



## Friction Stir welding - Development and Application

### Zavarivanje trenjem sa miješanjem - razvoj i primjena

N. Šibalić\*<sup>1</sup>, M. Vukčević<sup>1</sup> and M. Mumović<sup>1</sup>

<sup>1</sup>University of Montenegro, Faculty of Mechanical Engineering, Džordža Vašingtona bb, Podgorica, Montenegro

**Abstract:** The paper presents the process of Friction Stir Welding, then gives a brief history of development, application in industry, adopted terminology of the process, as well as an review of selected research. The essence of the process is welding in the solid state, where melting of the material is avoided, which FSW classifies as an ecologically clean and energy efficient process, with exceptionally good and reliable characteristics of the welded joint. A great advantage is in joining hard-to-weld similar and dissimilar materials, using a rotating tool, with heat generation, so that the material is heated, plastically deformed and joined in a warm state. It is widely applied in welding butt joints of aluminum alloy plates in one pass with a thickness of 0.3 mm to 75 mm. The paper also provides an overview of a number of researches on the Friction Stir Welding process, which relate to: plates of different thicknesses and materials, different joint types, analysis of the microstructure of the welded joint, flow of materials, determination of temperature and force components, numerical simulations and mechanical testing. The future directions of the development of this technology are also given.

**Keywords:** Friction stir welding - FSW, aluminium alloys, process terminology, energy efficiency

**Apstakt:** Rad se odnosi na prikaz postupka Zavarivanja trenjem sa miješanjem (Friction Stir Welding), zatim daje kratku istoriju razvoja, primjenu u industriji, usvojenu terminologiju postupka, kao i pregled izabranih istraživanja. Suština procesa je zavarivanje u čvrstom stanju, gdje je izbjegnuto topljenje materijala, što postupak FSW svrstava u ekološki čiste i energetske efikasne postupke, sa izuzetno dobrim i pouzdanim karakteristikama zavarenog spoja. Velika prednost je u spajanju teško zavarivih istorodnih i raznorodnih materijala, korišćenjem rotirajućeg alata, uz generisanje toplote, tako da se materijal zagrijava, plastično deformiše i spaja u toplom stanju. Najveća primjena je kod zavarivanja sučeonih spojeva lima od legure aluminijuma u jednom prolazu debljine od 0.3 mm do 75 mm. U radu je dat i pregled jednog broja istraživanja postupka Zavarivanja trenjem sa miješanjem, koja se odnose na: limove različitih debljina i materijala, različitih spojeva, analizu mikrostrukture zavarenog spoja, tečenje materijala, praćenje temperature i komponenata sila, numeričke simulacije i mehanička ispitivanja. Dati su i budući pravci razvoja ove tehnologije.

**Ključne riječi:** Zavarivanje trenjem sa miješanjem - FSW, legure aluminijuma, terminologija postupka, energetska efikasnost

## 1 UVOD

Zavarivanje trenjem sa miješanjem je nekonvencionalni postupak zavarivanja koji je poznat pod akronimom FSW (Friction Stir Welding). Prema standardu EN ISO 4063:2023, postupak FSW je definisan kao tip 43, sa tri podtipa: 431 Friction stir spot welding, 432 Refill friction stir spot welding i 433 Stitch friction stir spot welding, koji pripadaju postupcima grupe 4 Welding with pressure. Patentiran je na Institutu

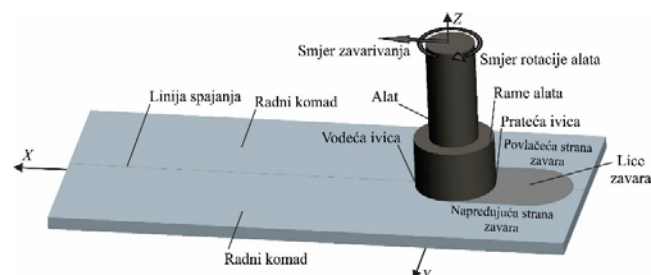
za zavarivanje (The Welding Institute - TWI) u Ujedinjenom Kraljevstvu 1991. godine kao tehnika spajanja u čvrstom stanju, odnosno bez topljenja materijala i prvobitno se primjenjivao samo na legure aluminijuma [1-6]. FSW pripada grupi ekološki čistih postupaka i ne zagađuje životnu sredinu. Za razliku od konvencionalnih postupaka zavarivanja, kod FSW postupka nema dodatnog materijala, nema zaštitnog gasa, nema štetnih isparenja, kao ni štetnog zračenja.

