

UTJECAJ OBLIKA I DIMENZIJA ALATA PRI ZAVARIVANJU TRENJEM ROTIRAJUĆIM ALATOM

INFLUENCE OF TOOL DESIGN AND DIMENSIONS IN THE FRICTION STIR WELDING

Slobodan Kralj¹, Matija Bušić¹, Zoran Kožuh¹, Damjan Klobčar²,

¹ Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Ivana Lučića 5, 10002 Zagreb, Croatia

² Faculty of Mechanical Engineering, University of Ljubljana, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana, Slovenia

Ključne riječi

Zavarivanje trenjem rotirajućim alatom, alat za zavarivanje, čelo alata, trn alata, unos topline, miješanje materijala

Key words

Friction stir welding, welding tool, tool shoulder, tool pin, heat input, mixing of the material

Sažetak

Pri zavarivanju trenjem rotirajućim alatom alat za zavarivanje je ključna komponenta za uspjeh postupka. Budući da u ovom postupku nema taljenja osnovnog materijala izbjegnuti su svi problemi koji se inače pojavljuju pri zavarivanju taljenjem. U ovom radu dan je pregled svih izvedbi alata i objašnjena je funkcija pojedinih dijelova alata. Alat se sastoji od cilindričnog tijela i trna. Donja površina tijela alata obično se naziva čelo alata. Ova specifična površina prije svega služi za dovodenje topline, a druga funkcija je miješanje materijala na površini limova u spoju. Na vrhu alata obično se nalazi trn čija je primarna funkciju miješanja omekšanog materijala u spoj, a popratna pojava je dovodenje topline koja nastaje trenjem u samom omekšanom materijalu. Premda su do sada uloženi znatni naponi u razvijanju učinkovitih i cijenom prihvatljivih alata, oblikovanje alata većinom je empirijsko, te je potreban znatan rad na unaprijeđivanju oblika alata kako bi se povećala primjena zavarivanja trenjem rotirajućim alatom.

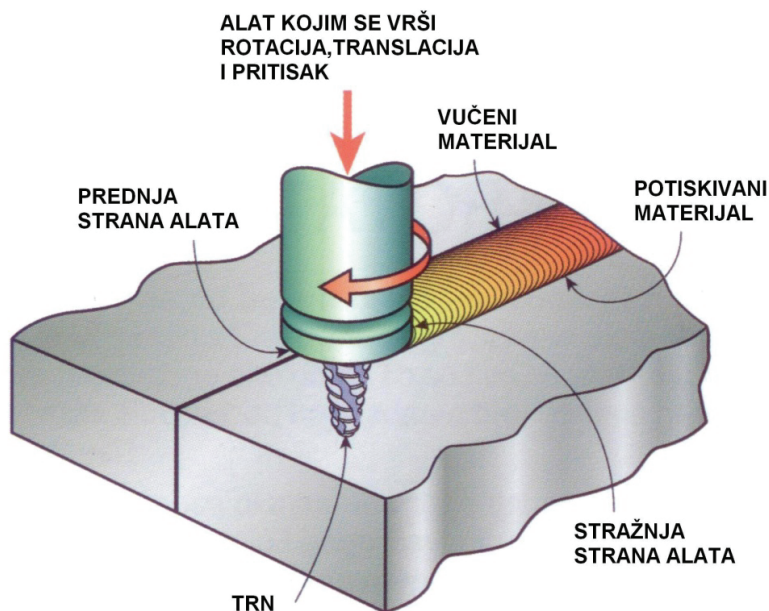
Abstract

A friction stir welding tool is a critical component for the success of the friction stir welding process. Since there is no melting of the workpiece, the common problems of fusion welding are avoided. This paper describes all possible tool varieties and explains the functions of individual tool parts. The tool consists of a cylindrical body and a cylindrical pin. Bottom surface of the tool body is usually called tool shoulder. This specific surface heats the workpiece and moves the softened material at the surface of the plates in the joint. Common part of the tool is pin placed at the top of the tool. Primary function of the tool pin is mixing of the softened material between the plates and side effect is the additional heat generated by the internal friction in the softened material. Although significant efforts have been made in the past to develop cost effective and reusable tools, most of the efforts have been empirical in nature and future work is needed for improvement in tool design to advance the practise of the friction stir welding process.

1. UVOD

Zavarivanje trenjem rotirajućim alatom (eng. Friction Stir Welding - FSW) je proces zavarivanja u omekšanom (plastičnom ili poluplastičnom) stanju osnovnog materijala što omogućava spajanje metala pomoću trenjem dovedene topline i mehaničkim miješanjem metala. Prva istraživanja ovog postupka izvedena su na The Welding Institute u Velikoj Britaniji 1991. godine. Prve primjene u proizvodnji bile su za zavarivanje aluminijskih legura grupe 6000 u pogonima SAPA u Švedskoj te u brodogradilištu Hydro Marine Aluminium u Norveškoj, a zatim u automobilskoj industriji u Švedskoj, Norveškoj i Australiji [1]. Sve veća primjena lakih aluminijskih legura u proizvodnji transportnih sredstava odredila je smjer istraživanja i primjenu zavarivanja trenjem rotirajućim alatom kao mogućeg postupka spajanja Al legura grupe 2000, 6000 i 7000.

