

EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA ZAVARIVANJA TRENJEM SA MEŠANJEM NA LEGURI ALUMINIJUMA 2024 T351

EXPERIMENTAL RESEARCHES OF FSW ON ALUMINIUM ALLOY 2024 T351

Dragan Milčić, Miroslav Mijajlović, Miodrag Milčić

Univerzitet u Nišu Mašinski fakultet, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš

E-mail: milcic@masfak.ni.ac.rs

Rezime: Postupak zavarivanja trenjem sa mešanjem se već rutinski koristi, posebno u raznim slučajevima kod kojih ni jedan konvencionalni metod zavarivanja ne daje zadovoljavajuće rezultate. Prednosti ovog postupka zavarivanja se najviše ogledaju u spajanju materijala kao što su aluminijum i njegove legure, nerđajući austenitni čelici koji se teško zavaruju konvencionalnim metodama, titan, nemetalni materijali itd. U ovom radu je dat prikaz eksperimentalnih istraživanja postupka zavarivanja trenjem sa mešanjem na leguri aluminijuma 2024 T351. Istraživanja su vršena na Mašinskom fakultetu u Nišu u pravcu verifikacije novo-razvijenog analitičkog modela generisanja toplote u postupku zavarivanja trenjem sa mešanjem.

Ključne reči: Zavarivanje trenjem sa mešanjem, Al 2024 T351, Generisanje toplote

Abstract: Friction stir welding has become almost conventional welding procedure used for various responsible constructions where other welding procedure gives no adequate results. Advantage of this welding procedure is best seeable at welding of aluminium and alloys based on aluminium, austenite steel, titanium, non-metal parts etc. This paper gives a glance on experimental researches conducted on alloy 2024 T351 during FSW. Researches were performed as verification of a novel analytical model for estimation of amount of generated heat during FSW.

Key words: Friction Stir Welding, Al 2024 T351, Heat generation

1. UVOD

Postupak zavarivanja trenjem sa mešanjem (eng. Friction Stir Welding - FSW) su izmislili i eksperimentalno proverili Vejn Tomas (Weyne Thomas) i tim njegovih kolega sa Instituta za zavarivanje u Londonu, Velika Britanija (The Welding Institute UK – TWI) tokom decembra 1991. godine. Participant u istraživanjima i prvi korisnik postupka FSW bila je kompanija Hitači (Hitachi Ltd.) koja je od kraja 1991. godine do sredine 1992. godine razvila mašinu kojom je bilo moguće FSW postupkom zavariti 25 metara dugu aluminijumsku šasiju kod lakih, ekoloških šinskih vozila korišćenih za potrebne podzemnih železnica Japana, tzv. „Hitachi A-Train“.

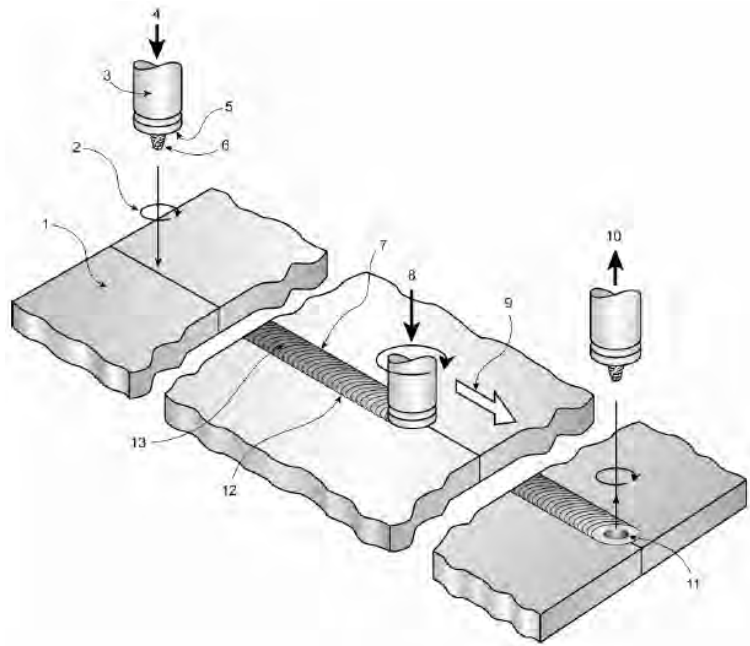
Ovaj metod se već rutinski koristi, posebno u raznim slučajevima kod kojih ni jedan drugi metod ne daje zadovoljavajuće rezultate, ali, osnovne prednosti FSW-a se najviše ogledaju u spajanju materijala kao što su aluminijum i njegove legure, nerđajući austenitni čelici koji se teško zavaruju konvencionalnim metodama, titan, nemetalni materijali itd [1]. U

stvarnim primenama je neoborivo demonstrirano da ovaj proces daje homogene zavare, sa dobrim mehaničkim svojstvima, često i na spojevima koji važe za teško ostvarive konvencionalnim metodama i tehnikama. Proces je najviše primenljiv za komponente koje su ravne i dugačke (ploče, trake i slično), ali određenim adaptacijama alata moguće je odlično zavarivanje cevi, raznih šupljih elemenata kao i tačkasto zavarivanje.