\* nikola@ucg.ac.me

Takođe, postupak je energetski efikasan jer se energija ne troši za topljenje materijala, već samo za pokretanje elektromotora mašine za zavarivanje. Tako da je primjena postupka FSW u industrijske svrhe izuzetno isplativa, jer se ostvaruju velike uštede električne energije. Postupak FSW je pronašao svoju primjenu gotovo u svim granama industrije, a najviše u svemirskoj, avionskoj, brodogradnji, željezničkoj, a u skorije vrijeme i auto industriji. Odlikuju ga izuzetno dobre karakteristike zavarenog spoja, mogućnosti zavarivanja limova većih debljina, a kao najznačajnija odlika je zavarivanje teško zavarivih istorodnih materijala, kao i zavarivanje raznorodnih materijala. Ovim postupkom najviše se zavaruju istorodni materijali legure aluminijuma, legure bakra, legure magnezijumu, čelik, legure titanijuma itd, kao i raznorodni materijali aluminijum i bakar, aluminijum i čelik itd. Postupak FSW se izvodi na mašini za zavarivanje, univerzalnoj glodalici, CNC mašini ili korišćenjem specijalizovane robotske ruke. Ove mašine prema tipu upravljanja mogu biti kontrolisane položajem i kontrolisane pritiskom.

Postupak se odvija tako što se koristi alat za zavarivanje, koji je cilindričnog oblika. Alat se sastoji od dva koncentrična dijela različitih prečnika. Dio alata većeg prečnika se naziva rame alata (shoulder), dok se dio alata manjeg prečnika naziva trn alata (pin) [1-6]. Rame alata može biti sa upuštenim dijelom, dok je trn alat najčešće konusnog oblika, a može biti profilisan sa zavojnicom ili sa različitim oblicima žljebova. Alat za zavarivanje se okreće velikom brzinom rotacije koja zavisi prvenstveno od vrste i debljine materijala. Odvijanje procesa se dijeli u dvije faze (Slika 1). U prvoj fazi alat se kreće aksijalno i zariva se u materijal. Tom prilikom se generiše toplota usled trenja koje se stvara između radnih komada i površine trna alata, kao i usled plastične deformacije materijala. Kada rame alata dohvati površinu radnog komada i alat počne da se kreće longitudinalno počinje druga faza ili faza zavarivanja materijala, gdje dolazi do mehaničkog miješanja i spajanja materijala [6, 7]. Nakon prolaska alata, duž linije spoja, iza ramena alata se stvara brazda glatkog zagrijanog materijala koji se hladi, a između radnih komada, se formira monolitan spoj, dok se donja

površina radnog komada formira na oslonoj ploči, koja je glatka i ravna. U toku odvijanja ove faze pored ranije navedenih izvora toplote, najveći dio toplote se dobija usled trenja ramena alata o površinu radnih komada [6, 7]. Tako na generisanje toplote najveći uticaj imaju geometrijski parametri alata i kinematski parametri koji direktno utiču na kvalitet zavarenog spoja.



Slika 1 - Alat i radni komadi

Kod postupka FSW, zavareni spoj (zavar) je asimetričan, pa su definisane napredujuća i povlačeća strana zavara. Napredujuća strana zavara je definisana kao strana gdje se poklapaju smjerovi vektora brzine rotacije alata i vektora brzine zavarivanja. Povlačeća strana zavara je definisana kao strana gdje su suprotni smjerovi vektora brzine rotacije alata i vektora brzine zavarivanja. Vodeća ivica je prednji dio alata, a prateća ivica je zadnji dio alata. Lice zavara je gornja površina zavarenih radnih komada koja se formira posle prolaska alata, a korijen zavara je donja površina.

Na licu zavara se nalaze karakteristični otisci od alata u obliku polukružnih rubova. Razmak između dva ruba odgovara putu koji pređe alat po radnim komadima u smjeru zavarivanja za vrijeme jedne rotacije.

U zavisnosti od vrste legure i parametara zavarivanja ovi rubovi mogu biti više ili manje uočljivi. Na licu zavara, formira se nesavršenost od viška materijala koji je isturen ili izbačen i tekao je preko gornje površine radnih komada. Ova nesavršenost se često naziva „bljesak” (flash) i dominantna je na povlačećoj strani zavara. Pravilnim izborom parametara zavarivanja i dizajna alata „bljesak” može biti minimiziran. Na kraju procesa u zavaru pojavljuje se izlazna rupa, koja ostaje nakon izlaska alata iz zavarenih radnih komada. Izlazna rupa ima oblik i veličinu koja odgovara geometriji trna korišćenog alata [1-3, 6, 8-10].

## 2 USVOJENA TERMINOLOGIJA

Standard ISO 25239-1:2020 se odnosi na zavarivanje aluminijuma postupkom FSW, gdje je definisana terminologija. U Tabeli 1 dati su usvojeni termini [11] koji se koriste kod postupka FSW.

