše trenjem zbog translatornog i rotirajućeg kretanja alata i mešanjem koji vrši trn alata (slika 1) [3,4,5].

Samopodesivi alat (alat u obliku kalema) sastavljen je od dva čela, gornjeg (sa strane lica šava) i donjeg (sa strane naličja šava). Radne površine su spojene trnom, slika 1 [6].



Slika 1. Šema alata u obliku kalema: 1- osnovni materijal, 2- čelo gornjeg dela, 3-trn, 4- čelo donjeg dela, 5- reaktivne sile [7]

**2. EKSPERIMENTALNI DEO**

Cilj eksperimentalnog dela je dobijanje kvalitetnog zavarenog spoja bez tunela i drugih grešaka, primenom ZTM sa samopodesivim alatom.

Za istraživanje, upotrebljen je tehnički čist aluminijum ploče debljine 4,9 milimetara. Pomoću hemijske analize postupkom optičke emisije spektrometrije (OES) uređajem ARL3580, potvrđeno je da je materijal tehnički čisti aluminijum 98 %. Obavljeno je ispitivanje zateznih karakteristike OM-a na mehaničkoj kidalici WPM, model ZDM 5/91.

Tabela 1. Tehnički čist aluminijum 98 % [maseni %]

Cu	Mn	Mg	Si	Fe	Zn	Ti	Al
0,07	0,13	0,59	0,23	0,38	0,055	0,020	98,5

Tabela 2. Rezultati ispitivanja tehnički čistog aluminijuma oznaka Al 98 %

Redni broj epruvete	Rm [MPa]	Rp0,2 [%]	A [%]	Z [%]	HV 0.1
1.	139,9	122,4	20	64,2	41,9
2.	143,5	127,5	16	62,7	42,6
3.	128,2	107	12,2	56,6	42,9
Srednja vrednost	137,3	119	16	61,2	42,4

Cilj je poboljšavanje toka mešanja, kao i kvaliteta šava. Nužno je izabrati najpovoljniji materijal za izradu, kako bi alat bio otporan na višestruka naprezanja kao što su: toplota, dinamičke sile, hemijski efekti itd. Izabrani materijal je alatni čelik za rad na toplo AISI H13 (EN X40CrMoV5-1, JUS Č4753, UTOP MO2).

Korišćeni su alati fiksne koncepcije, koja je sa aspekta izrade jeftina i jednostavna (slika 2). Rastojanje između dva čela, kao i pomeranje po vertikali je nepromenjivo. Čela su konveksna, sa uglom 2° kod alata A2 i 4° kod alata A4. Poprečni presek trna je kvadratni, dimenzija 6 x 6 mm i visine 4,5 mm. Alati su kaljeni u ulju i visokotemperaturno otpušteni.



Slika.2 Prikaz alata u obliku kalema A4 i A2

U eksperimentalnom delu rada korišćena je poluautomatizovana vertikalna glodalica tipa PRVOMAJSKA FSSGVK-3.

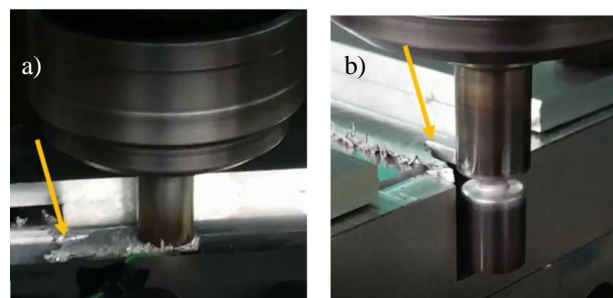
Brojevi obrtaja oba alata su bili 900, 1120, 1400 min<sup>-1</sup>, sa identičnim translatorskom brzinom kretanja. U tabeli 3 je prikazan i sistem označavanja uzoraka brojevima.

Ploče za ispitivanje su isečene na dimenzije 150mm x 60 mm i čelna površine obrađeni na glodalici kako bi dobilo naleganje bez zazora. Takođe, površine ploča su poravnane i debljina im je smanjena na 4,9 mm. Pre ZTM površine ploče su očišćene.