2. ZAVARIVANJE TRENJEM SA MEŠANJEM

FSW postupak zavarivanja predstavlja tipičan primer korišćenja indirektnog načina generisanja toplote trenjem. Postupak FSW (slika 1) se realizuje na sledeći način: limovi (radni komadi, delovi koji se spajaju, osnovni metal) su sučeono pritisnuti i fiksirani za podložnu ploču. Za zavarivanje

se koristi specijalni alat cilindričnog oblika, koji se sastoji od tela većeg prečnika i klina manjeg prečnika na kome je najčešće narezan levi navoj. Prelaz između tela i klina je ravna ili konusna prstenasta površina, tzv. rame (nosač) alata. Na početku zavarivanja alat se nalazi iznad podložne ploče i radnih komada tako da je njegova osa najčešće normalna na liniju dodira limova. U tom položaju alat rotira i počinje translatorno kretanje naniže, klin prodire istovremeno kroz oba lima u tački na liniji spajanja, usled trenja generiše se toplota, materijal limova se zagreva i, zahvaljujući zavojnici alata, on se neprekidno meša. Kada rame dodirne površinu limova, tada je čeonu površinu klina vrlo blizu podložne ploče, kretanje alata



Slika Error! No text of specified style in document.1. Nomenklatura postupka zavarivanja trenjem sa mešanjem, 1-osnovni metal, 2-smer rotacije alata (u smeru kazaljke na satu), 3-alat za zavarivanje, 4-spuštanje alata, 5-rame alata, 6-klin (trn), 7-strana napredovanja zavara, 8-aksijalna sila, 9-smer zavarivanja, 10-podizanje alata, 11-izlazni otvor, 12-

naniže se prekida dok alat nastavlja rotaciju. Neko vreme alat ostaje u tom položaju, a onda započinje horizontalno kretanje duž linije dodira limova. U daljem toku procesa, klin zagreva nove slojeve materijala oba lima i meša ih, a iza njega se stvara brazda deformisanog materijala koji očvršćava i tako formira monolitan spoj. Rame alata oblikuje ravnu površinu šava sa gornje strane limova, a sa donje strane to isto čini postolje-podložna ploča. Proces se završava prekidom translatornog kretanja i izvlačenjem alata iz osnovnog materijala. Važna kinematska karakteristika FSW jeste što alat uvek ima neprekidno rotaciono glavno kretanje, a najčešće on istovremeno vrši oba translatorna pomoćna kretanja, mada je moguće da translatorna kretanja vrši podložna ploča sa radnim komadima.

3. GENERISANJE TOPLOTE U PROCESU ZAVARIVANJA TRENJEM SA MEŠANJEM

Zavarivanje trenjem sa mešanjem vrši se dejstvom posebnog alata na radne komade. Alat rotira oko svoje ose i dodatno se aksijalno kreće u odnosu na osnovni materijal. U odnosu na

stvaranje zavarenog spoja, funkcije alata su da: predgreje osnovni metal u zoni zavarivanja, deformiše osnovni metal i izvrši mešanje materijala i napravi zavar.

Predgrevanje osnovnog metala u zoni zavarivanja vrši se usled kontakta alata i osnovnog metala i generisanja toplote na kontaktu što olakšava deformisanje osnovnog metala i njegovo mešanje u monolitni spoj.

Generisanje toplote predstavlja složen fizički proces pri kome se određeni vid energije transformiše u toplotu. U slučaju postupka zavarivanja trenjem sa mešanjem, generisanje toplote je prateća pojava procesa zavarivanja i predstavlja proces transformacije mehaničke energije, dovedene alatu, u toplotu. Kako je FSW postupak zavarivanja u čvrstoj fazi, toplota generisana pri FSW se smatra korisnom pojavom: povišava temperaturu radnih komada, oni omekšavaju u zoni dejstva alata te se proces zavarivanja odvija uz manje opterećenje alata.

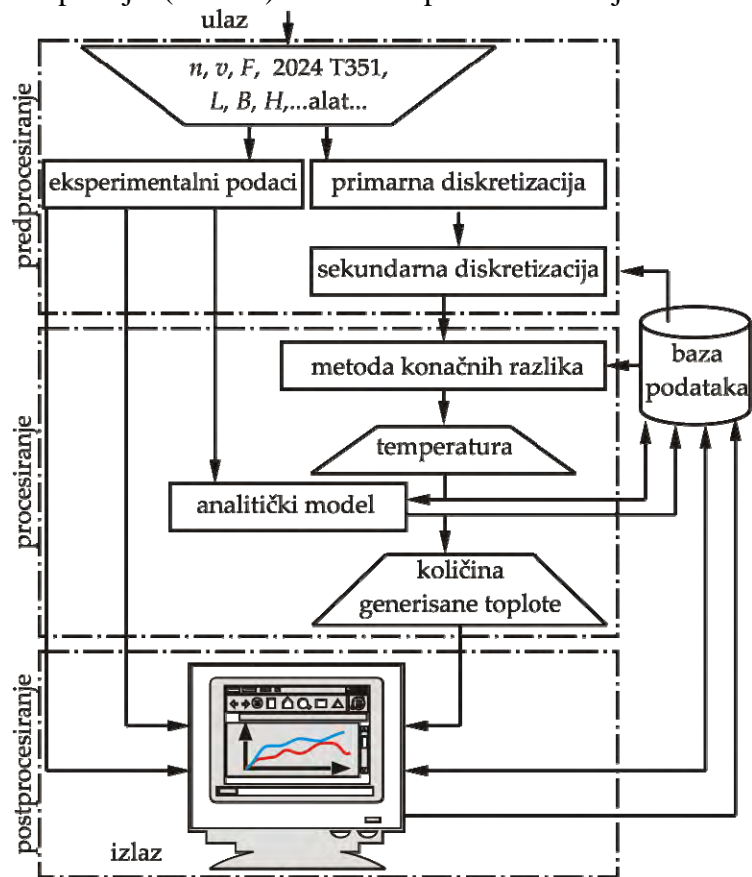
Temperatura tela pri frikcionim procesima dostiže oko 80% od temperature topljenja onog materijala u kontaktu koji ima nižu temperaturu topljenja. Ove temperature su znatno niže nego temperature pri konvencionalnim postupcima zavarivanja što rezultira manjim termičkim deformacijama spojeva dobijenih zavarivanjem trenjem sa mešanjem.

