

UTICAJ PARAMETARA FSW POSTUPKA ZAVARIVANJA NA KVALITET ZAVAREN OG SPOJA ALUMINIJUMSKE LEGURE 5052

INFLUENCE OF SOME FRICTION STIR WELDING PROCESS PARAMETERS ON AMOUNT OF HEAT GENERATED DURING THE WELDING PROCESS

MIROSLAV MIJAJLOVIĆ,
MAŠINSKI FAKULTET, NIŠ,
ALEKSANDAR ŽIVKOVIĆ,
GOŠA FOM, SMEDEREVSKA PALANKA,
DRAGAN MILČIĆ,
MAŠINSKI FAKULTET, NIŠ,
IGOR RADISAVLJEVIĆ,
VOJNOTEHNIČKI INSTITUT, BEOGRAD

Postupak zavarivanja FSW (Friction Stir Welding) spada u grupu nekonvencionalnih metoda zavarivanja – zavarivanja bez dodatnog materijala. Budući da se postupak FSW odvija u čvrstom stanju, njime je moguće zavariti materijale koji se teško zavaruju konvencionalnim postupcima zavarivanja sa topljenjem. Primenom ovog postupka izbegavaju se pojave toplih prslina i poroznosti, a obezbeđuje dobra geometrijska stabilnost zavara. Generisanje toplote neophodne za zavarivanje i kvalitet zavarenog spoja zavise od velikog broja parametara, od kojih tehnološki parametri samog procesa zavarivanja (brzina rotacije i brzina zavarivanja) i geometrija alata imaju najveći uticaj. U radu su prikazani teorijski aspekti uticaja ovih parametara na količinu generisane toplote i rezultati eksperimentalnog zavarivanja legure aluminijuma 5052-H32.

Ključne reči: zavarivanje trenjem alatom; generisanje toplote; parametri zavarivanja

Friction Stir Welding (FSW) is an unconventional welding method – method without filler metal. Since FSW is a solid state welding method, the application of FSW is suitable on materials that are not weldable with conventional welding procedures. FSW enables the avoidance of hot cracks in welds and adequate geometrical stability. Generated heat during FSW and weld quality are direct products of numerous parameters, but, the most important are technological parameters of the process and geometry of the welding tool. Paper gives an overview of some parameters on heat generation and weld quality at FSW, during welding 5052-H32 Al alloy.

Key words: friction stir welding; heat generation; welding parameters

1. UVOD

Postupak zavarivanja trenjem alatom (FSW) razrađen je i patentiran od strane britanskog instituta za zavarivanje (TWI) 1991.g. Proces je sistematski razvijen u cilju zavarivanja različitih legura aluminijuma. Danas je ovaj postupak prerastao u rutinsku tehniku spajanja aluminijumskih komponenti, dok je njegova primena u spajanju različitih materijala (istorodnih i raznorodnih) takođe u usponu ali se sporije razvija. Sam proces omogućava visok stepen automatizacije.

Formiranje zavarenog spoja odvija se u čvrstoj fazi, pomoću specijalnog alata koji generiše toplotu potrebnu za formiranje spoja. To znači da se generisana toplota dobija na posredan način, za

razliku od klasičnog postupka zavarivanja trenjem, gde je ona dobijena direktnim kontaktom elemenata koji se zavaruju.

Specifična karakteristika FSW procesa je da je prenos toplote potpomognut lokalnim tečenjem materijala u blizini alata. Prenos toplote i mase zavisi od osobina materijala koji se zavaruju kao i od parametara zavarivanja tj. sile pritiska alata na radni komad, brzine rotacije, brzine zavarivanja kao i geometrije alata.

Teorijska razmatranja imala su za cilj da daju uvid u zakonitosti i osobenosti generisanja toplote tokom FSW postupka kao i uticaj tehnoloških i geometrijskih parametara na količinu generisane toplote.

Osnovna ideja eksperimentalnog rada je bila varirati geometrijske parametre alata i tehnološke parametre postupka (broj obrtaja alata i posmak alata) sa ciljem dobijanja kvalitetnog zavarenog spoja i oceniti njihov uticaj na kvalitet spoja.

2. GENERISANJE TOPLOTE

Zavarivanje FSW postupkom je postupak dobijanja zavarenog spoja u čvrstoj fazi, odnosno to je postupak zavarivanja bez dodatnog materijala pri čemu ne dolazi do topljenja osnovnog materijala. Tokom FSW postupka i alat i osnovni materijal ostaju u čvrstom stanju, s tim da se u zoni zavarivanja osnovni materijal nalazi u blago razmekšanom, „testastom“ stanju, što je posledica generisane toplote.

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 ω , 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.