Nakon pripreme, ploče su stavljene i fiksirane u pribor. Potom sledi pozicioniranje alata i zavarivanje. Ulazni i izlazni žljeb je prikazan na slici 3.

Tabela 3. Parametri zavarivanja

Alat sa uglom čelone površine	Redni broj uzorka	Parametri ZTM	
		Broj obrtaja [min <sup>-1</sup> ]	Brzina zavarivanja (pomak) [mm/s]
A 2°	1	900	20
	2	1120	
	3	1400	
A 4°	4	900	
	5	1120	
	6	1400	



Slika 3. a) ulazni žljeb, b) izlazni žljeb

Na dobijenih uzorku su obavljene sledeće ispitivanje :

- Vizuelna kontrola se odnosi na izgled šava
- Ispitivanje zateznih karakteristika izvedeno je po standardu SRPS EN ISO 5178:2013.
- Ispitivanje na savijanje je urađeno prema standardu SRPS EN ISO 5173:2013.
- Ispitivanje tvrdoće je obavljeno prema standardu SRPS EN ISO 6507-1:2011.
- Metalografska ispitivanja su izvršena na svetlosnom mikroskopu
- Ispitivanje energije udara je urađeno prema standardu SRPS EN ISO 148-1 2016.

Od svakog uzorka, isečene su dve epruvete za ispitivanje zateznih karaktersitika, dve epruvete za ispitivanje energije udara, jedna za savijanje, jedna za metalografska ispitivanja, a na istoj toj je izvršeno i merenje mikrotvrdoće.

### 3. REZULTATI I DISKUSIJA

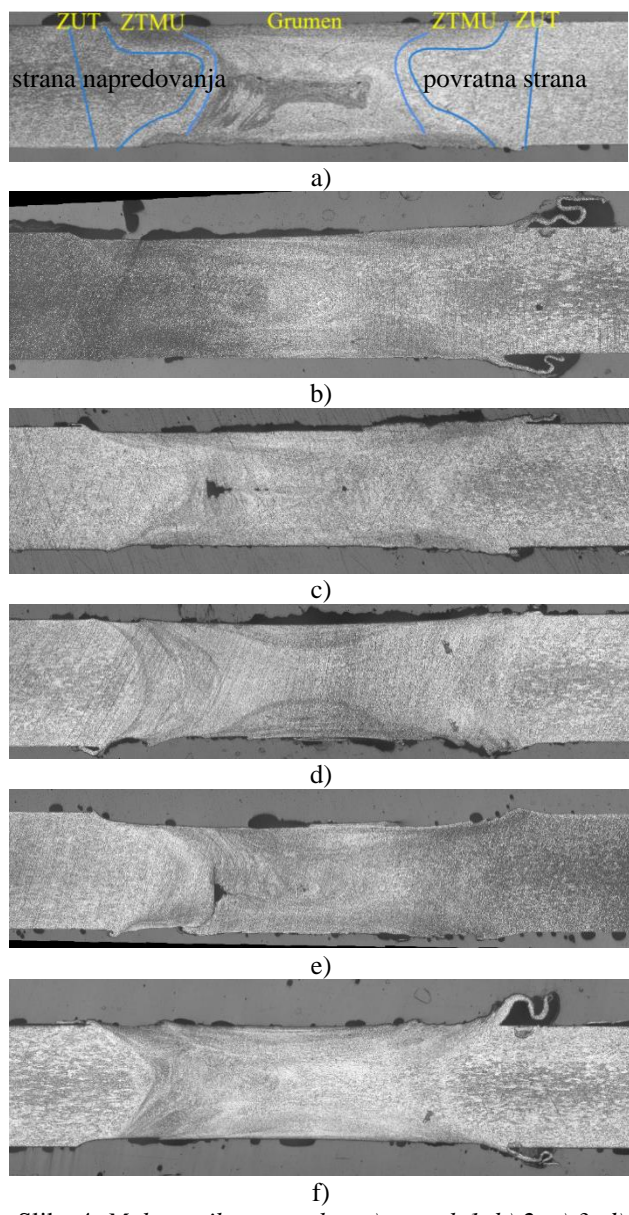
Na slici 4 je prikazan makro izgled šava sa različitim zonama (grumen, ZUT, ZTMU) koji je sličan kod svih uzoraka. Kod uzorka 3 and 5, prisutan je tunel, kod uzoraka 1, 2, i 4 mikrotuneli (svi na strani napredovanja, što je uobičajeno), dok je jedini uzorak bez tunela uzorak 6.