Pri zavarivanju trenjem rotirajućim alatom koristi se namjenski izrađen alat. Pritiskom alata na osnovni materijal i rotacijom razvija se toplina nastala trenjem koja materijal čini mekšim i omogućuje miješanje u spoj (slika 1). Tijekom oblikovanja spoja u potpunosti se ne stvara talina. U ovom postupku izostavljeno je dovodenje dodatnog materijala i zaštitnih plinova. Limovi se stežu u posebno pripremljenim napravama za stezanje koje onemogućuju gibanje. S donje strane limova na mjestu zavarivanja obično se postavlja dodatna podloga koja zaustavlja izmicanje omekšanog materijala na mjestu spoja.



Slika 1. Skica postupka zavarivanja trenjem rotirajućim alatom [2]

Pri prvom kontaktu rotirajućeg trna alata i površine osnovnog materijala nastaje toplina koja uzrokuje omekšavanje materijala i plastično deformiranje u cilindričnom području oko trna. Sve većim ulaskom trna u materijal povećava se količina omekšanog područja sve do maksimalne dubine penetracije, odnosno do kontakta cilindričnog tijela alata s gornjom površinom materijala. Širina omekšanog područja najveća je na mjestu kontakta tijela alata i limova koji se zavaruju i sužava se sve do vrha trna alata. Uobičajeno je zadržavanje pomicanja alata, uz konstantnu rotaciju, nakon ulaska trna, kako bi se trenjem postigla dodatna toplina i omogućilo daljnje zavarivanje. Vrijeme zadržavanja ovisi o debljini i brzini provođenja topline materijala koji se zavaruje. U nastavku procesa alat se pravocrtno giba u smjeru zavarivanja. Oko rotirajućeg trna stvara se tanko plastificirano područje i prenosi materijal s jednog lima na drugi pojavom „ključanice“ u krutom stanju [1]. Završetak zavara izvodi se prekidanjem pravocrtnog gibanja, te se alat uz stalnu rotaciju izvlači iz materijala.

Utjecajni čimbenici u postupku zavarivanja trenjem rotirajućim alatom su: parametri zavarivanja, dimenzije i oblik alata, te oblik spoja [3]. Navedeni čimbenici utječu na unos

topline, raspodjelu topline i tok materijala čime se utječe na mikrostrukturu i mehanička svojstva zavara. Parametri zavarivanja su:

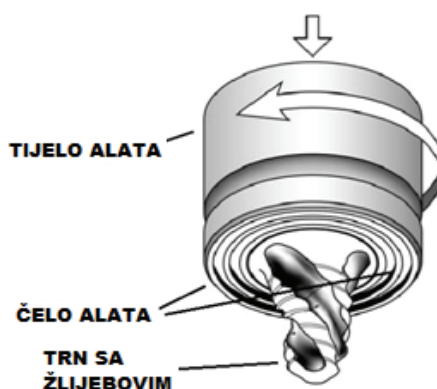
- brzina rotacije alata ω (min^{-1}),
- brzina zavarivanja v (mm/s),
- kut nagiba alata prema osnovnom materijalu α ,
- sila pritiska alata na materijal F_N (kN).

Iz odnosa brzine rotacije alata i brzine zavarivanja izračunavaju se parametri kao što su pomak po okretaju l_o (mm/okr.) i također okretaj po pomaku ω_o (okr./mm). Parametar ω_o daje informaciju o unosu topline po dužini zavara [4].

Alat za zavarivanje ima ključnu ulogu u oblikovanju nastalog zavarenog spoja. Do sada je ispitano i razvijeno za upotrebu više vrsta oblika alata za zavarivanje trenjem. Dimenzije i oblik alata određuju dovođenje topline, tok omekšanog materijal, dubinu penetracije, profil utjecaja topline u zavaru, mikrostrukturu i mehanička svojstva nastalog zavarenog spoja.

2. ALAT ZA ZAVARIVANJE

Alat se sastoji od gornjeg dijela – tijela i donjeg dijela – trna (slika 2). Površina alata koja uzrokuje nastanak trenja i razvijanje topline u dodiru sa površinom materijala naziva se čelo alata. Trn alata zadužen je za superplastičnu deformaciju materijala što omogućuje njegovo miješanje i povezivanje, te u manjoj mjeri za dovođenje topline. Alati bez trna s ravnom površinom čela također se ispituju i koriste za zavarivanje tanjih limova.