Tabela 1 – Terminologija kod postupka FSW

Termin:	Eng.
Radni komad	<i>Workpiece</i>
Alat za zavarivanje	<i>Tool</i>
Rame alata - dio alata većeg prečnika koji je u kontaktu sa površinom osnovnog materijala	<i>Shoulder</i>
Trn alata - dio alata manjeg prečnika koji prodire u osnovni materijal	<i>Pin</i>
Bobin alat - alat za zavarivanje sa dva ramena odvojena trnom fiksne ili podesive visine	<i>Bobbin tool</i>
Lice zavara	<i>Weld face</i>
Povlačeća strana zavara	<i>Retreating side of weld</i>
Napredujuća strana zavara	<i>Advancing side of weld</i>
Izlazna rupa	<i>Exit hole</i>
Vodeća ivica	<i>Leading edge</i>
Prateća ivica	<i>Trailing edge</i>
Vodeća strana trna alata	<i>Pin leading face</i>
Prateća strana trna alata	<i>Pin trailing face</i>
Osnovni materijal	<i>Parent material</i>
Zona uticaja toplote - ZUT	<i>Heat affected zone - HAZ</i>
Zona termo-mehaničkog uticaja - ZTMU	<i>Thermo-mechanically affected zone -TMAZ</i>
„Grumen” ili Zona intenzivnog miješanja	<i>Weld nugget or Stirred zone</i>
Ravanska pukotina	<i>Planar flaw</i>
Praznina u zavaru	<i>Void</i>
„Tunel” defekt	<i>Tunnel defect (wormhole)</i>
„Bljesak” - nesavršenost od isturenog ili izbačenog materijala na licu zavara	<i>Flash</i>
Rukavac - oblast od materijala koji je tekao ispod ramena alata, a iznad „grumena”	<i>Flow arm</i>
Depresija lica zavara	<i>Underfill</i>

Brzina zavarivanja - translatorna brzina alata	<i>Welding speed</i>
Brzina rotacije - ugaona brzina alata	<i>Rotation speed</i>
Rotacija u smjeru kazaljke na satu gledano odozgo na alat	<i>Clockwise rotation</i>
Ugao nagiba alata - ugao ose alata nagnut u odnosu na normalu površine radnih komada, suprotno smjeru pravca zavarivanja	<i>Tilt angle</i>
Bočni ugao nagiba alata - ugao ose alata nagnut u odnosu na normalu površine radnih komada, ka povlačećoj strani zavara	<i>Side tilt angle</i>
Dubina prodiranja - dubina do koje prodire najniži dio ramena alata kada postoji ugao nagiba alata	<i>Heel plunge depth</i>
Otisak ramena alata u konataktu sa površinom radnog komada	<i>Tool shoulder footprint</i>
Longitudinalna sila - $X$	<i>Longitudinal force - <math>X</math></i>
Bočna sila - $Y$	<i>Side force - <math>Y</math></i>
Aksijalna sila - $Z$ ili Sila zavarivanja	<i>Axial force - <math>Z</math>, or Welding force</i>
Bočno pomjeranje ose alata od linije spajanja kod zavarivanja raznorodnih materijala	<i>Lateral offset</i>

## 3 MIKROSTRUKTURNE ZONE

Postoji više različitih termina koji opisuju mikrostrukturne promjene kod postupka FSW. Asimetrična priroda zavara i neobičan oblik stepenastog alata, uslovlili su da, kao rezultat zavarenog spoja imamo veoma karakterističnu mikrostrukturu. Podjela na mikrostrukturne zone je usvojena na TWI institutu, tako da se prilikom odvijanja procesa zavarivanja javljaju četiri zone: zona osnovnog materijala, zona uticaja toplote, zona termo-mehaničkog uticaja i takozvana „grumen” zona, odnosno zona intenzivnog miješanja materijala koja je dio zone termo-mehaničkog uticaja [6, 12].

U zoni osnovnog materijala nema plastičnog deformisanja materijala, niti uticaja toplote, koji mogu uticati na mehaničke osobine, tako da u zoni osnovnog materijala nema mikrostrukturnih promjena. Zona

uticaja toplote je zajednička za sve procese zavarivanja, pa postoji i kod procesa FSW. Ova zona je izložena toplotnom uticaju, ali ne dolazi do plastičnih deformacija. Tokom procesa zavarivanja, materijal je pretrpio određeni termički ciklus koji dovodi do promjena mehaničkih osobina i mikrostrukture. Veličina zone uticaja toplote direktno zavisi od količine unijete toplote. Temperature u ovoj zoni su niže od temperatura u zoni termo-mehaničkog uticaja, ali još uvijek imaju značajan efekat, ako je mikrostruktura termalno nestabilna [6, 12]. U zoni termo-mehaničkog uticaja, materijal je izložen plastičnim deformacijama i toplotnim uticajima od strane alata koji se javljaju na obje strane zone miješanja. Kod aluminijuma u zoni miješanja jasno se izdvajaju tri oblasti: tzv. „grumen” oblast, oblast izvan „grumena” i oblast rukavaca iznad „grumena”. Oblast izvan „grumena” u manjoj mjeri je deformisana i u zavisnosti od legure, ne mora da bude rekristalizovana. Granica između „grumena” i zone termo-mehaničkog uticaja je jasno vidljiva. Rukavac (flow arm) iznad „grumena”, se formira od materijala koji je tekao ispod ramena alata i povlači se oko prateće strane alata iznad „grumena” i odnosi se ka napredujućoj strani zavara. Zbog nesimetričnosti zavara, napredujuća i povlačeća strana zavara ispoljavaju značajne razlike. Prelaz od „grumena” zavara prema osnovnom materijalu je veoma oštar na napredujućoj strani i više postepen na povlačećoj strani zavara. Oblast manje deformisanog materijala (oblast izvan „grumena”), na napredujućoj strani zavara je veoma uska. Kod drugih materijala ne postoji jasno izražena rekristalizovana oblast „grumena”, već će čitava zona termo-mehaničkog uticaja biti djelimično rekristalizovana. Ovo je karakteristično za materijale koji imaju difuziono kontrolisan i termalno aktiviran fazni preobražaj, koji će dovesti do rekristalizacije [6, 12]. Zona miješanja je („grumen” dinamički rekristalizovana zona) zona velike plastične deformacije materijala, koja odgovara otprilike lokaciji trna alata tokom procesa FSW. Zrna u ovoj zoni su grubo promiješana i često reda veličine manje od veličine zrna u zoni osnovnog materijala. Veličina zrna u zavisnosti od vrste legure i uslova zavarivanja, kreće se od 1  $\mu\text{m}$  do 10  $\mu\text{m}$ . Ova oblast se formira odmah ispod ramena alata, a širina joj je