Kao i kod drugih postupaka zavarivanja, iz više razloga je važno poznavati koliki je „unos energije u zavareni spoj“ tokom FSW, ali najvažniji razlog je vezan za termičke procese u osnovnom materijalu koji se javljaju pri zavarivanju. To je razlog zašto je potrebno odrediti količinu generisane toplote pri FSW.

Analitički model za određivanje količine generisane toplote pri FSW, razvijen na Mašinskom fakultetu u Nišu, je složen i razmatra veliki broj uticajnih parametara. Metode kojima je vršeno istraživanje i razvoj modela su eksperimentalne, numeričke, simulacione i analitičke, a analitički model za određivanje količine generisane toplote ih sve objedinjava, i pomoću originalnog softvera, njima upravlja (slika 2). Neki od parametara koji utiču na generisanje toplote pri FSW su: mehanička svojstva materijala alata i materijala osnovnog metala, dimenzije i oblik alata, tehnološki parametri procesa (broj obrtaja alata, brzina zavarivanja, trajanje pojedinih faza procesa, karakter i intenzitet opterećenja itd.), termodinamički koeficijenti prenosa toplote, tribološki parametri (kvalitet obrade površina, tvrdoća, koeficijent trenja, habanje, kontaktni naponi itd.). Ipak, neki su parametri uticajniji od drugih te su zbog toga bili od posebne važnosti pri razvoju analitičkog modela za određivanje količine generisane toplote:

Numeričku simulaciju čine tri osnovna koraka: predprocesiranje, procesiranje i postprocesiranje.

Osim eksperimentalnog modela, ostali koraci u numeričkoj simulaciji se izvode



Slika 2. Šematski prikaz numeričke simulacije određivanja količine generisane toplote [2]

pod okriljem posebno razvijenog softvera za određivanje količine generisane toplote.

Na početku simulacije, na osnovu ulaznih podataka i baze znanja, softver vrši predprocesiranje. Tada se vrše primarna i sekundarna diskretizacija prostora, čvorovima i konačnim elementima se dodeljuju odgovarajuća svojstva (mehanička, termička, tribološka itd.), definišu se početni i granični uslovi u zavisnosti od trenutka vremena za koji se vrši simulacija itd. Sekundarna diskretizacija je jedini deo predprocesiranja koji se vrši paralelno sa procesiranjem a u zavisnosti od faze zavarivanja koja se numerički simulira. Tokom procesiranja se vrši numerički proračun temperature radnih komada i alata metodom konačnih razlika. Veličine potrebne za proračun temperature dobijaju se na osnovu analitičkog modela i baze znanja/podataka. Analitički model se koristi za određivanje veličina koje neposredno i posredno utiču na određivanje količine generisane toplote. U analitički model, pored opštih ulaznih podataka i proračunate temperature, ulaze i veličine dobijene na osnovu eksperimentalnog modela. Postprocesiranje obuhvata obradu podataka iz faze procesiranja, poređenje eksperimentalnih podataka sa analitičkim i izradu statističkih podataka.

Važan udeo u izradi i verifikaciji analitičkog modela vezan je za eksperimentalna istraživanja. Eksperimentalna istraživanja su sprovedena kako bi se odredile potrebne fizičke veličine koje opisuju proces FSW. Izbor radne mašine izvršen je u skladu sa raspoloživim tehničkim mogućnostima na Mašinskom fakultetu u Nišu.

4. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA FSW NA LEGURI Al 2024 T351

Eksperimentalna istraživanja su vršena na leguri aluminijuma 2024 T351. Legura 2024 T351 je legura aluminijuma, primarno legirana bakrom i magnezijumom, što povećava čvrstoću legure. Hemijski sastav i neke mehaničke osobine legure aluminijuma 2024 T351 date su u tabeli 1. Najčešća primena ove legure je kod konstrukcija gde se zahteva visoka čvrstoća a potrebna je mala masa kao i kod konstrukcija koje trpe zamorna opterećenja. Legura je teško zavariva klasičnim postupcima zavarivanja a takođe spada u materijale koji se teško obrađuju deformisanjem. Kako je legura 2024 slabo otporna na koroziju, antikorozivna svojstva se poboljšavaju prevlačenjem površinskog sloja legure čistim aluminijumom. Međutim, tada je primetan pad čvrstoće legure.