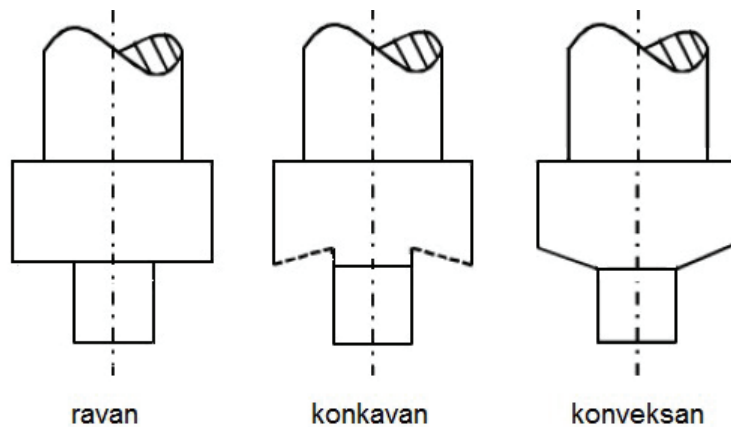
Slika 2. MX Triflute™ alat za zavarivanje trenjem rotirajućim alatom [5]

Oblik alata utječe na tok omekšanog materijala, te različiti oblici alata mogu za posljedicu imati različito gibanje omekšanog materijala između limova u spoju [6]. Tijelo alata može biti cilindričnog oblika ili izrađeno konusno. Oblik tijela nema značajan utjecaj na zavarivanje radi zanemarivog ulaza tijela alata u osnovni materijal pri zavarivanju od svega 1 do 5% debljine spoja [6].

Dimenzije alata utječu na količinu razvijene topline, aksijalnu i radijalnu silu alata na osnovni materijal, moment i termomehaničko opterećenje koje djeluje na alat. Važnije dimenzije kod izrade alata su promjer na mjestu čela te dužina i širina trna alata [6-8].

2.1. OBLIK ČELA ALATA ZA ZAVARIVANJE

Oblik čela alata utječe na dovođenje topline trenjem, utiskivanje materijala i oblikovanje lica zavara. Čelo alata može imati ravni, konkavan ili konveksan uzdužni presjek (slika 3). Alat sa ravnim uzdužnim presjekom čela nije učinkovit u zaustavljanju izlaza omekšanog materijala iz područja zavarivanja. Zavari izrađeni alatom s ravnim čelom imaju povinute rubove radi istiskivanja materijala. Prednost alata s ravnom površinom čela je jednostavnost izrade.

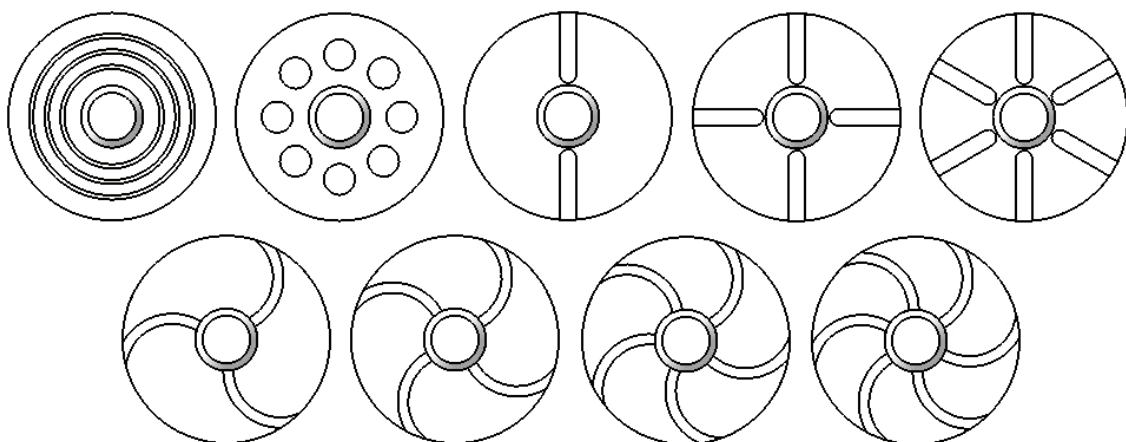


Slika 3. Oblici uzdužnog presjeka čela alata [6]

Konkavan presjek čela alata s kutom od 6° do 10° sprečava izlaz omekšanog materijala [5,6]. Pri utiskivanju alata na početku zavarivanja dio materijala ulazi u konkavnu šupljinu te kasnije služi kao zaliha ujedno stvarajući pritisak na preostali materijal u presjeku. Pomicanjem alata u smjeru zavarivanja materijal iz zalihe kontinuirano izlazi i ostaje u zavaru iza alata dok novi materijal, ispred alata, ponovno ulazi u konkavnu šupljinu i dalje služi kao zaliha sve do završetka zavara. Pri zavarivanju ovakvim alatom potrebno je postaviti vertikalnu os alata 1° do 3° suprotno od smjera zavarivanja kako bi se omogućio ulaz materijala ispred alata i povećala pritisna sila na stražnjoj strani alata.

Alati s konveksnim presjekom čela nisu značajno u upotrebi prije svega radi povećanog istiskivanja omekšanog materijala i gubitka materijala u povinutim rubovima. Jedina moguća prednost ovakvog alata je mogućnost zavarivanja dvaju limova različitih debljina postavljenih u sučeljeni spoj.