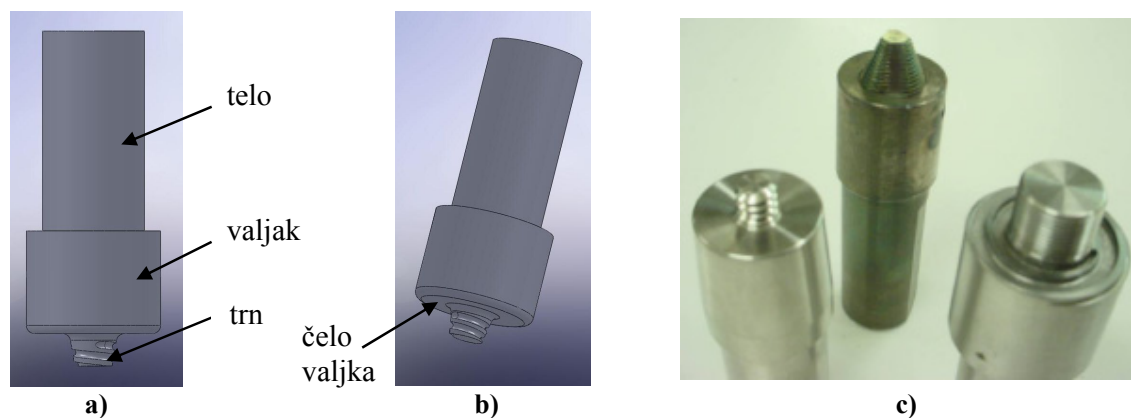
I kod FSW postupka važi princip minimalno potrebne ali dovoljne dovedene količine energije, kako bi se zavarivanje izvelo sa minimalnim promenama u zavarenom spoju i zoni uticaja toplote [1]. Kod FSW postupka veoma je teško odrediti kolika je to minimalno potrebna količina dovedene energije, međutim kao apsolutno tačno, može se tvrditi da količina energije koja se unese u zavar direktno zavisi od:

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

Mehaničke karakteristike materijala su uglavnom potpuno poznate veličine te je ova grupacija parametara manje interesantna za razmatranje sa aspekta sagledavanja samog postupka FSW. Ovu tvrdnju treba samo uslovno prihvatiti kao tačna, jer promene koje nastaju u materijalu prilikom FSW postupka mogu biti znatne. Međutim, zarad lakšeg sagledavanja samog postupka i lakše analize, biće razmatrani samo najbitniji parametri koji direktno utiču na postupak FSW.

3. GEOMETRIJA ALATA. TEHNOLOŠKI PARAMETRI POSTUPKA

Formiranje zavarenog spoja FSW postupkom ostvaruje se specijalnim alatom cilindričnog oblika, koji služi za generisanje toplote i mehaničko mešanje osnovnog materijala. Alat se sastoji iz tela, valjka i trna (slika 1a), pri čemu se prečnici ovih delova razlikuju. Radni deo alata predstavljaju čelo valjka i trn (slika 1b). Trn alata prvenstveno ima ulogu da ostvari mehaničko mešanje materijala u omekšanoj zoni i najčešće ima cilindrični oblik, mada postoje i drugačije profilisani trnovi. Konfiguracija trna određuje tok materijala pri mehaničkom mešanju tokom procesa zavarivanja. Čelo valjka uglavnom ima ravnu površinu ali može biti i sa profilisanom površinom (slika 1c). Alati sa profilisanim čelom valjka ostvaruju intenzivnije trenje između alata i radnog komada. Profilisana površina čela valjka ima ulogu rezervoara istisnutog omekšalog materijala iznad površine radnog komada, olakšava prenos materijala oko alata i sprečava stanjenje ploče u zoni zavarivanja. U odnosu na površinu radnog komada, osa alata može biti normalna na nju ili odstupati od normale. Zavisno od geometrije alata, tehnoloških parametara procesa, kontaktnog pritiska između alata i ploča, koeficijenta trenja itd., menja se i količina generisane toplote koja je potrebna za formiranje kvalitetnog zavarenog spoja.



Slika 1. Izgled alata za FSW

Osnovni parametri neophodni za formiranje spoja kod FSW postupka su [2]: aksijalna sila, broj obrtaja i translatorska brzina alata. Ovi parametri najviše zavise od termofizičkih svojstava materijala i debljine limova, a njihove optimalne vrednosti se, za sada, određuju isključivo eksperimentalno. Na osnovu parametara procesa, određuju se i odgovarajući geometrijski parametri alata (prečnik trna i čela valjka).