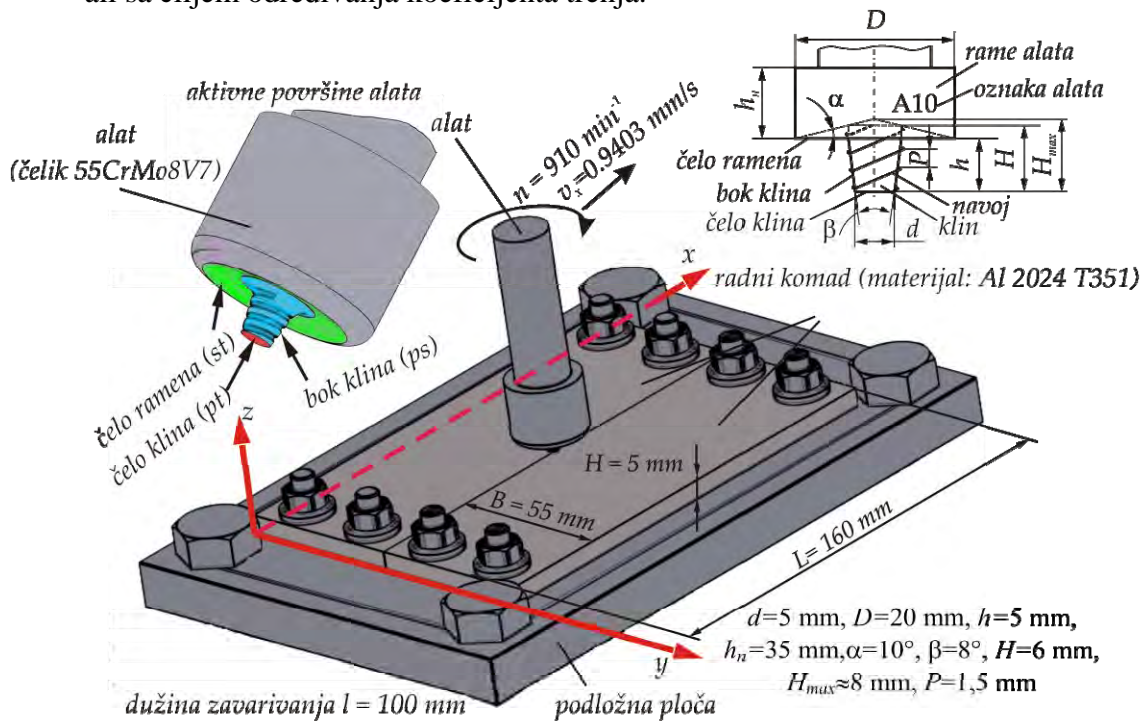
Tabela 1. Hemijski sastav i mehaničke osobine legure Al 2024 T351

| | |
|---|--|
| Hemijski sastav: hemijski element (masenih %) | Al (~), S (0.12), Fe (0.28), Cu (4.52), Mn(0.65), Mg (1.60), Cn (0.01), Zn (0.09), Ti (0.016), B (0.009), N (0.02) |
| Mehaničke osobine | |
| Granica tečenja $R_{p0,2}$ | 266-274 N/mm ² |
| Zatezna čvrstoća R_m | 404-424 N/mm ² |
| Elongacija A_5 | 22.00% |

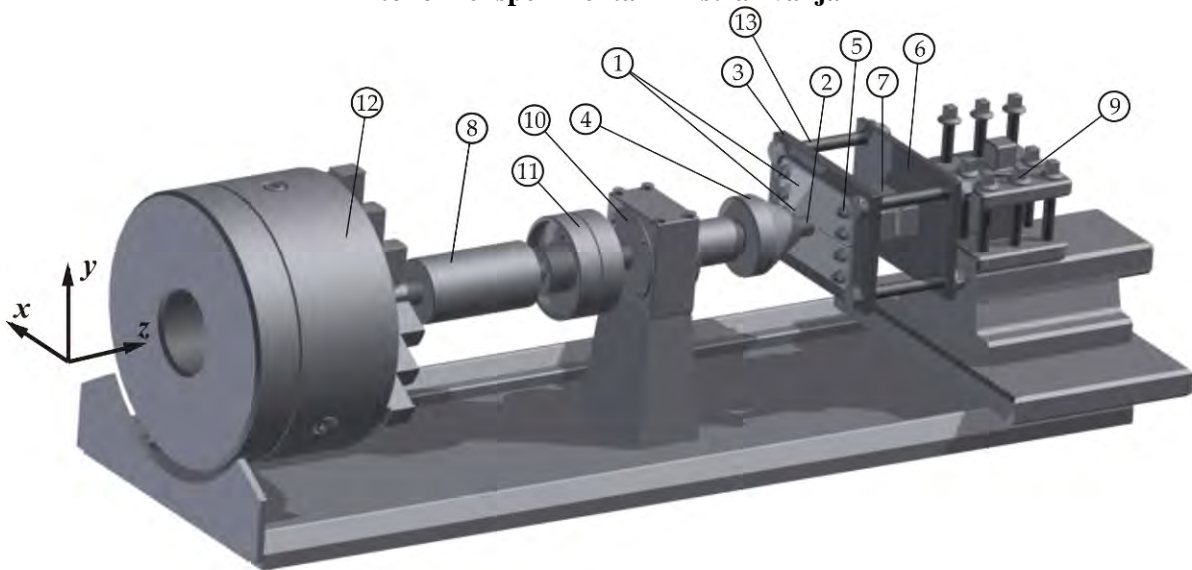
Alati za zavarivanje korišćeni u eksperimentalnim ispitivanjima (slika 3) su izrađeni od čelika DIN 56NiCrMoV7 (komercijalna oznaka čelika je UTOPEX2, prema SRPS je Č5742-nevažeća oznaka, a prema evropskim normama EN 55CrMo8). Čelik 56NiCrMoV7 je kaljivi čelik, legiran niklom, namenjen alatima koji rade na povišenim temperaturama. Odlikuje se dobrom čvrstoćom i žilavošću, uniformnom tvrdoćom po poprečnom preseku (čak i kod velikih poprečnih preseka) i dobrom otpornošću na udarna opterećenja. Alati od čelika 56NiCrMoV7 mogu se bez posledica hladiti vodom, vazduhom ili standardnim emulzijama za hlađenje i podmazivanje. Eksperimentalna ispitivanja sprovedena na FSW postupku bila su usmerena ka dva cilja:

- Merenje važnih fizičkih veličina samog FSW postupka – obrtni moment, sila prodiranja, temperatura radnih komada pri režimima zavarivanja koji su optimalni;
- Merenje važnih fizičkih veličina samog FSW postupka – obrtni moment, sila

prodiranja, moment trenja pri različitim režimima zavarivanja, sa različitim alatima ali sa ciljem određivanja koeficijenta trenja.