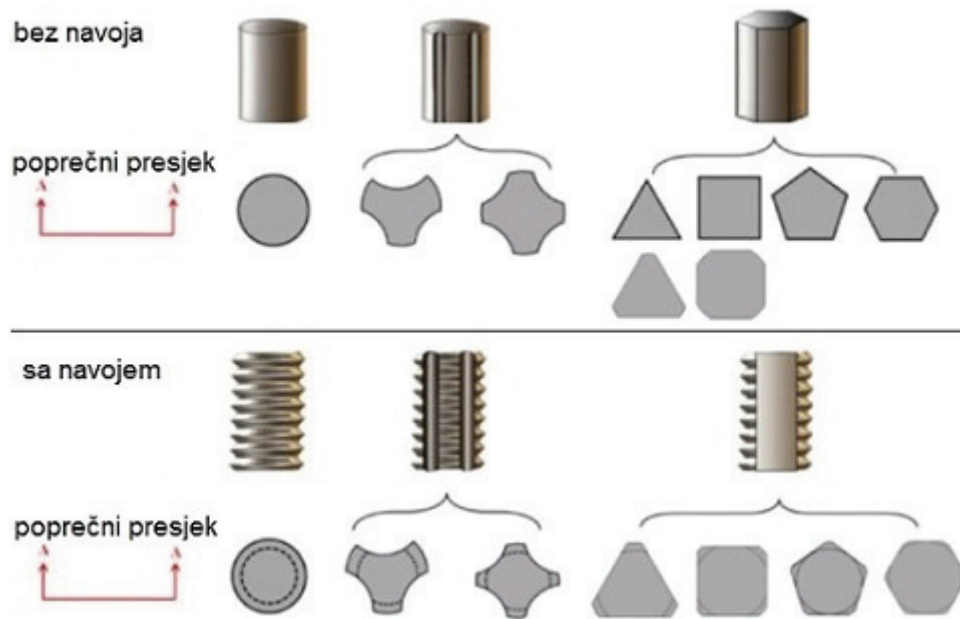
Površina čela alata može biti glatka ili s izrađenim različitim oblicima utora odnosno gravura. Svi oblici poprečnog presjeka čela alata mogu sadržavati utore. Pri zavarivanju omekšani materijal radi hidrostatskog tlaka ulazi u utore te povećava trenje i miješanje smicanjem materijalu ispod čela alata [6-8]. Alat s utorima na čelu daje općenito lošiji izgled lica zavara [9]. Neke od najčešćih oblika utora prikazuje slika 4. Najčešće se izrađuje žlijeb u obliku zavojnice koja počinje na rubu tijela alata, a završava u centru (ako nema trna) ili uz trn alata. Ovakav utor poboljšava površinski tok materijala smicanjem od ruba čela alata prema sredini zavara, smanjuje povinutost rubova zavara, a također eliminira potreban nagib alata izvan okomite osi na zavar [6].



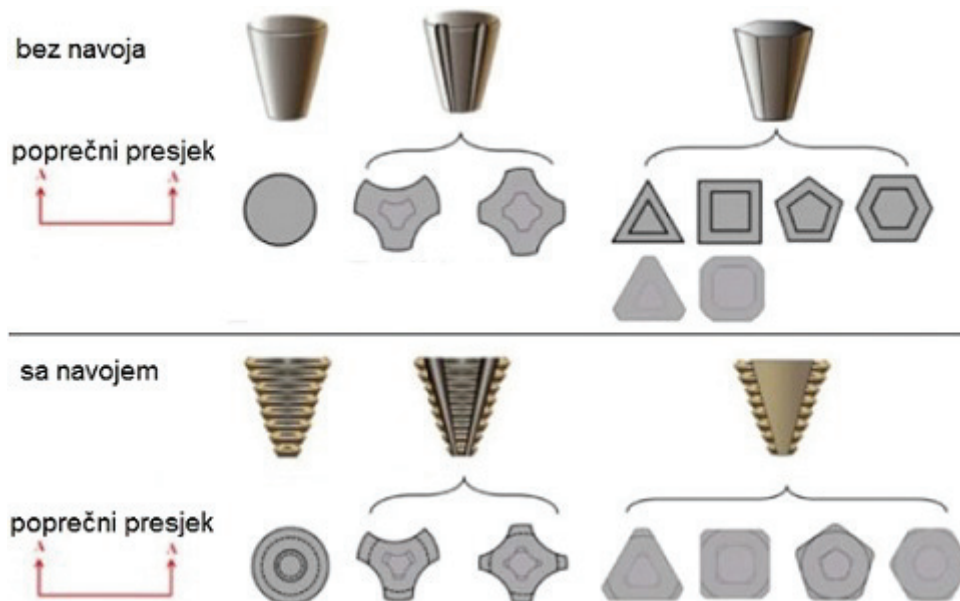
Slika 4. Najčešći oblici utora na čelu alata

2.2. OBLIK TRNA ALATA ZA ZAVARIVANJE

Alati za zavarivanje trenjem razlikuju se prema izgledu trna od jednostavnog cilindričnog trna ravnog dna do složenih konusnih trnova sa zavojnicama i izrađenim navojima na bočnim površinama. Trn omogućava smicanje materijala s prednje strane alata na stražnju miješajući materijal dvaju limova u dodiru i u manjoj mjeri služi za dovođenje topline trenjem. Trn alata može biti cilindričnog ili konusnog oblika, a također i s ravnim stranicama na boku [3,6-10]. Prema tome poprečni presjek trna može biti kružnica, trokut, kvadrat, peterokut, šesterokut, osmerokut itd. Slika 5 predstavlja neke od najčešćih oblika cilindričnih trnova sa i bez urezanog navoja na bočnoj površini. Slika 6 predstavlja neke od najčešćih oblika konusnih trnova sa i bez urezanog navoja na bočnoj površini. Jednostavni alati s cilindričnim trnom najčešće se koriste za zavarivanje limova do 12 mm debljine, a konusni za veće debljine limova [6].