Aksijalna sila predstavlja silu kojom alat deluje prilikom prodiranja u materijal. Aksijalna sila je najveća u početnom periodu prodiranja trna, a zatim se smanjuje, dostiže minimum na završetku faze prodiranja i ostaje konstantna do kraja zavarivanja. Veličina aksijalne sile zavisi od osobina materijala koji se zavaruju, geometrijskih karakteristika trna i čela valjka, a kreće se do 200 kN.

Broj obrtaja alata n je tokom rada konstantan i koristi se u širokim granicama od 100 do 4000 obr/min. Broj obrtaja definiše veličinu periferne brzine trna i čela valjka (v_{rot}) i ima važnu ulogu u procesu generisanja toplote. Vrednost periferne brzine određuje se u zavisnosti od svojstava materijala koji se zavaruju.

Translatorska brzina je istovremeno i brzina zavarivanja (v_{zav}) i ona zavisi od mehaničkih svojstava i debljine zavarivanog materijala. I ova brzina je tokom zavarivanja konstantna a najčešće se određuje iz odnosa $v_{zav}/\omega R$, gde je v_{zav} – translatorska brzina, R – poluprečnik trna i ω – ugaona brzina

alata. Ovaj odnos je veoma važan i utiče na pojavu grešaka ali pri pravilnom odabiru ovog odnosa dobijaju se kvalitetni zavareni spojevi.