nezatno veća od prečnika trna alata. Ova zona se često smatra sub-zonom zone termo-mehaničkog uticaja. Jedinствена karakteristika ove zone je pojava nekoliko koncentričnih prstenova, koji se nazivaju „luk - prsten” strukture [6, 12].

Prilikom odvijanja procesa zavarivanja kao nepovoljan defekt može se javiti zapreminska greška koja je poznata pod imenom „tunel” defekt, kao rezultat nedovoljnog tečenja materijala oko trna alata do napredujuće strane zavara. „Tunel” defekt najčešće nastaje kada alat napreduje velikom brzinom zavarivanja [13]. Zbog ponovljive prirode odvijanja procesa, „tunel” defekt je neprekidan, pa se kao takav može koristiti i za dobijanje određenih proizvoda.

#### **4 TEHNOLOŠKI PARAMETRI POSTUPKA**

U osnovne tehnološke parametre postupka FSW spadaju: kinematski (brzina rotacije alata i brzina zavarivanja) i geometrijski (prečnik ramena alata, prečnik trna alata i ugao nagiba trna alata). Pored ovih parametara značajni su i dubina prodiranja ramena alata u materijal, kao i ugao nagiba alata [12, 14, 15-20]. Ovi parametri najviše zavise od termofizičkih svojstava materijala i debljine radnih komada, a njihove optimalne vrijednosti se za sada, određuju isključivo eksperimentalnim putem. Oni moraju biti pravilno odabrani, da bi se obezbijedilo uspješno i efikasno odvijanje procesa zavarivanja [12, 14].

##### **4.1 Brzina zavarivanja i brzina rotacije alata**

Odnos između brzine zavarivanja i toplotne energije u toku procesa zavarivanja je dosta složen, ali generalno se može reći, da će povećanje ili smanjenje brzine zavarivanja rezultirati hladnijim ili toplijim zavarima. U cilju da se dobije što bolji zavar, potrebno je da materijal oko alata bude dovoljno zagrijan da omogući plastično tečenje materijala i smanji silu koja djeluje na alat. Ako materijal nije dovoljno zagrijan, onda je moguće da se javljaju određene praznine ili druge greške koje mogu biti prisutne u zoni miješanja, a u ekstremnim slučajevima može doći i do loma alata. Pretjeran unos toplote može biti štetan za konačan izgled zavara, jer može doći do topljenja materijala. Brzina rotacije alata

tokom odvijanja procesa zavarivanja je konstantna i kreće se kod aluminijuma i njegovih legura u širokim granicama od 200 o/min do 2000 o/min, dok je za neke materijale i veća. Brzina zavarivanja takođe je konstantna i kod zavarivanja legura aluminijuma manje debljine može da iznosi i do 2000 mm/min, ali kod visoko kvalitetnih legura je mnogo manja i kreće se oko 100 mm/min. Brzina zavarivanja  $v$ , brzina rotacije alata, odnosno ugaona brzina alata  $\omega$  i poluprečnik trna alata  $r$  definisani su odnosom  $v/(\omega \cdot r)$  koji se obično kreće u granicama od 0.01 do 0.02 [14].

#### 4.2 Sile kod postupka FSW

Za pravilno odvijanje postupka FSW, izuzetno je važno poznavanje komponenti sila koje djeluju na alat tokom procesa zavarivanja. Komponente sile koje djeluju kod postupka FSW su: aksijalna, longitudinalna i bočna sila.

Aksijalna sila -  $F_z$  je potrebna da održi poziciju alata i materijal ispod površine, odnosno to je u stvari sila kojom alat deluje na materijal. Najveća je u početnom periodu prodiranja trna alata kroz materijal, a zatim se smanjuje, dok rame alata ne dohvati gornju površinu materijala koji se zavaruje. Tada ponovo počinje da raste dok se ne dostigne određena temperatura kad počinje da opada i zadržava svoju konstantnu vrijednost sve do završetka procesa zavarivanja. Kako je komponenta aksijalne sile dominantna kod postupka FSW, ona se često naziva i sila zavarivanja.