Slika 5. Oblici cilindričnih trnova sa i bez urezanog navoja na bočnoj površini [6]

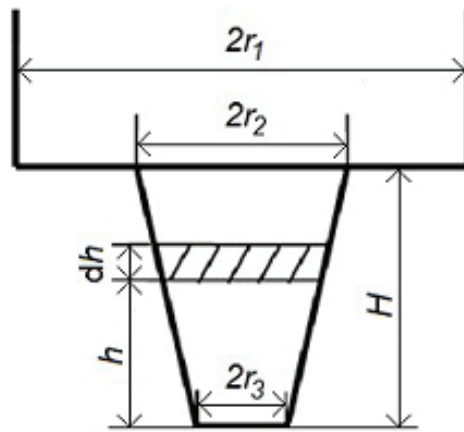


Slika 6. Oblici konusnih trnova sa i bez urezanog navoja na bočnoj površini [6]

Na trnu alata može biti izrađen navoj bilo koje vrste: metrički, cijevni, trapezni, obli, pilasti itd. Također na bočnim stranama trna alata može biti izrađeno više žljebova bilo da se radi o cilindričnom ili konusnom trnu sa ili bez urezanog navoja. Alati s navedenim oblicima izrađenim na bočnim stranicama trna češće se koriste za zavarivanje mekših materijala kao što su aluminijske legure ili legure bakra. Za zavarivanje materijala veće čvrstoće i tvrdoće obično se koriste alati s jednostavnim cilindričnim trnom koji omogućava duže trajanje alata [6-8]. Vrh trna alata može biti ravan, zaobljen ili konusan. Zaobljen ili konusan vrh trna smanjuje potrebnu silu pritiska pri uranjanju trna u materijal na početku zavaivanja, a time i povećava trajnost alata [6].

3. UTJECAJ DIMENZIJA ALATA NA DOVOĐENJE TOPLINE

Ukupan unos topline po jedinici dužine zavara E_1 najbolje opisuje uvjete zavarivanja. Toplina nastala pri zavarivanju trenjem rotirajućim alatom određena je dimenzijama alata, kinetičkim faktorom trenja μ_k , brzinom rotacije alata ω (min^{-1}), brzinom zavarivanja v (mm/min) i silom pritiska F_N [3,11,12]. Kinetički faktor trenja μ_k određen je kombinacijom materijala u dodiru, odnosno vrstom osnovnog materijala i materijalom alata. Na slici 7. prikazana je skica alata sa svim važnim dimenzijama koje određuju koliko će se topline razviti trenjem pri zavarivanju.



Slika 7. Skica vrha alata [12]

Ukupan unos topline prema Khandakaru et. al. [13] može se izračunati kao zbroj momenata koji djeluju preko površina dodira alata i osnovnog materijala:

$$T_{\text{ukupno}} = T_{\text{ramena}} + T_{\text{vrh trna}} + T_{\text{površina trna}} \quad (1)$$

Ako se uvodi smično naprezanje τ (N/mm^2) za navedeni osnovni materijal [12]:

$$T_{\text{ukupno}} = \int_{r_2}^{r_1} (\tau \cdot r) \cdot (2\pi \cdot r) dr + \int_0^{r_3} (\tau \cdot r) \cdot (2\pi \cdot r) dr + 2\pi \cdot \tau \cdot r_i^2 \cdot H \quad (2)$$

Ako trn nije koničan onda vrijedi $r_3 = r_2 = r_1$, što se također često može uvesti u proračun radi jednostavnijeg računanja. Uz pretpostavku da je sila pritiska F_N ravnomjerna raspoređena na svim površinama koje su u kontaktu sa materijalom ukupni moment je [12]:

$$T_{\text{ukupno}} = \tau \left(\frac{2}{3} \pi \cdot r_1^3 + 2\pi \cdot r_i^2 H \right) = 2\mu_k \cdot F_N \left(\frac{r_1}{3} + \frac{r_i^2}{r_1^2} H \right). \quad (3)$$

Snaga P_{sr} (W) kojom se ostvaruje trenje izračunava se prema [12]:

$$P_{\text{sr}} = T_{\text{ukupno}} \cdot \omega. \quad (4)$$

Ukupan unos topline po jedinici dužine zavara E_1 (J/mm) izračunava se kao [6]:

$$E_1 = \frac{P_{\text{sr}}}{v} = T_{\text{ukupno}} \frac{\omega}{v}. \quad (5)$$