Slika 3. Osnovni podaci o alatu, radnim komadima i tehnološkim parametrima korišćenim tokom eksperimentalnih istraživanja



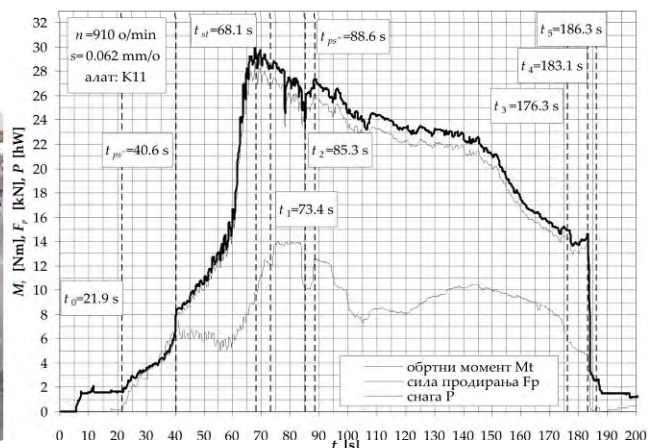
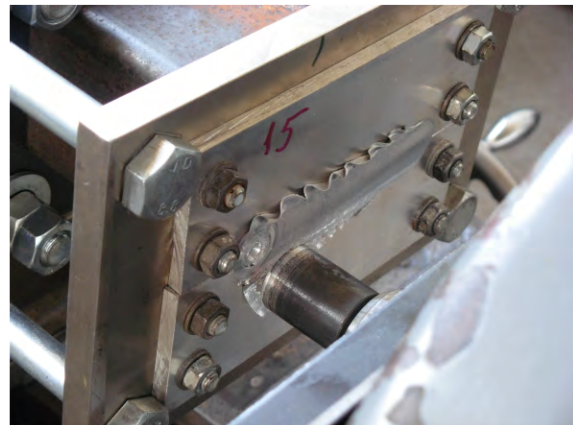
Slika 4. Radno mesto za ZTM postupak, izvođenje 1: 1-radni komadi, 2 - alat za zavarivanje, 3-podložna ploča, 4-stezna glava uređaja za zavarivanje, 5-zavrtnjevi, 6- oslonac ploča, 7-senzor sile, 8-senzor obrtnog momenta, 9-nosač alata mašine, 10-nosač, 11-spojnica, 12-stezna glava mašine, 13-fundamentalni zavrtnjevi [2]

Zbog složenosti kinematike FSW, odabranih parametara i dimenzija merne opreme, zaključeno je da zavarivanja treba obaviti u konfiguraciji gde je osa zavarivanja alata horizontalna. Zbog takvog zahteva usvojen je strug kao radne mašine, što je, verovatno, prva primena struga za FSW. Na slici 4 je data šema horizontalnog radnog mesta i konfiguracija opreme za merenje obrtnog momenta i aksijalne sile (z-pravac). Ostali navedeni parametri su mereni na istom radnom mestu, sa manjim adaptacijama opreme.

Tehnološki parametri procesa FSW (brzina zavarivanja, broj obrtaja alata, ugao iskošenja alata i sl) su izabrani iz opsega predloženih vrednosti [3]. Prvi pokušaji zavarivanja su bili sa minimalnim tehnološkim parametrima. Nakon završetka zavarivanja vršen je vizuelni pregled zavara i ispitivanje zavara ultrazvukom, a nakon toga definisani novi parametri za novi pokušaj. Nakon sedam pokušaja definisani su optimalni tehnološki parametri, kojima je dobijen kvalitetan zavareni spoj (npr. bez greške „tunela”, kaviteta itd.). U tabeli 2 dati su za najvažniji tehnološki parametri FSW postupka zavarivanja Al 2024 T351, preporučene vrednosti, definisane optimalne vrednosti i maksimalnih izmerene vrednosti obrtnog momenta, aksijalne sile i sile zavarivanja postignutog tokom zavarivanja, koeficijent trenja i maksimalna temperatura na radnom komadu i alatu.

Tabela 2. Predlog tehnoloških parametara za zavarivanje Al 2024 T351 [3, 2]

| | Preporučeni raspon vrednosti | Optimalna vrednost | Maksimalne izmerene vrednosti |
|-------------------------------------|---|---|--|
| Broj obrtaja alata n | 750-1180 min^{-1} | 910 min^{-1} | Obrtni moment: $M_t = 35 \text{ Nm}$, Aksijalna sila: $F_z = 15 \text{ kN}$, Sila zavarivanja: $F_x = 510 \text{ N}$, Koeficijent trenja: $\mu_{\text{max}} = 0.9$ $T_{\text{max}} = 394 \text{ }^\circ\text{C}$ na radnom komadu $T_{\text{max}} = 464 \text{ }^\circ\text{C}$ na alatu |
| Brzina prodiranja v_z | Nema prep. vrednosti | Nije određena | |
| Brzina zavarivanja v_x | 46-150 mm/min (0,77-2,5 mm/s) | 0,062 mm/obr. (0,9403 mm/s) | |
| Ugao iskošenja alata | $\leq 5^\circ$ | $1^\circ - 2^\circ$ | |
| Dužina zavarivanja l_{min} | 50 mm | $\approx 100 \text{ mm}$ | |



Slika 5. Snimci radnog mesta i tipičan dijagram eksperimentalno određene vrednosti obrtnog momenta, aksijalne sile i angažovane snage