Longitudinalna -  $F_x$  djeluje u smjeru kretanja alata, a pozitivan smjer se definiše sa smjerom kretanja alata. Budući da se ova komponenta sile javlja kao posledica otpora materijala kretanju alata, može se očekivati da će ova sila biti veća, ako se smanji temperatura materijala oko alata.

Bočna sila -  $F_y$  djeluje normalno na pravac kretanja alata i pozitivan smjer se definiše ka napredujućoj strani zavara. Ova sila zbog izuzetno malog uticaja na odvijanje procesa u analizi se uglavnom zanemaruje.

## 5 ISTRAŽIVANJA I RAZVOJ POSTUPKA FSW

Dosadašnji nivo istraživanja u laboratoriji Mašinskog fakulteta je na nivou Technology Readiness Level (TRL5), odnosno izvršeno je sučeono zavarivanje legure aluminijuma AA6082-T6, AA6060, AA7049, AA1050, zavarivanje raznorodnih materijala, AA6082-T6 sa CuETP i AA6082-T6 sa čelikom C45, kao i zavarivanje ugaonog spoja legure AA6082-T6, kroz teorijsku analizu, eksperimentalno istraživanje i numeričku simulaciju (Teorija, Eksperiment, Simulacija - TES pristup) [15].

Istraživanja procesa zavarivanja kod postupka FSW, bazirana su prvenstveno na rezultatima eksperimentalnih istraživanja i numeričkih simulacija. Radovi [1-5, 7, 9, 10, 15-20] kroz izvođenje eksperimenta istražuju uticajne parametre zavarivanja, tok materijala, generisanje toplote, sile zavarivanja, određivanje mehaničkih parametara, ispitivanje mehanike loma, kao i određivanje mikrostrukture zavarenog spoja. Postupkom FSW, kroz brojna istraživanja izvršeno je uspješno zavarivanje velikog broja različitih materijala: legura aluminijuma: serije 1XXX (komercijalno čist aluminijum), serije 2XXX (Al-Cu), serije 3XXX (Al-Mn), serije 4XXX (Al-Si), serija 5XXX (Al-Mg), serija 6XXX (Al-Mg-Si), serije 7XXX (Al-Zn) i serije 8XXX (Al-Li i ostali elementi), legura bakra, olova, legura titanijuma, legura magnezijuma, cinka, sintetičkih polimera, niskougljeničnih čelika, čelika austenitne i martenzitne strukture, dupleks čelika kao i legura nikla. Numeričke simulacije postupka FSW istraživane su kroz veliki broj radova, gdje se rezultati simulacija do sada odnose na generisanje i distribuciju toplote, termo-mehaničko modeliranje, analizu sile i tečenje materijala. Bilo je i pokušaja modeliranja primjenom trodimenzionalnih visoko-plastičnih modela. Numerička simulacija kod procesa FSW je bazirana na metodi konačnih elemenata, konačnih razlika i konačnih zapremina. Neka istraživanja daju rezultate sa aspekta transfera toplote za vrijeme procesa zavarivanja trenjem. Trodimenzionalni model transfera toplote kombinuje Ojlerove karakteristike i metod konačnih razlika kod modeliranja

kretanja alata. Termo-mehanički model uključuje i mehaničko miješanje materijala od ramena alata.

Postupak FSW izrodio je čitavu familiju tehnologija, od kojih se najviše koristi kao tehnologija zavarivanja „Welding” i kao tehnologija obrade „Processing”.

U radu [17] je data primjena nove aditivne tehnologije za metal (Additive Friction Stir-Enabled Solid-State Manufacturing), nanošenje aditiva trenjem sa miješanjem, istražuje se za upotrebu u popravci djelova od legure aluminijuma 7075. Popravke uključuju demonstraciju punjenja prolaznih rupa i dugih, širokih žljebova. Ova tehnologija je od interesa za avio industriju, u kojoj se legura aluminijuma AA7075 široko koristi pri proizvodnji zahtjevnih komponenti, zbog dobrih mehaničkih osobina i male gustine.

U radu [18] je predstavljeno tačkasto zavarivanje trenjem sa miješanjem (FSSW-Refill) legure aluminijuma AA5042, koje se koristi za dobijanje čvrstih spojeva. U radu je izvršeno istraživanje uticaja dubine prodiranja, brzine rotacije i brzine prodiranja na mikrostrukturu i čvrstoću materijala na smicanje. Najuticajni parametri su dubina prodiranja i brzina rotacije alata, dok zapreminski nedostaci koji se javljaju, imaju mali uticaj na mehaničke performanse zavarenih spojeva. Za korelaciju parametara procesa korišćen je softverski paket Statistica.