Efektivna vrijednost unosa topline po jedinici dužine zavora $(E_1)_{ef}$ ovisi o dužini trna H i debljini limova koji se zavaruju t prema [12]:

$$(E_1)_{ef} = \frac{H}{t} E_1. \quad (6)$$

Veći dio topline proizvodi trenje između čela alata i materijala. Toplina Q_1 (J) koja nastaje trenjem čela alata je [11]:

$$Q_1 = \int_{r_2}^{r_1} \int_0^{2\pi} \frac{\mu_k F_N}{\pi r_1^2} \cdot \frac{2\pi\omega}{60} r \cdot r dr d\theta = \frac{\mu_k F_N \pi \omega (r_1^3 - r_2^3)}{45 r_1^2} \quad (7)$$

Toplinskim tokom kroz površinu čela alata pojavljuju se gubici topline. Toplinski tok kroz površinu čela alata q_1 (W/m²) određen je [11]:

$$q_1 = \frac{Q_1}{\pi(r_1^2 - r_2^2)} = \frac{\mu_k F_N \omega (r_1^2 + r_2^2 + r_1 r_2)}{45 r_1^2 (r_1 + r_2)} \quad (8).$$

Toplina koja nastaje trenjem donje površine trna alata u materijalu određena je [7]:

$$Q_2 = \int_0^{r_3} \frac{\mu_k F_N}{\pi r_1^2} \cdot \frac{2\pi\omega}{60} r \cdot 2\pi r dr = \frac{\mu_k F_N \pi \omega r_3^3}{45 r_1^2} \quad (9)$$

Osim trenja uzrokovanog pritisnom silom F_N dio topline razvija se i trenjem uzrokovanim miješanjem omekšanog materijala uz rub trna [11]:

$$\begin{aligned} Q_3 &= \int_0^H \frac{2\pi\omega}{60} (r_3 + h \tan \alpha) \cdot 2\pi (r_3 + h \tan \alpha) \tau dh = \\ &= \frac{\pi^2 \sigma_s H \omega}{45 \sqrt{3}} (3r_3^2 + 3r_3 H \tan \alpha + H^2 \tan^2 \alpha) \end{aligned} \quad (10)$$

gdje je τ_b najveće smično naprezanje metala. Toplina nastala trenjem svih površina u dodiru [11]:

$$Q_{vd} = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{V_t}, \quad (12)$$

gdje se obujam vrh alata V_t računa prema

$$V_t = \frac{\pi H (r_2^2 + r_2 r_3 + r_3^2)}{3}. \quad (13)$$

U oba prethodna izračuna vidljivo je da dimenzioniranje alata ima značajan utjecaj na unos topline u postupku zavarivanja trenjem rotirajućim alatom. Veličina dodirne površine najviše ovisi o promjeru čela alata. Toplina razvijena trenjem najviše ovisi o promjeru čela alata i upravo alat s većim promjerom čela uzrokuje veće zagrijavanje u proces [13].

4. UTJECAJ OBLIKA ALATA NA DOVOĐENJE TOPLINE

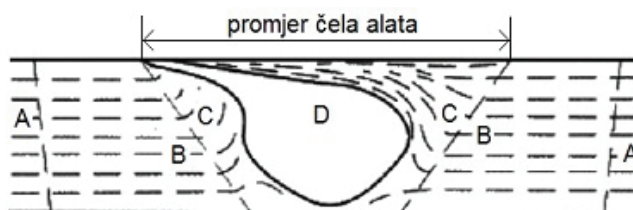
Oblik alata posredno utječe na dovođenje topline preko količine i gustoće osnovnog materijala koji sudjeluje u miješanju pri stvaranju spoja. Većim miješanjem omekšanog plastično deformiranog osnovnog materijala u području oko trna i ispod čela alata nastaje više topline zbog samog trenja unutar materijala pri miješanju. Pri zavarivanju omekšani materijal ulazi u utore na čelu alata radi hidrostatskog tlaka, te povećava trenje i miješanje smicanjem materijalu [6-8]. Pri većoj brzini rotacije alata i većoj brzini zavarivanja unos topline također ovisi o veličini dodirne površine između alata i osnovnog materijala. Ako je dodirna površina zbog različitih utora na čelu alata veća i unos topline će biti veći [9]. Veća dodirna površina, pri zavarivanju aluminija, može povećati zagrijavanje radi sporijeg hlađenja alata izrađenog od čelika u odnosu na hlađenje osnovnog materijala.

Trn alata zadužen je za superplastičnu deformaciju materijala što omogućuje njegovo miješanje i povezivanje. Oblik trna alata utječe na količinu materijala koji se miješa. Trn alata sa urezanim

navojem, urezanim utorima ili višekutnim poprečnim presjekom stvara bolje miješanje materijala i uzrokuje dodatno razvijanje topline trenjem u omekšanom materijalu.