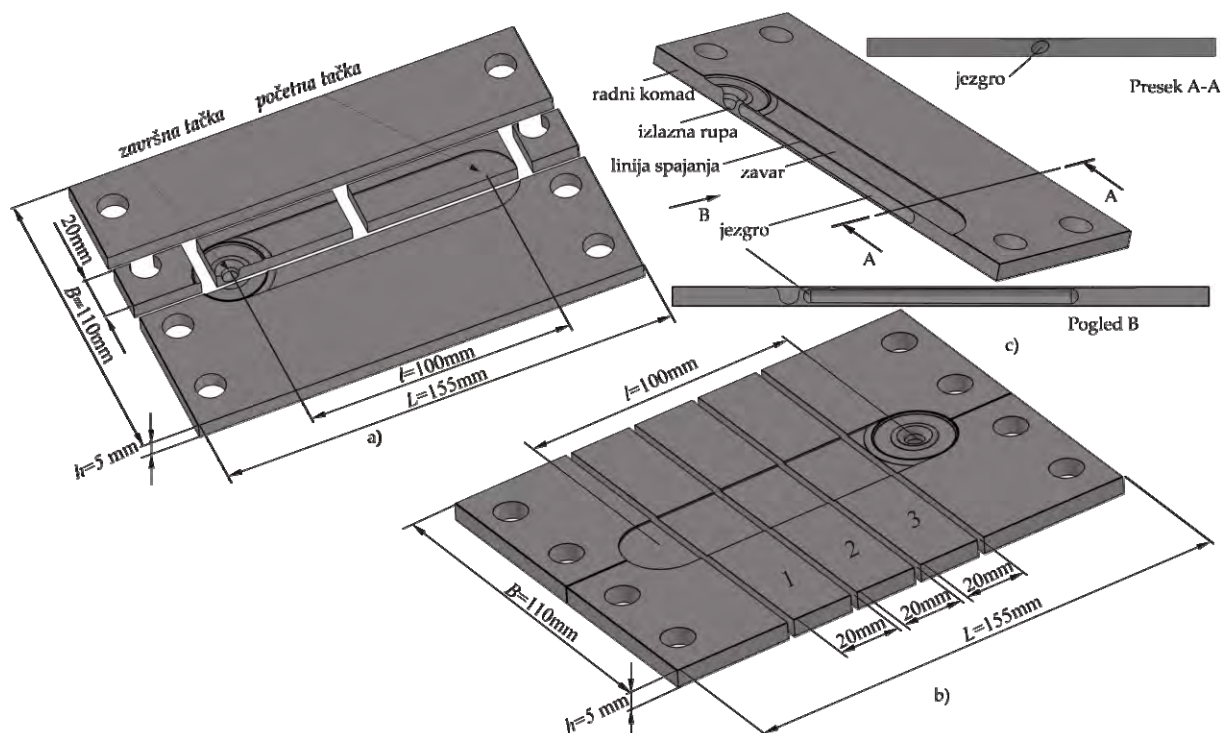
Slika 5 pokazuje radnu mašinu sa opremom za merenje, alat i obradak zavarivanja i tipičan dijagram eksperimentalnih vrednosti obrtnog momenta, aksijalne sile i angažovane

snage na alatu. Vrednosti obrtnog momenta i aksijalne sile su određene merenjem dok je angažovana snaga na alatu izračunata u odnosu na izmereni obrtni moment.

4.1. Mehaničko ispitivanje uzoraka zavarenih trenjem sa mešanjem

Eksperimentalna ispitivanja zavarivanja legure Al 2024 T351 su vršena pre objavljivanja prvih FSW međunarodnih standarda [4-8], tako da su dimenzije uzoraka koji se korišćeni za IBR ispitivanja kao i za mehanička ispitivanja sa razaranjem, nisu standardnih vrednosti. Uzorci za ispitivanje su izrezani iz zavarenih komada prema šemi datoj na slici 6. Iz svake od zavarenih ploča je izrađeno po 3 uzorka.

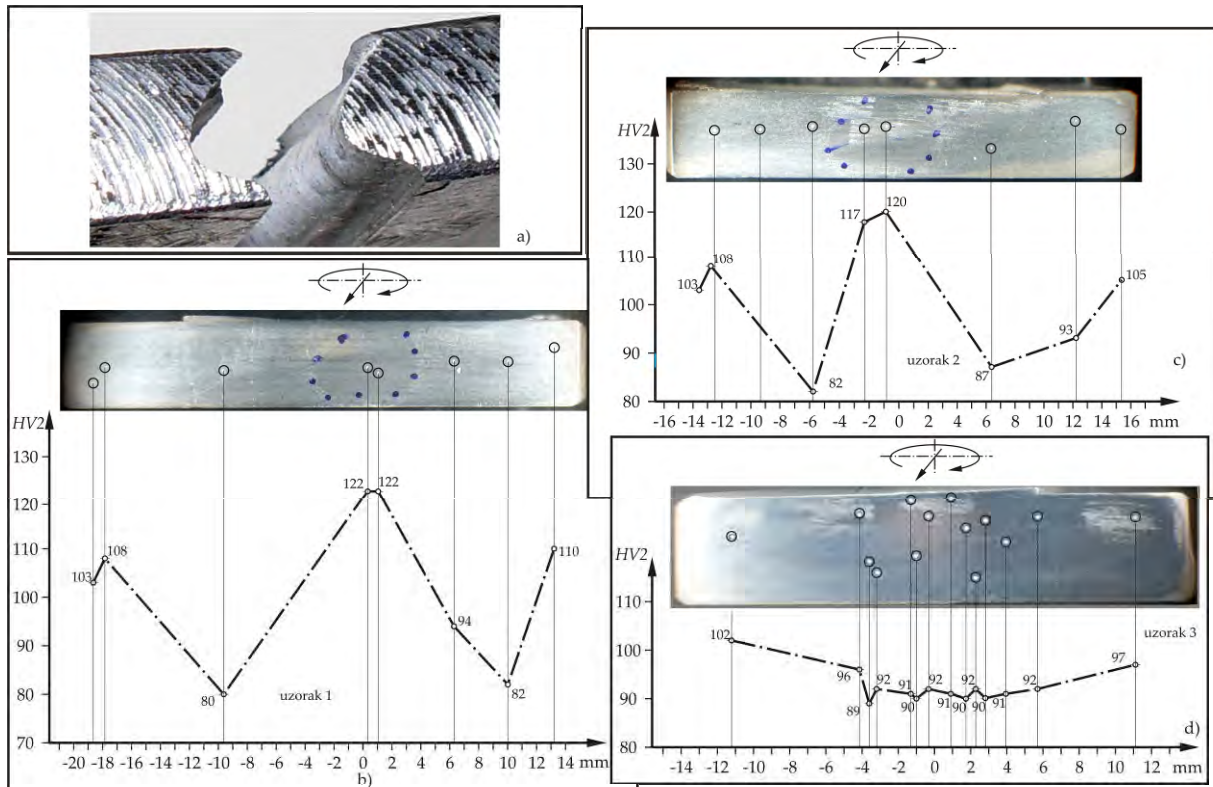
Pre izrade epruveta, svi zavareni spojevi su vizuelno, ultrazvučno testirani, a neki zavareni spojevi, i radiografski testirani. Na epruvetama su vršena metalografska ispitivanja, vršeno je ispitivanje tvrdoće, ispitivanje zatezanjem i ispitivanje savijanjem sa strane korena / lica zavara.