U radu [19] su upoređeni zavareni spojevi dobijeni postupkom SSFSW (Stationary Shoulder Friction Stir Welding) i postupkom FSW, kod zavarivanja legure aluminijuma visoke čvrstoće AA7050-T7651. Kod oba postupka razmatran je unos toplote, gdje je za optimalne okvirne uslove postupak SSFSW imao 30 % niži unos toplote od FSW postupka, a nerotirajuće rame alata je rezultiralo užim zavarenim spojevima i manjim uticajem ZUT-a. Zavari SSFSW u odnosu na FSW su imali ujednačenija svojstva po debljini i pokazali bolje rezultate u testiranju na zatezanje. Postupak SSFSW je rezultirao daleko boljom završnom obradom površine, iako je stacionarno rame alata dovelo do nastanka površinskih pukotina pod određenim uslovima zavarivanja. Koncept SSFSW postupka prvi je

predložen u radu [20] kako bi se smanjili veliki temperaturni gradijenti kroz debljinu materijala pri zavarivanju legura titanijuma niske toplotne provodljivosti. Kod SSFSW trn alata se rotira kroz sklop ležaja u ramenu alata, koji je pričvršćen za glavu uređaja za zavarivanje. Tokom zavarivanja nerotirajuće rame alata klizi po površini radnog komada, dok se samo trn alata rotira unutar kućišta.

U radu [21] data je uporedna analiza mjerenja dubine prodiranja ramena alata kod zavarivanja bakarnih kanistera debljine zida 50 mm, pomoću četiri različite metode u cilju automatizovanja procesa zavarivanja. Mjerenje se vrši zbog prirode samog procesa, geometrije radnih komada i mašine, jer usled njihovih specifičnosti se ne može osloniti na tačnost položaja alata kao kod konvencionalnih CNC mašina. Ovako zavareni bakarni kanisteri postupkom FSW se koriste za skladištenje nuklearnog otpada. Od bakarnih kanistera se očekuje da budu netaknuti sledećih 100 000 godina, pri čemu debljina bakarnog zida kanistera predstavlja korozionu barijeru.

Rad [22] ističe prednost postupka FSW u odnosu na ostale postupke zavarivanja kod kompozitnih materijala sa metalnom matricom, jer jedino kod ovog postupka ne dolazi do topljenja materijala. U radu su izvršena mehanička i mikrostrukturna ispitivanja da bi se procijenile karakteristike zone zavara i performanse kompozitnih spojeva AA2124/SiC/25p-T4. Fazna struktura šava određena je difrakcijom rendgenskih zraka, dok je temperatura u zoni zavara određena korišćenjem termoparova.

Rad [23] sistematski razmatra ključna tehnička pitanja u proizvodnji rezervoara za gorivo od legure aluminijuma visoke čvrstoće, korišćenjem FSW postupka, gdje se istražuje dizajn alata, optimizacija procesa, tehnike nedestruktivnog ispitivanja Nondestructive Testing - NDT i tehnike popravke defekata, itd., u avio industriji. Da bi se ispunili izuzetno strogi standardi avio industrije, razvijeni su: alati sa pomjerajućim trnom za FSW, metod spajanja Y prstena i dijela rezervoara sa FSW (lock joint), FSW sa konstantnom sile, on-line NDT, kao i kompletan set

opreme u avio industriji za primjenu FSW postupka kod legura aluminijuma.

Rad [24] je imao za cilj da unaprijedi tehnologiju zavarivanja trenjem sa miješanjem (FSW), visoko energetski efikasnog procesa zavarivanja u čvrstom stanju, za proizvodnju velikih i složenih konstrukcija, kao što su cjevovodi od čelika velike debljine zida sa velikim performansama i za visoke temperature, a postupak se može primijeniti i na terenu. Tehnološke inovacije koje su razvijene u ovom radu pokušale su da riješe dva fundamentalna nedostatka FSW postupka: nemogućnost zavarivanja na terenu i nemogućnost zavarivanja čelika velike debljine zida, što bi proširilo upotrebu FSW postupka u proizvodnji.

Rad [25] istražuje tok kretanja materijala kod postupka FSW eksperimentalnim putem. Daje osnovne odnose i granice dimenzija i oblika alata. Korišćeni su alati sa zavojnicom, gdje je smjer navoja suprotan smjeru okretanja alata, odnosno materijal je guran prema donjoj strani zavara.

Rad [26] daje detaljna objašnjenja kako svaki od geometrijskih parametara alata za zavarivanje utiče na proces i materijale od kojih se alati prave. Alat se najviše oštećuje tokom prodiranja u materijal usled jakih udarnih opterećenja, što je naročito izraženo kod materijala sa malom udarnom žilavošću. Konveksan oblik alata utiče na smanjenje aksijalne sile, dok se optimalan zavar postiže kod alata sa zavojnicom, kada je smjer rotacije suprotan smjeru navoja. Rad daje i uticaj nagiba alata na svojstva zavarenog spoja i definiše odnos 3:1 prečnika ramena alata i debljine materijala.

U radu [27] predstavljena je teorijska i eksperimentalna analiza FSW postupka pri zavarivanju raznorodnih materijala legure aluminijuma AA5083 i čistog bakra. Prilikom procesa zavarivanja alat je pomjeren ka strani mekšeg materijala, u ovom slučaju leguri aluminijuma. Radni komad od legure aluminijuma je postavljen na napredujućoj strani, a čisti bakar na povlaćećoj strani zavara.