5. UTJECAJ DIMENZIJA ALATA NA MIJEŠANJE MATERIJALA

Stupanj miješanja materijala, difuzija, debljina deformiranih lamela aluminijske i oblik toka materijala ovise o dimenzijama alata i temperaturi koja se razvija, koja pak ovisi o pritisknoj sili pri zavarivanju [3]. Promjer čela alata važan je radi kontakta s omekšanim materijalom. Promjerom čela alata utječe se na širinu lica zavara (slika 8). Veći promjer čela omogućuje bolje prijanjanje alata i uz naljepljivanje pomicanje većeg volumena omekšanog materijala u rotaciju oko alata, odnosno širu zonu zavarivanja. Arora et. al. u svojem istraživanju predložili su da optimalni promjer čela alata treba odgovarati maksimalnom momentu pri kojem se dobiva naljepljivanje materijala na čelo za zadani skup parametara zavarivanja i osnovni materijal [14]. Ovaj princip optimizacije predviđen je za zavarivanje aluminijskih legura, ali ga je još potrebno ispitati na čvršćim materijalima kao što su čelici ili legure titana.



Slika 8. Skica poprečnog presjeka tipičnog zavara dobivenog zavarivanjem [15] trenjem rotirajućim alatom:

- A) osnovni materijal
- B) zona utjecaja topline
- C) termo-mehanički obrađena zona
- D) metal zavara

Veći promjer trna alata omogućuje veći moment pri miješanju omekšanog materijala. Pri optimizaciji promjera trna alata treba uzeti u obzir i širinu zavara koja je direktno ovisna o promjeru trna alata (prema slici 7). Thomas et. al. [16] predlažu da se pri konstruiranju alata kao utjecajni faktor u razmatranje uzme omjer između volumena miješanog materijala pri rotaciji i volumena trna alata. Navedeni omjer predstavlja odnos dinamičkog volumena prema statičkom volumenu i važan je kako bi se ostvario povoljan tok materijala. Tipični omjer za konvencionalne cilindrične trnove iznosi 1.1:1, za WhorlTM omjer iznosi 1.8:1, a za MX TrifluteTM 2.6:1 [16]. Što je omjer veći u metalu zavara će biti manje pora, a spojevi oksida će biti usitnjeni i dipergirani radi povećanog miješanja materijala [6].

6. UTJECAJ OBLIKA ALATA NA MIJEŠANJE MATERIJALA

Miješanje materijala postiže se prenošenjem materijala naljepljivanjem na površinu alata ili potiskivanjem omekšanog materijala u gibanje. Utori na površini čela alata i profil trna alata određuju dinamiku miješanja, izgled poprečnog presjeka zavara, mikrostrukturu i mehanička svojstva. Razvoj alata za zavarivanje trenjem većinom je usmjeren na istraživanje utjecaja oblika alata na miješanje materijala. TWI iz Velike Britanije kao vodeći centar istraživanja ovog postupka zavarivanja razvio je i patentirao više različitih alata kao što su Twin-stirTM, Skew-stirTM, WhorlTM, Re-stirTM, Pro-stirTM, MX TrifluteTM itd. Svi navedeni alati razlikuju se upravo prema obliku kojim se utječe na miješanje materijala.

6.1. UTJECAJ OBLIKA ČELA ALATA NA MIJEŠANJE MATERIJALA

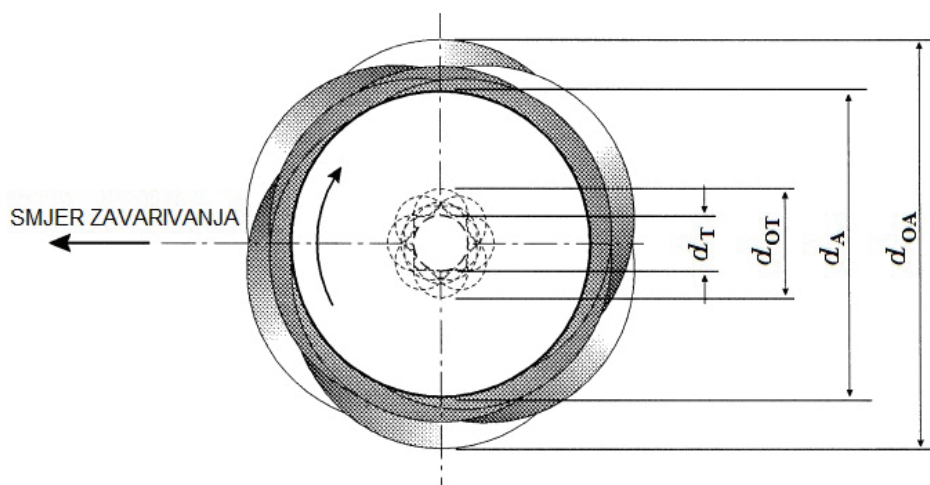
Oblik čela alata nema utjecaj na vertikalno miješanje materijala, već samo na horizontalno, paralelno s čelom alata. Oblik čela određuje dinamiku miješanja materijala u gornjem sloju osnovnog materijala, ispod čela alata. Gustoća osnovnog materijala, njegova žilavost i prijonjivost na površnu čela alata određuju debljinu sloja osnovnog materijala koji se miješa rotacijom alata. Istražujući debljinu sloja koji se pomiče miješanjem pomoću čela alata Zhen et. al. su u svojem radu utvrdili da debljina sloja ovisi o vrsti aluminijske legure koja se zavaruje. Za AlMg4.5Mn legure koje se očvršćuju hladnim deformiranjem debljina sloja je 50 μm a za ljevačku leguru AlSi7Mg je 200 μm [17].