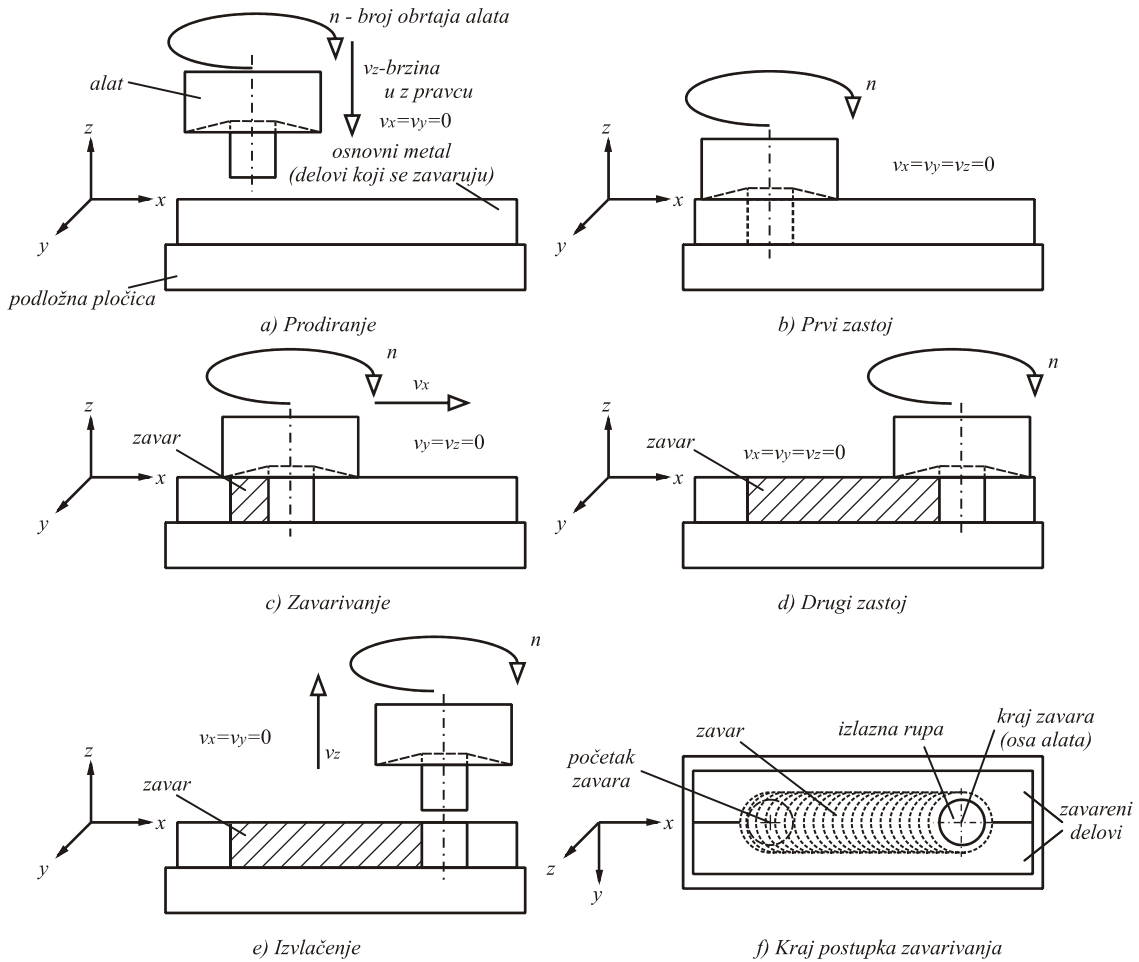
4. ANALITIČKI POSTUPAK ODREĐIVANJA GENERISANE KOLIČINE TOPLOTE

4.1. Faze FSW postupka

Alat i osnovni materijal se nalaze u međusobnom kontaktu i relativnom kretanju tokom čitavog postupka FSW. Međutim, njihov međusobni kontakt, kao i dejstvo alata na osnovni metal nisu istovetni tokom čitavog postupka. Na osnovu geometrijsko–kinematskog uticaja alata na osnovni metal, može postojati pet različitih faza (slika 2) u okviru postupka FSW, s tim da faze 2 i 4 mogu i da izostanu.

- 1) faza prodiranja alata – tokom ove faze trn prodire unutar osnovnog metala na početku linije spoja, usled trenja počinje zagrevanje i omekšavanje osnovnog materijala,
- 2) faza prvog zastoja alata – tokom ove faze trn i čelo valjka, generišu toplotu i vrše zagrevanje osnovnog metala u zoni zavarivanja, odnosno vrše aktivnu pripremu osnovnog metala za obrazovanje šava,
- 3) faza zavarivanja – tokom ove faze, usled translatornog kretanja alata, odvija se formiranje zavarenog spoja,
- 4) faza drugog zastoja alata – tokom ove faze prekida se translatorno kretanje, odnosno završava se formiranje zavarenog spoja,
- 5) faza izvlačenja alata – tokom ove faze se trn izvlači iz osnovnog metala.

Površine koje aktivno učestvuju u stvaranju zavarenog spoja i generišu toplotu su: čelo trna, bok trna i čelo valjka (Slika 3).



Slika 2. Faze FSW postupka

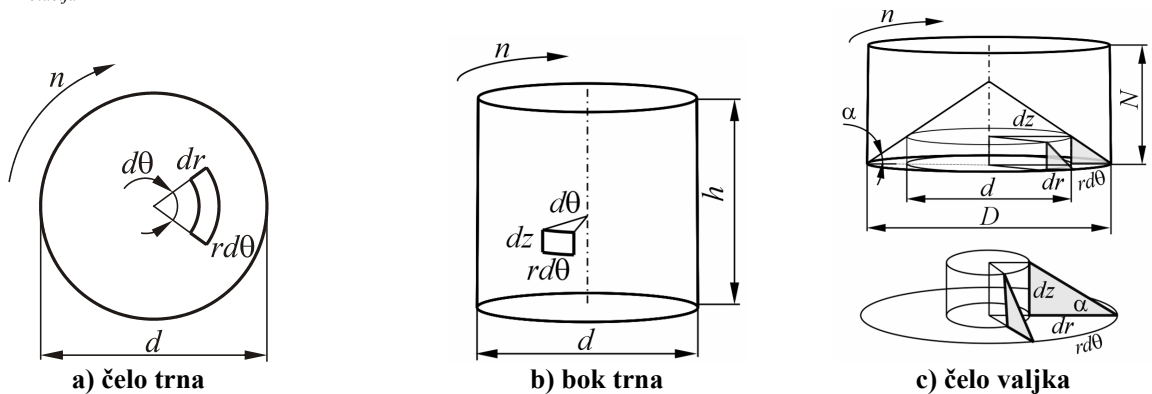
4.2. Opšti analitički izrazi za određivanje generisane toplote

Analizirajući kinetiku procesa, ukupna količina generisane toplote je posledica rotacije i translacije alata:

$$Q_{total} = Q_{rotacija} + Q_{translacija} \text{ [W]}, \quad (1)$$

a pošto se najveći deo mehaničke energije troši na ostvarivanje glavnog kretanja, to će i količina toplotne energije stvorene dejstvom alata biti najveća usled rotacionog kretanja, tj [3-6]:

$$Q_{total} \approx Q_{rotacija} \quad (2)$$



Slika 3. Aktivne površine alata

U procesu generisanja toplote učestvuju i uključuju se sukcesivno najpre čelo trna, zatim bok trna i na kraju čelo alata. Ukupna količina toplote generisana na čelu trna biće:

$$Q_{pt} = \int_0^{2\pi} \int_0^{d/2} \omega \cdot r^2 \cdot \tau_{cont} \cdot d\theta \cdot dr = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \omega \cdot \tau_{cont} \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^3. \quad (3)$$

Ukupna količina toplote generisana na boku trna biće:

$$Q_{ps} = \int_0^{2\pi} \int_0^h \omega \cdot r^2 \cdot \tau_{cont} \cdot d\theta \cdot dz = 2 \cdot \pi \cdot \omega \cdot \tau_{cont} \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot h \quad (4)$$