Rad [28] opisuje primjenu Computational Fluid Dynamics - CFD analize u softveru FLUENT, na modelovanje trodimenzionalnog kretanja materijala kod

postupka FSW. Standardni alata sa zavojnicom se koristi za analizu, a praćene su veličine: ugao nagiba alata, generisanje toplote i protok toplote. Istraživanje ima za cilj da se bolje razumiju protok materijala oko alata za zavarivanje.

U radu [29] razvijen je alat sa sigurnosnim sistemom koji ima za cilj izbjegavanje preranog oštećenja i omogućava mjerenje primijenjenog pritiska alata. Poboļšani alat je testiran na limovima od legura aluminijuma AA2024-T4 i AA7075-T6. Kvalitet zavarenog spoja je određen analizom mikrostrukture i mjerenjem mikrotvrdoće.

Istraživanje predstavljeno u radu [30] istražuje upotrebu obrtnog momenta umjesto aksijalne sile zavarivanja za kontrolu procesa zavarivanja. Pokazano je, da je kontrola obrtnog momenta ekvivalentna kontroli snage zavarivanja i uzrokuje da se ujednačena količina toplotne energije po jedinici dužine unese u zavareni spoj. Obrtni moment je osjetljiviji na dubinu prodiranja alata od aksijalne sile. Ravno rame alata stvara osjetljiviji region gdje će vrlo mala promena dubine prodiranja proizvesti relativno veliku promjenu obrtnog momenta. Povećani ugao nagiba alata bi mogao da stvori stabilnije sisteme upravljanja eliminisanjem velike i relativno trenutne promjene obrtnog momenta povezane sa ravnim ramenom alata.

## 6 ZAKLJUČANA RAZMATRANJA

Zavarivanje trenjem sa miješanjem je relativno nova i aktuelna tehnologija koja još nije dovoljno istražena. Razvoj tehnologije zavarivanja trenjem sa miješanjem zahtijeva kompleksan TES pristup, za široku klasu različitih oblika spojeva i materijala. Kroz rad je predstavljena primjena postupka FSW, kao i pregled određenog broja istraživanja.

Tehnologija FSW postupka je specifična po svojoj prirodi i zavisi prvenstveno od karakteristika materijala koji se zavaruje, njegove debljine, vrste spoja, kao i od toga da li se zavaruju istorodni ili raznorodni materijali. Tehnologija FSW nam kroz inovativni pristup omogućuje optimizaciju uticajnih parametara, prije svega geometrijskih (prečnika trna alata, ugla nagiba

trna alata i prečnika ramena alata) i kinematskih (brzine zavarivanja i brzine rotacije alata).

Istraživanja su pokazala da je utrošak energije kod postupka FSW mnogo manji nego kod ostalih konvencionalnih postupaka zavarivanja, a sa ekološkog aspekta je ubjedljivo najčistija tehnologija zavarivanja. Postupak je lako automatizovati, a dobijeni zavareni spojevi imaju visok kvalitet, tako da se zbog svoje pouzdanosti, najviše primjenjuje u avionskoj i svemirskoj industriji.

Osim karakteristika kvaliteta zavarenog spoja, kroz primjenu savremenih kompjuterom numerički upravljanih mašina (CNC mašina) povećava se proizvodnost i ekonomičnost FSW postupka, a samim tim i aplikativnost zbog značajnih prednosti u odnosu na ostale postupke.

Budući pravci razvoja istraživačkog tima laboratorije za FSW Mašinskog fakulteta je TRL8 nivo, odnosno dobiti finalni proizvod visokog kvaliteta u realnim uslovima primjene.