Slika 6. Šema isecanja i dimenzije poprečnih i uzdužnih uzoraka iz zavarenih ploča

Najveća tvrdoća se najčešće nalazi u zoni jezgra i opada u ZUT, a u osnovnom metalu ima vrednosti više nego u ZUT ali niže nego u jezgru. Međutim, primetno je da tvrdoća nije ista kod različitih uzoraka: kod uzorka broj 3 tvrdoća je najniža u zoni jezgra (slika 7 a, b i c).

Izvršeno je ispitivanje epruveta zatezanjem i rezultati ispitivanja su prikazani u tabeli 3. Primećeno je da jezgro nema isti oblik i dimenzije duž čitavog zavarenog spoja. Jezgro je najveće kod prvog uzorka i opada ka trećem uzorku. Takođe je primećeno da efikasnost spoja (odnos nosivosti zavarenog spoja u odnosu na nosivost materijala osnovnog metala) nije jednaka kod svakog uzorka: kod prvog uzorka je efikasnost najniža i iznosi oko 55%, kod drugog je nešto viša (60%-65%) i kod trećeg uzorka dostiže najvišu vrednost efikasnosti od 70%-80%.



Slika 7. a) Izgled prelomljenog uzorka sa izraženom granicom jezgra b), c), d) Vrednosti tvrdoće i lokacija mernih tačaka na uzorcima

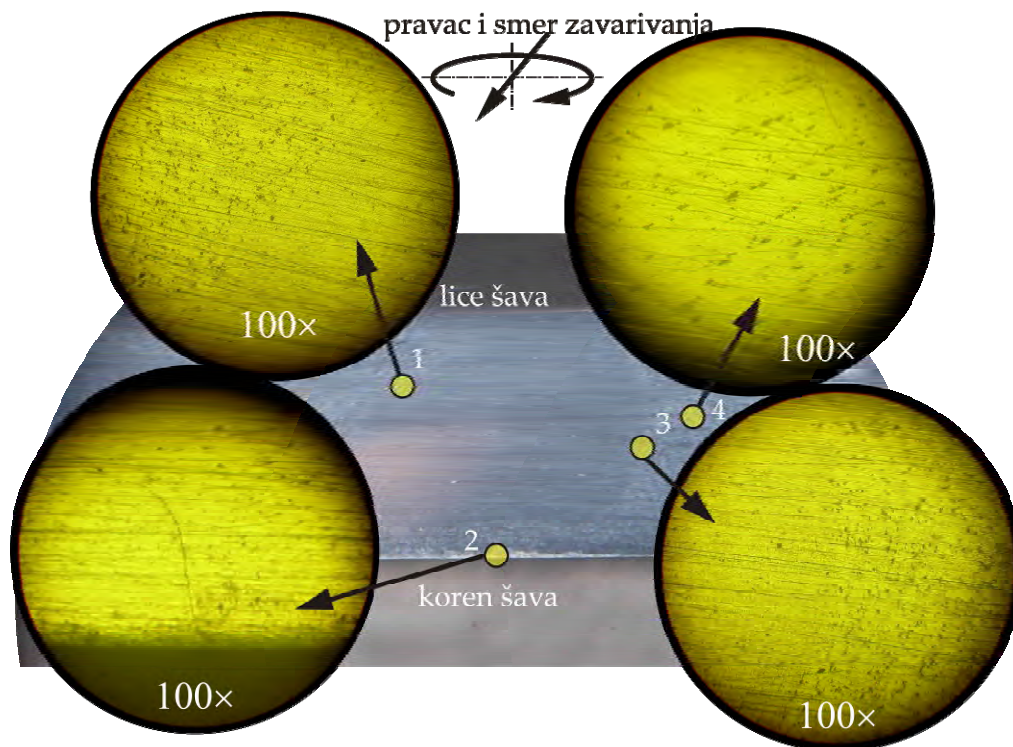
Tabela 3. Rezultati ispitivanja epruveta zatezanjem