Prema tome, ukupna količina toplote generisana na čelu alata, ukoliko na čelu postoji konusna površina, ugla konusa α biće:

$$Q_{st} = \int_0^{2\pi} \int_{d/2}^{D/2} \omega \cdot r^2 \cdot \tau_{cont} \cdot (1 + \tan \alpha) \cdot dr \cdot d\theta = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \omega \cdot \tau_{cont} \cdot \left[\left(\frac{D}{2}\right)^3 - \left(\frac{d}{2}\right)^3 \right] \cdot (1 + \tan \alpha) \quad (5)$$

Međutim, ne učestvuju sve aktivne površine podjednako u generisanju toplote. U zavisnosti od faze u kojoj se nalazi postupak zavarivanja, neke od površina se sukcesivno uključuju ili isključuju iz aktivnog kontakta te se i njihov udeo u ukupnoj količini generisane toplote povećava ili smanjuje.

4.3. Fizički mehanizmi generisanja toplote

Dva fizička procesa dominiraju mehanizmom generisanja toplote pri FSW postupku: deformacija i adhezija. Površinski sloj alata stupa u kontakt sa mekšim i deformabilnijim slojem osnovnog metala, te adhezione sile koje se javljaju između površine alata i osnovnog materijala vezuju tanak sloj osnovnog metala za površinu alata. S druge strane, u osnovnom metalu javlja se otpor dejstvu alata, odnosno deformaciji, pa se javlja klizanje.

Tokom zavarivanja aktivne površine alata se u proces trenja uključuju sukcesivno: najpre se uključuje kružna površina čela trna, zatim bok trna i na kraju čelona površina valjka. Pošto se proces trenja odvija između metalnih tela, prema [7] može se usvojiti da je koeficijent trenja na kontaktu alata i osnovnog metala jednak:

$$\mu = \tau / p \quad (6)$$

gde je τ - tangencijalni napon smicanja mekšeg materijala (ovde je to osnovni metal) i p – kontaktni pritisak (normalni napon na kontaktu alata i osnovnog materijala).

Prema tome, za:

$$1) \text{ slučaj deformacije, kontaktni napon } \tau_{kont} \text{ jednak je } \tau_{kont} = \tau, \quad (7)$$

$$2) \text{ za slučaj adhezije, kontaktni napon } \tau_{kont} \text{ jednak je } \tau_{kont} = \mu \cdot p. \quad (8)$$

Ukupna količina toplote generisana alatom usled deformacije Q_{def} u nekom trenutku vremena t tokom postupka FSW, jednaka je:

$$Q_{def}(t) = Q_{pt}^{def}(t) + Q_{ps}^{def}(t) + Q_{st}^{def}(t) \quad (9)$$

gde je: Q_{pt}^{def} - količina generisane toplote na čelu trna u trenutku t , Q_{ps}^{def} - količina generisane toplote na boku trna u trenutku t , Q_{st}^{def} - količina generisane toplote na čelu alata u trenutku t .

Ukupna količina toplote generisana alatom usled adhezije Q_{adh} u nekom trenutku vremena t tokom postupka FSW, jednaka je:

$$Q_{adh}(t) = Q_{pt}^{adh}(t) + Q_{ps}^{adh}(t) + Q_{st}^{adh}(t) \quad (10)$$

gde je: Q_{pt}^{adh} - količina generisane toplote na čelu trna u trenutku t , Q_{ps}^{adh} - količina generisane toplote na boku trna u trenutku t , Q_{st}^{adh} - količina generisane toplote na čelu alata u trenutku t .

Prema tome, može reći da je ukupna količina generisane toplote funkcija deformacije i adhezije:

$$Q = f(\text{deformacija, adhezija}) \quad (11)$$

Koji je udeo deformacije a koji je udeo klizanja u generisanoj količini toplote Q je veoma teško predvideti. Pojava adhezije i deformacije gotovo da imaju slučajni karakter te se vrlo teško može napisati matematički izraz koji potpuno tačno definiše ovu pojavu. Kao jednostavan vid opisa stanja adhezije i deformacije, uveden je koeficijenta stanja δ , koji je dat kao odnos brzine tečenja osnovnog metala v_{ometal} i obimne brzine alata v_{rot} :

$$\delta = v_{ometal} / v_{rot} \quad (12)$$

Na osnovu brzine kretanja alata v_{alat} i brzine kretanja posmatrane čestice materijala v_{ometal} , može se zaključiti da:

- 1) za slučaj čiste adhezije, gde je $v_{ometal} \approx 0$, koeficijent stanja ima vrednost $\delta=0$,
- 2) za slučaj čiste deformacije, gde je $v_{ometal} \approx v_{rot}$, koeficijent stanja ima vrednost $\delta=1$,
- 3) za slučaj delimičnog klizanja i delimične deformacije, koeficijent stanja ima vrednost $\delta=0 \div 1$.