## 7 LITERATURA

- [1] Wayne, M.T. et al. (1991). Friction Stir Butt Welding. International Patent Application No PCT/GB92/02203; Wayne M.T. et al (1995). Friction Stir Butt Welding. GB Patent Application No 9125978.8; Wayne M.T. et al (1995). Friction Stir Butt Welding. US Patent 5.460 317.
- [2] Thomas, W., Threadgill, P., Nicholas, E. (1999). Feasibility of Friction Stir Welding Steel, Sience and Technology of Welding and Joining, 4(6), 365-372.
- [3] London, B., Mahoney, M., Bingel, W., Calabrese, M., Waldron, D. (2001). Experimental methods for determining material flow in friction stir welds. Third International Symposium on Friction Stir Welding, Kobe, Japan, 27-28 Sept. 2001. 7 pp.
- [4] Ulysse, P. (2002). Three-dimensional modeling of the friction stir-welding process. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 42(14), 1549-1557, doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00114-1.
- [5] Arbegast, J. W. (2006). Friction Stir Welding After a Decade of Development. Welding Journal, 85(3), 28-35.
- [6] Mishra, S. R., Mahoney, W. M. (2007). Friction Stir Welding and Processing. ASM International, ISBN-13: 978-0-87-87170-840-3
- [7] Song M., Kovacevic R. (2003). Numerical and experimental study of the heat transfer process in friction stir welding. Journal Engineering Manufacture, 217 Part B, 73-85. doi: 10.1243/095440503762502297
- [8] Jata, K., Mahoney, M., Mishra, R., Lienert, T. (2005). Friction Stir Welding and Processing III, TMS, 0-87339-584-0.
- [9] Defalco, J. (2006). Friction Stir Welding VS. Fusion Welding. Welding Journal, 85(3), 42-44.
- [10] Chao, Yuh J., Qi, Xinhai. (1998). Thermal and Thermo-Mechanical Modeling of Friction Stir Welding of Aluminum Alloy 6061-T6. Journal of Materials Processing & Manufacturing Science, 7(2), 215-233, doi:10.1106/LTKR-JFBM-RGMV-WVCF.
- [11] Threadgill, L.P. (2007). Terminology in Friction Stir Welding. Science and Technology of Welding & Joining, 12(4), 357-360, doi:10.1179/174329307X197629.
- [12] www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/friction-stir-welding-147, 04.05.2023.
- [13] Colligan, K. (1999). Material Flow Behavior during Friction Stir Welding of Aluminium. Welding Journal, 229-237.
- [14] Stamenković, D., Đurđanović, M., Mitić, D. (2006). Zavarivanje postupkom „FSW”. Zavarivanje i zavarene konstrukcije, 2, 59-66.
- [15] Šibalić, N., Vukčević, M. (2019). Numerical Simulation for FSW Process at Welding Aluminium Alloy AA6082-T6. Metals, 9(7), 747, doi.org/10.3390/met9070747.
- [16] Ganey, N., Marek, J., Slama, P. (2005). Structure Characteristics of Al-Plate Joined by Friction Stir Welding. Materials Structure, 12(2).
- [17] Griffiths, R. J., Petersen, D. T., Garcia, D., Yu, H. Z. (2019). Additive friction stir-enabled solid-state additive manufacturing for the repair of 7075 aluminum alloy. Appl. Sci., 9(17), doi: 10.3390/app9173486.
- [18] Tier, M. D. et al. (2013). The influence of refill FSSW parameters on the microstructure and shear strength of 5042 aluminium welds. J. Mater. Process. Technol. 213(2), 997-1005, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2012.12.009.
- [19] Wu, H., Chen, Y. C., Strong, D., Prangnell, P. (2015). Stationary shoulder FSW for joining high strength aluminum alloys. J. Mater. Process. Technol., 221, 187-196, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2015.02.015.
- [20] Russell, M. J. et al. (2008). Recent developments in the friction stir welding of titanium alloys. Welding in the World, 52(9/10), 12-15.
- [21] Cederqvist, L., Nielsen, I. (2018). Evaluation of depth controller for friction stir welding of copper canisters. Posiva SKB Report 08, ISSN 2489-2742.
- [22] Bozkurt, Y., Uzun, H., Salman, S. (2011).



- Microstructure and mechanical properties of friction stir welded particulate reinforced AA2124/SiC/25p-T4 composite. *J. Compos. Mater.*, 45(21), 2237-2245, doi: 10.1177/0021998311401067.
- [23] Wang, G., Zhao, Y., Hao, Y. (2018). Friction stir welding of high-strength aerospace aluminum alloy and application in rocket tank manufacturing. *J. Mater. Sci. Technol.*, 34(1), 73-91, doi: 10.1016/j.jmst.2017.11.041.
- [24] Feng, Z. et al. (2015). Flexible Friction Stir Joining Technology. Online Available: <http://www.osti.gov/servlets/purl/1210157/>.
- [25] Guerra, M., Schmidt, C., McClure, J. C., Murr, L. E., Nunes, A. C. (2002). Flow patterns during friction stir welding. *Mater. Charact.*, 49(2), 95-101, doi: 10.1016/S1044-5803(02)00362-5.
- [26] Sharma, S., Handa, A., Singh, S. S. (2021). Influencing geometrical parameters of tools in friction stirring technology: A short review. *Stroj. Cas.*, 71(2), 257-290, doi: 10.2478/scjme-2021-0034.
- [27] Al-Roubaiy, A. O., Nabat, S. M., Batako, A. D. L. (2014). Experimental and theoretical analysis of friction stir welding of Al-Cu joints. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 71(9-12), 1631-1642, doi: 10.1007/s00170-013-5563-z.
- [28] Colegrove P. A., Shercliff, H. R. (2005). 3-Dimensional CFD modelling of flow round a threaded friction stir welding tool profile. *J. Mater. Process. Technol.*, 169(2), 320-327, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.03.015.
- [29] Aissani, M., Gachi, S., Boubenider, F., Benkedda, Y. (2010). Design and optimization of friction stir welding tool. *Mater. Manuf. Process.*, 25(11), 1199-1205, doi: 10.1080/10426910903536733.
- [30] Longhurst, W. R., Strauss, A. M., Cook, G. E., Fleming, P. A. (2010). Torque control of friction stir welding for manufacturing and automation. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 51(9-12), 905-913, doi: 10.1007/s00170-010-2678-3.