Grumen je uži na sredini i širi prema licu i korenu šava ima oblik peščanog sata. U grumenu je plastična deformacija najznačajnije izražena. Sastoji od reskristalizovane sitnozrne mikrostrukture, prikazano na slici 5a. U ZTMU pored grumena je prisutna mikrostruktura izduženih zrna kao rezultat kombinovanog dejstva toplote i plastične deformacija (slika 5b). U zoni ZUT (slika 5c) je prisutna rekristalizovana krupnozrna struktura.

Poređenjem rezultata zateznih čvrstoća, dobijeni rezultati ukazuju, da između upotrebe dva različita alata nema značajnih statističkih razlika.



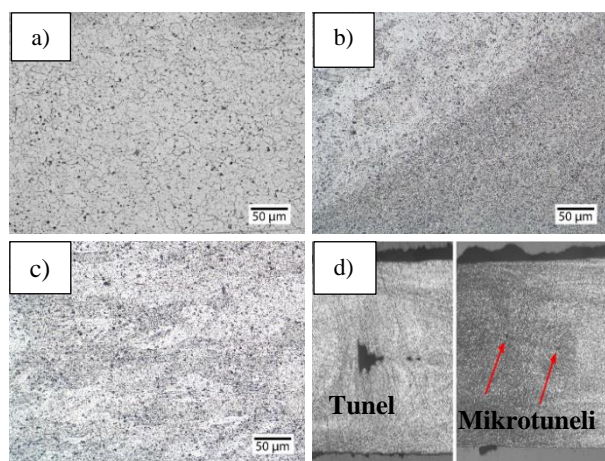
Mesto loma kod svih uzoraka je zona ZUT/ZTMU sa povratne strane (PS) (osim uzorci 3 i 5), koja predstavlja najkritičniji deo šava zbog smanjene brzine prerade materijala (brzina obrtanja i brzina zavarivanja se oduzimaju).



Slika 4. Makro prikaz uzoraka: a) uzorak 1, b) 2, c) 3, d) 4, e) 5, f) 6

Kod uzorka 3 i 5 došlo je do loma blizu sredine, sa napredne strane (NS) gde je primećen tunnel značajnih dimenzija od oko 1 mm. Na osnovu ovoga se konstatuje, da je zatezna čvrstoća u bliskoj vezi sa prisustvom tunela. Najveću srednju vrednost zatezne čvrstoće ima uzorak 5, koji je dobijen sa alatom A4, sa brojem obrtaja  $1120 \text{ min}^{-1}$ . Iako je primećen najveći tunnel kod uzorka 5, dobijene su više zatezne karakteristike. Jedno od objašnjenje je da je tunnel mestimičan i da kod uzoraka za zatezanje tunela nije bilo. Iako kod uzorka 6 nema tunela, zatezna čvrstoća je manja nego kod uzorka 4 i 5. Najverovatnij uzrok je veća temperatura usled većeg broja obrtaja koja je uzrokovala manju viskoznost tečnog metala i bolje popunjavanje prostora oko trna. U proseku, zatezne čvrstoće kod uzoraka dobijenih alatom A4 su veće nego kod uzoraka

dobijenih alatom A2, verovatno zbog većeg stepena deformacije zbog upotrebe alata sa većim uglom ramena. Pri ispitivanju savijanjem, pet uzoraka je savijano do  $180^\circ$  bez pojave prsline, a kod uzorka 5 se pojavila prsline pri  $14,3^\circ$ , tabela 5. Ovaj uzorak ima značajan tunnel koji je uzrok prsline, koji se širi prema korenu gde je prisutna greška tipa „kissing bond“, odnosno nepotpuno spajanje materijala., slika 4e. U poređenju sa zavarenim spojevima dobijenim konvencionalnim alatom bez donjeg ramena, gde se koren formira u interakciji trna i podložne ploče, kod samopodesivog alata, sam alat formira koren, što je znatno povoljnije, jer je takva izvedba kruća.