Prema tome, ako se kaže da je totalna količina generisane toplote usled deformacije jednaka Q_{def} a totalna količina generisane toplote usled adhezije jednaka Q_{adh} , ukupna količina generisane toplote Q je jednaka:

$$Q(t) = \delta \cdot Q_{def}(t) + (1 - \delta) \cdot Q_{adh}(t) \quad (13)$$

5. EKSPERIMENT

Zavarivane su ploče od aluminijumske legure 5052-H32, dimenzija 200×130×6.5mm. U Tabelama 1 i 2 dati su hemijski sastav i mehaničke osobine osnovnog materijala. Za zavarivanje su korišćena dva alata izrađena od alatnog čelika. Geometrija alata br.1 je: prečnik valjka Ø25mm, trn konusnog oblika dužine 6mm sa levom spiralnom zavojnicom nagiba 7° i prečnikom korena 7mm, čelo valjka bez rezervoara sa radijalnim zaobljenjima na prelasku ka telu valjka i korenu trna. Geometrija alata br. 2 je: prečnik valjka - Ø25mm, trn konusnog oblika dužine 6mm sa levom zavojnicom nagiba 10° i prečnikom korena 7mm, čelo valjka sa neprofilisanim rezervoarom i radijalnim zaobljenjima na prelasku ka telu valjka i korenu trna. Bočne površine ploča su mašinski poravnate, priljubljene jedna uz drugu i kruto stegnute za potpurnu ploču. Zavarivanje je izvedeno na prilagođenoj glodalici, pri čemu je na svakoj probi ostvarena dužina spoja od oko 150mm. Broj obrtaja alata n (v_{rot}) je variran u granicama od 450 do 1500 obr/min, a brzina zavarivanja (v_{zav}) u granicama od 46 do 380 mm/min, pri čemu se odnos v_{rot} / v_{zav} kretao od 3,16 do 32,60. Nagib alata iznosio je 1° i držan je konstantnim. Optimalni rezultati ostvareni su pri odnosu $v_{rot} / v_{zav} = 6,45$ do 8,22.

Tabela 1. Hemijski sastav osnovnog materijala (Al legura 5052)

Mg	Si	Cu	Fe	Mn	Zn	Cr
2,25	0,12	0,02	0,27	0,12	0,03	0,2

Tabela 2. Mehaničke karakteristike legure 5052

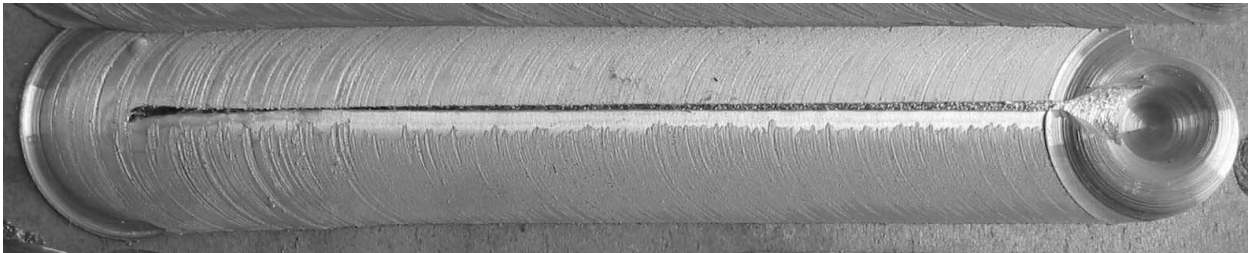
$Rp_{0,2}$ (MPa)	Rm (MPa)	A (%)	Тврдоћа HV3
175	232	21,8	69

Zavareni spojevi su prvo podvrgnuti vizuelnom pregledu u cilju otkrivanja površinskih grešaka. Na spojevima kod kojih nije uočeno prisustvo površinskih grešaka, izvršena su rendgenska ispitivanja u cilju otkrivanja unutrašnjih (zapreminskih) grešaka. Mehanička ispitivanja obavljena su samo na spojevima kod kojih nije uočeno prisustvo površinskih i zapreminskih grešaka. Zatezne karakteristike zavarenog spoja kao celine i mesto preloma, određivani su na epruvetama sa paralelnim bokovima izrađenim prema standardu ASTM E-8M. Epruvete u radnom delu imaju obuhvaćen OM, ZUT, ZTMU (zona termomehaničkog uticaja) i „grumen“ u dužini koja je veća od 4 debljine uzorka.