| Oznaka zavarene probe iz koje je uzeta epruveta | Oznaka epruvete prema slici 7.1.13 | Eksp. sila kidanja epruvete F_{ke} [kN] | Poprečni presek epruvete A_e [mm ²] | Napon na granici kidanja epruvete $R_{me} = \frac{F_{ke}}{A_e}$ [N/mm ²] | Dimenzije jezgra $b_j \times h_j$ [mm×mm] | Napomena |
|---|------------------------------------|---|---|--|---|--|
| K1119TO0 | 1 | 30,6 | 6 × 20 = 120 | 255 | 6 × 4.5 | Do kidanja epruvete došlo je u metalu šava |
| | 2 | 32 | | 266,7 | 4.8 × 3.8 | |
| | 3 | 40,3 | | 335,8 | 3.8 × 3.5 | |
| K1120TO0 | 1 | 29,5 | | 245,8 | 6 × 4.2 | |
| | 2 | 35,4 | | 295 | 5.2 × 3.9 | |
| | 3 | 42 | | 350 | 4.2 × 3.5 | |
| K1121TO0 | 1 | 26,5 | | 220,8 | 5.8 × 4.5 | |
| | 2 | 38 | | 316,7 | 4.6 × 4.3 | |
| | 3 | 41,3 | | 344,2 | 4 × 3.8 | |

Ispitivanje epruveta savijanjem je izvršeno oko korena i oko lica šava, a ugao savijanja je dobijen od 0° do 12°, i pucanje uzorka se uvek dešavalo u zoni spoja. Poređenja radi, izrezani su uzorci iz osnovnog metala i ugao savijanja je uvek iznosio 90°.

Na slici 8 je dat makrosnimak zavarenog spoja sa karakterističnim strukturama materijala. Veoma lako se može uočiti gotovo elipsast oblik jezgra zavarenog spoja, granica jezgra i promena stuktore osnovnog metala na granivci jezgra. Radi ilustracije, dat je prikaz zavarenog spoja sa prslinom na korenu šava, na samoj liniji spajanja radnih komada. Prslina,

u stvari, predstavlja nepotpun provar spoja usled nepotpunog prodiranja alata i/ili nedovoljne aksijalne sile primenjene na alatu tokom procesa zavarivanja.



Slika 8. Snimak zavarenog spoja sa karakterističnim strukturama materijala

5. ZAKLJUČAK

Analitički model za određivanje količine generisane toplote pri FSW, razvijen na Mašinskom fakultetu u Niš, je složen i razmatra veliki broj uticajnih parametara. Metode kojima je vršeno istraživanje i razvoj modela su eksperimentalne, numeričke, simulacione i analitičke, a analitički model za određivanje količine generisane toplote ih sve objedinjava, i pomoću originalnog softvera, njima upravlja.

Za potrebe razvoja i verifikacije analitičkog modela za procenu količine generisane toplote tokom zavarivanja trenjem sa mešanjem vršeni su brojna eksperimentalna ispitivanja zavarivanja legure aluminijuma 2024 T351.

Primarni cilj eksperimentalnih istraživanja bio je da se istraže parametri koji dominantno utiču na generisanje toplote, dok sekundarni, ali ne manje važan od osnovnog, cilja je bio da se izvrši zavarivanje na teško zavarljivoj leguri klasičnim postupcima zavarivanja- Al 2024 T351 i postigne zadovoljavajući kvalitet zavara. Uspešno zavarivanje podrazumeva određeni (propisani) nivo nesavršenosti zavarenog spoja i određene karakteristike nosivosti. Po izboru optimalnih parametara zavarivanja, uz adekvatnu geometriju alata za zavarivanje, dobijeni su zavareni spojevi koji zadovoljavaju odgovarajuće nivoe nesavršenosti. Ostvarena je zatezna efikasnost zavarenog spoja od 55%-80% što odgovara rezultatima koji se sreću u literaturi. Savojna efikasnost zavarenih spojeva je od 0%-11%. Eksperimentalna istraživanja sprovedena u okviru disertacije [2] pokazuju uslovnu zavarivost legure 2024 T351 koja je prisutna i primenom FSW.

ZAHVALNOST AUTORA

Autori izražavaju svoju zahvalnost prof. dr Miroslavu Đurđanoviću, dr Aleksandru Živkoviću, mr Milenku Peroviću, mr Slobodanu Jovanoviću, Tihomiru Lazoviću, i Igoru Radisavljeviću na iskrenoj pomoći, saradnji, ustupljenim rezultatima iz svojih istraživanja, savetima i materijalnoj pomoći u realizaciji eksperimentalnih istraživanja prikazanih u ovom radu.

LITERATURA

- [1] Nandan R. DebRoy T. Bhadeshia H.K.D.H. Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties. *Progress in Mat. Sci.* 2008; 53 (6): 980–1023.
- [2] Mijajlović, M., Investigation and development of analytical model for estimation of amount of heat generated during FSW, Ph.D. thesis, University of Nis, Faculty of Mechanical Engineering Nis, 2012.
- [3] Živković, A: Influence of friction stir welding tool geometry on properties of welded joint of alloys Al 2024, Ph.D thesis, University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, 2011.
- [4] ISO 25239-1: 2011 Friction stir welding - Aluminium - Part 1: Vocabulary.
- [5] ISO 25239-2:2011 Friction stir welding - Aluminium - Part 2: Design of weld joints.
- [6] ISO 25239-3:2011 Friction stir welding - Aluminium - Part 3: Qualification of welding operators.
- [7] ISO 25239-4:2011 Friction stir welding - Aluminium - Part 4: Specification and qualification of welding procedures.
- [8] ISO 25239-5:2011 Friction stir welding - Aluminium - Part 5: Quality and inspection requirements.