Slika 5. Mikrostrukturne karakteristike: a) grumena, b) ZTMU (dole desno) i ZUT (gore levo), c) osnovni materijal, d) tunela u uzorku 3 i mikrotuneli u uzorku 2

Tabela 4. Rezultati ispitivanja zatezanjem

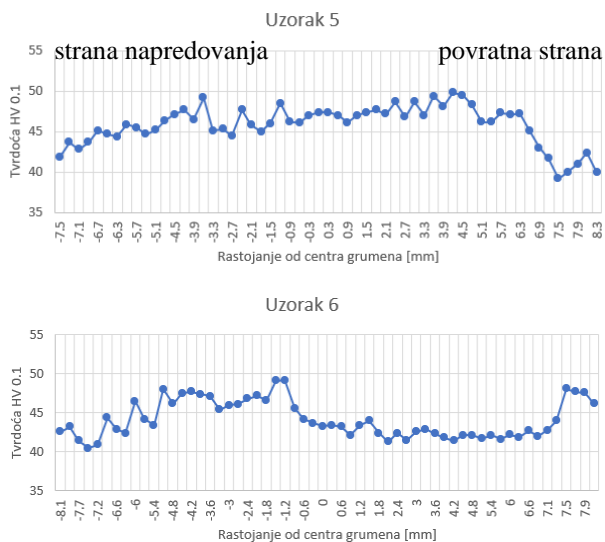
Alat	Uzorak	Srednja vrednost Rm [MPa]	Mesto loma	Strana loma
A 2°	1	112,10	ZUT/ZTMU	Povratna S.
	2	113,99	ZUT/ZTMU	Povratna S.
	3	110,88	grumen/ZTMU	S.Napredovanja
A 4°	4	114,44	ZUT/ZTMU	Povratna S.
	5	114,90	ZUT/ZTMU	Povratna S.
	6	112,36	ZUT/ZTMU	Povratna S.

Tabela 5. Prikaz podataka ispitivanjem savijanjem

Alat	Uzorak	Pojava prsline	Savijanje do $180^\circ$
A2	1	Nema prsline	Nema loma
	2	Nema prsline	Nema loma
	3	Nema prsline	Nema loma
A4	4	Nema prsline	Nema loma
	5	Prsline pri $14,3^\circ$	Nema loma
	6	Nema prsline	Nema loma

Na ispitivanim uzorcima, mikrotvrdoća je merena između lica i korena šava. Vrednosti su prikazane od rastojanja centra grumena, gde 0 označava centar grumena. Na uzorku 5, jasno se vidi da je na povratnoj strani tvrdoća nešto veća na povratnoj strani, dok je kod uzorka 6 obrnuto. Uobičajeno je da je tvrdoća veća na strani napredovanja, jer je u toj zoni intenzivnija deformacija zbog sabiranja brzine obrtanja alata i brzine zavarivanja. Međutim, kod uzorka 5 je verovatno prisutan uticaj tunela, odnosno, ivice materijala prema šupljini tunela.

Ista tendencija je primećena i kod uzorka 3, gde je takođe prisutan tunnel, dok je kod ostalih uzoraka raspodela kao kod uzorka 6. Takođe, vidi se da su tvrdoće u zonama šava veća u odnosu na osnovni materijal.