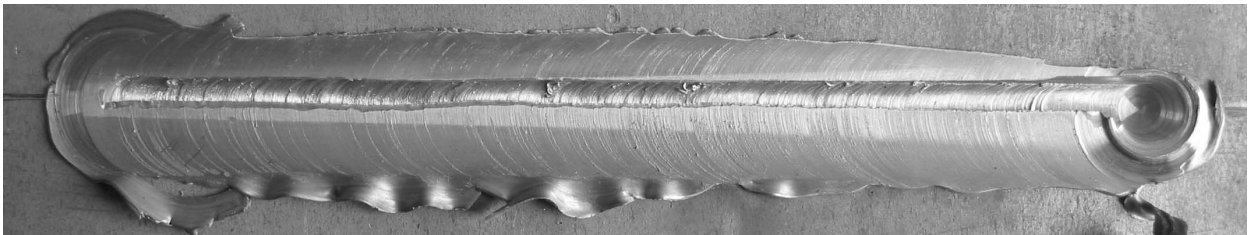
Ovakav način izrade i ispitivanja epruveta omogućava da se odrede karakteristike spoja kao celine i mesto preloma. Ispitivanje tvrdoće kroz presek zavarenog spoja urađeno je metodom Vikersa HV3, prema standardu SRPS C.T3.051.

Rezultati eksperimenta

Pojava greške tipa „tunela“ (slika 4 i 5) na vodećoj strani zavara je posledica nedovoljnog transporta materijala sa prateće ka vodećoj strani zavara oko trna alata, do čega dolazi usled neodgovarajuće (prevelike) brzine zavarivanja.



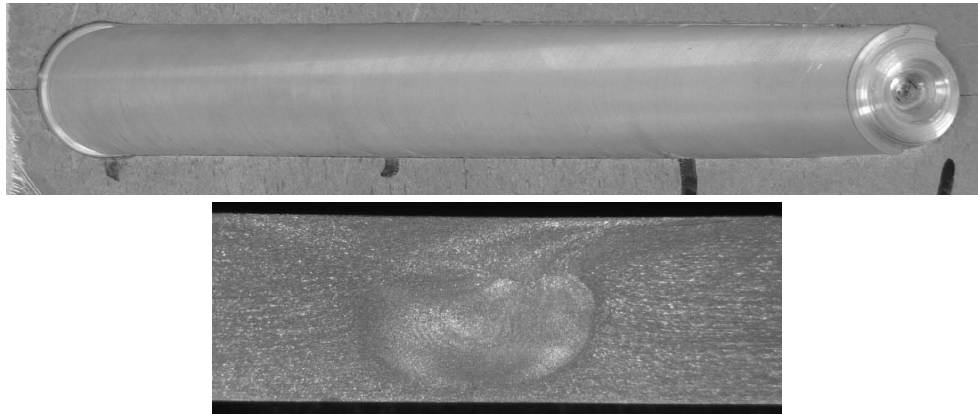
**Slika 4. Izrazito prisustvo tunela – lice spoja zavarenog alatom br. 2,
parametri zavarivanja: $v_{rot} = 1500$ obr/min, $v_{zav} = 300$ mm/min, $v_{rot} / v_{zav} = 5$**



**Slika 5. Izrazito prisustvo tunela – lice spoja zavarenog alatom br. 1,
parametri zavarivanja $v_{rot} = 1500$ obr/min, $v_{zav} = 150$ mm/min, $v_{rot} / v_{zav} = 10$**

Parametri zavarivanja su naročito nepovoljni u slučaju kada je prisustvo tunela bilo primetno i pri vizuelnoj kontroli, odnosno kada je došlo do „otvaranja“ lica šava. Iako je brzina zavarivanja kod spoja zavarenog alatom br. 1 duplo manja nego kod spoja zavarenog alatom br. 2 uočeno je da je tunel „otvoreniji“. Ovakvo ponašanje se objašnjava uticajem geometrije trna alata, jer korak i oblik zavojnice alata br. 1 ne omogućavaju transporta materijala oko trna u potrebnoj meri.

Ispitivanja zatezanjem su pokazala da je najkritičnije mesto zavarenog spoja deo osnovnog materijala koji se nalazi u ZTMU na vodećoj strani zavara, neposredno pored grumena. Karakter preloma kod svih epruveta je isti, a prslina se prostirala duž linije razdvajanja grumena i ZTMU. Potrebno je primetiti, da se greška tipa tunela takođe javlja u ovoj zoni spoja. Na slici 6 je dat izgled dobro ostvarenog zavara sa alatom 2 za odnos $v_{rot} / v_{zav} = 8,22$.