Slika 6. Rezultati ispitivanja mikrotvrdoće uzoraka 5 i 6

Šav dobijen sa ZTM poseduje povećanu otpornost na udarno opterećenje, tj. veću žilavost u odnosu na OM. Najveću vrednost ima šav uzorka 4, dobijen korišćenjem alata A4, sa parametrima broja obrtaja 1120 min<sup>-1</sup> i pomakom od 20 mm/min. U sledećoj tabeli su prikazane vrednosti energije udara OM i šava. Jasna je tendencija smanjenja energije udara sa povećanjem brzine obrtanja alata, takođe kao posledica povećanog unosa toplote i manjeg stepena usitnjavanja zrna. Izuzetak je uzorak 5, koji ima manju energiju udara u odnosu na uzorak 6, ali se u ovom slučaju može pretpostaviti da je na dobijenu vrednost energije udara uticala pojava tunela i kissing bond greške u korenu. Relativno niska vrednost je dobijena i kod uzorka 3, verovatno iz istog razloga.

Tabela 6. Rezultati ispitivanja energije udara

Alat	Broj uzorka	Energije udara, A [J]	
		OM	Grumen
A2	1	17,59	26,32
	2	19,41	24,55
	3	18,64	20,66
A4	4	18,64	27,79
	5	18,36	24,26
	6	19,60	25,43

#### 4. ZAKLJUČAK

Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti sledeće:

- Alat A4 se pokazao efikasnijim u odnosu na A2, jer veći ugao ramena izaziva povećan pritisak tokom procesa.
- Tunnel se pojavljuje najverovatnije mestimično i detektovan je na svim uzorcima osim uzorka 6 dobijenog najvećom brzinom obrtanja, sa najvećim pritiskom, odnosno, potencijalno najvećom temperaturom u procesu.
- Nema grešaka u korenu šava zahvaljujući dvostranom alatu, osim kod uzorka 5, gde je

dobijena greška tipa kissing bonds, što se manifestovalo pri savijanju.

- Tvrdoća šava je delimično ili po celom preseku veća nego OM, veća je na strani napredovanja, osim ako je prisutan tunnel većih dimenzija (uzorci 3 i 5)
- Šav dobijen sa alatom A4 sa brojem obrtaja 1400 min<sup>-1</sup> predstavlja optimalno rešenje.

#### 5. ZAHVALNOST

Rezultati prezentovani u ovom radu su realizovani u okviru projekta „Inovativni materijali i tehnologije spajanja“, Departmana za proizvodno mašinstvo, FTN, Novi Sad.

#### 6. Literatura:

- [1] V.M. Rübakov, N.P. Dimitrijević, *Acélszerkezetek hegesztése*, Műszaki könyvkiadó, Budapest 1968.
- [2] S. Baloš, L. Šidanin, D. Rajnović, V. Vučić, *Zavarivanje trenjem sa mešanjem*, XIX Konferencija o međulaboratorijskim ispitivanjima materijala, Užice 2.10.-4.10.2013, str. 66 – 72.
- [3] V. Palić, B. Sabo, *Tehnologija zavarivanja*, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, 2003.
- [4] S. Kralj, M. Bušić, Z. Kožuh, D. Klobčar, *Utjecaj oblika i dimenzija alata pri zavarivanju trenjem rotirajućim alatom*, Zavarivanje - Welding 2014, str. 296-306.
- [5] R. S. Mishra, M. W. Mahoney, *Friction stir welding and processing*, University of Missouri, Rolla, 2007, str. 6 – 25.
- [6] P. L. Threadgill, M. M. Z. Ahmed, J. P. Martin, J. G. Perrett and B. P. Wynne, *The use of bobbin tools for friction stir welding of aluminium alloys* - Thermec 2009. Berlin, Germany, 25 - 29 August 2009.

#### Kratka biografija:



**Kristofer Solar** rođen je u Senti 1995 god. Diplomski rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Proizvodno mašinstvo – Tehnologije spajanja odbranio 2018 god.



**Sebastian Baloš** rođen u Somboru 1974. god. Doktorirao je na Fakultetu tehničkih nauka 2010. god., a 2021. godine je biran u zvanje redovnog profesora iz oblasti Mašinsko inženjerstvo, tj. uže naučne oblasti Materijali i tehnologije spajanja.