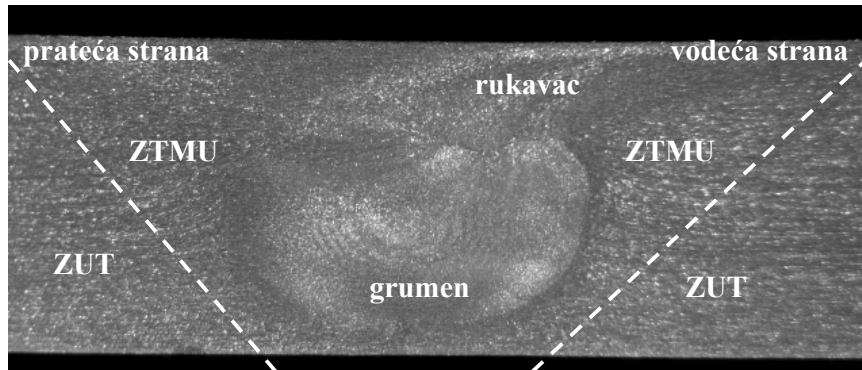
Slika 6. Izgled lica spoja (gore) i makroskopski presek (dole), spoj zavaren alatom br.2 pri odnosu $v_{rot} / v_{zav} = 8,22$

Rezultati ispitivanja zateznih karakteristika zavarenog spoja kao celine dati su u Tabeli 3.

Tabela 3. Zatezne karakteristike zavarenog spojeva dobijenog pri odnosu $v_{rot} / v_{zav} = 8,22$

v_{rot} / v_{zav}	Rm (MPa)	A (%)	$Rm / Rm_{(OM)}$ (%)	Mesto preloma
8,22	183	9,80	78,9	ZTMU – vodeća strana
	180	7,00	77,6	
	186	11,50	80,1	
	179	7,10	77,1	
	181	7,40	78,0	
sr. vr.	182	8,56	78,4	

Raspodela tvrdoće kroz presek spoja pokazuje da je u zavarenom spoju došlo do pada nivoa tvrdoće u odnosu na osnovni materijal, što je posledica procesa otpuštanja do koga dolazi usled toplote stvorene trenjem. Najveći pad tvrdoće zabeležen je u ZTMU. Raspodela tvrdoće je u saglasnosti sa rezultatima zateznih karakteristika. Makro ispitivanjima poprečnog preseka zavarenih spojeva uočeno je postojanje oblasti grumena, rukavca, ZTMU i ZUT-a, njihov položaj i oblik (slika 7). Jasno izražene linije tečenja materijala ukazuju na karakter i smer toka materijala pri odvijanju procesa zavarivanja.



Slika 7. Delovi spoja zavarenog FSW postupkom

7. 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.

Pojava greške tipa „tunela“ je posledica nedovoljnog transporta materijala oko trna sa prateće na vodeću stranu zavara do čega dolazi usled prevelike brzine zavarivanja.

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.

ZAHVALNOST

Ovom prilikom, autori izražavaju neizmernu zahvalnost prof. dr Miroslavu B. Đurđanoviću, redovnom profesoru u penziji Mašinskog fakulteta u Nišu, na iskrenoj i sveobuhvatnoj pomoći vezanoj, kako za eksperiment, tako i za analitičku formulaciju problema generisanja toplote kod postupka FSW.

LITERATURA

□

Časopis

[1] H Schmidt, J Hattel and J Wert: An analytical model for the heat generation in Friction Stir Welding, *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.* 12 No 1 (January 2004) pp.143-157.

[2] Stamenković D, Đurđanović M, Mitić D.: ZAVARIVANJE POSTUPKOM FSW, "Zavarivanje i zavarene konstrukcije", godina LI, 2006, br. 2, st.59–66.

[3] Song, M., Kovačević, R. (2003) Thermal modeling of friction stir welding in a moving coordinate system and its validation. *International Journal of machine Tools & Manufacture*, 43, 605-615.

[4] H. Schmidt, J. Hattel: Thermal modeling of friction stir welding *Scripta Materialia*, Volume 58, Issue 5, Pages 332-337.

[5] Thomas, WM; Nicholas, ED; Needham, JC; Murch, MG; Temple-Smith, P. Dawes, CJ. *Friction-stir butt welding*, GB Patent No. 9125978.8, International patent application No. PCT/GB92/02203, (1991).

[6] Ulysse, P. (2002) Three-dimensional modeling of the friction stir-welding process. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 42, str. 1549-1557.

Knjiga

[7] Frank Philip Bowden, David Tabor (1982): Friction – An Introduction to Tribology. *Robert E. Krieger Publishing Company, INC, Krieger Drive, Malabar, Florida 32950.*