U većini dosadašnjih istraživanja utjecaja alata pri zavarivanju trenjem korišteni su alati s ravnim ili konkavnim presjekom čela alata [6-8]. Alati s konveksnim presjekom čela alata većinom se koriste za zavarivanje bakra [18-21], a rijede za zavarivanje aluminijske legure [6-8]. Dodatci na površini čela kao što su utori ili gravure različitih oblika povećavaju miješanje osnovnog materijala. Utorima se postiže bolji tok omekšanog materijala s prednje strane na stražnju stranu iza alata [6,21]. Žlijeb izrađen u obliku zavojnice na alatu s konkavnim presjekom povećava stabilnost procesa pri većim brzinama zavarivanja. Ova vrsta žlijeba izrađena na alatima s konveksnim presjekom također povećava stabilnost procesa održavajući konstantnu dubinu zavarivanja pri manjim promjenama u visini limova koji se zavaruju pri konstantnoj sili pritiska alata na materijal [7]. Kroz utor u obliku zavojnice omogućen je tok omekšanog materijala od ruba čela alata prema trnu čime se zadržava omekšani materijal u području metala zavara i smanjuje se povinutost rubova zavara. Ovakvim čelom alata povećava se i održava hidrostatski tlak u omekšanom materijalu što također poboljšava miješanje materijala i integritet zavara [6].

6.2. UTJECAJ OBLIKA TRNA ALATA NA MIJEŠANJE MATERIJALA

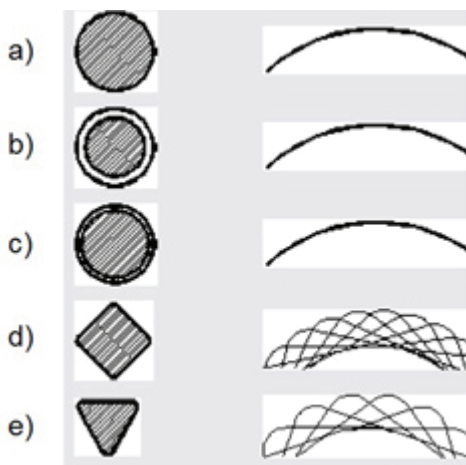
Trn alata zadužen je za superplastičnu deformaciju materijala i povezivanje materijala limova u spoj. Oblik trna alata ima ključnu ulogu u miješanju omekšanog materijala i u kombinaciji s parametrima zavarivanja određuje svojstva zavarenog spoja [3,6,7,8,10,16]. Rotacija alata u ovom postupku nije savršeno koncentrično gibanje, upravo zbog neidealnog uležištenja i neidealne balansiranosti masa glavnog vretena pogona. Upravo ekscentrično gibanje alata omogućuje gibanje hidromehanički nestlačivog omekšanog materijala s prednje strane alata na stražnju i miješanje u metal zavara [22]. Na slici 9, koja predstavlja skicu dinamičke krivulje rotacije alata definirane su kote:

- d_T – promjer trna alata,
- d_{OT} – promjer dinamičke krivulje gibanja trna alata,
- d_A – promjer čela alata,
- d_{OA} – promjer dinamičke krivulje gibanja čela alata.



Slika 9. Skica dinamičke putanje materijal pri rotaciji alata [22]

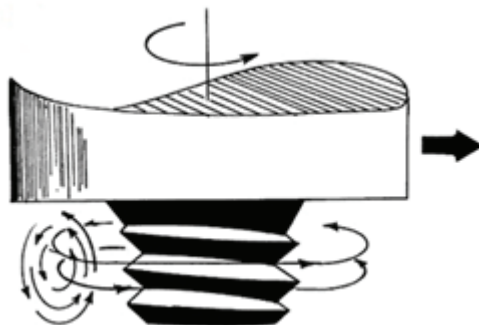
Ako poprečni presjek trna alata nije cilindričan rotacijom alata stvara se dinamička putanja omekšanog metala oko osi alata u ravnini paralelnoj s čelom alata (slika 10) [10]. Kvadratni i trokutasti poprečni presjeci trna alata svojim oblikom dodatno unose impulsno miješanje materijala. Kvadratni poprečni presjek trna stvara 80 Hz, a trokutasti 60 Hz impulse pri rotaciji alata od 1200 min^{-1} [3]. Veći broj impulsa pri miješanju materijala stvara manje zrno u mikrostrukturi zavara i povećava čvrstoću i tvrdoću [3,10]. Također povećava se i brzina gibanja omekšanog materijala u odnosu na zavarivanje s cilindričnim trnom [10].



Slika 10. Dinamičke krivulje gibanja točke oboda za različite poprečne presjeka trnova alata [10]

Miješanje materijala pomoću trna alata može se odvijati naljepljivanjem i prenošenjem osnovnog materijala rotacijom oko trna ili potiskivanjem oko trna pomoću dodataka izrađenih na površini trna alata. Miješanje materijala proporcionalno je hidrostatskom tlaku u omekšanom materijalu [6]. Konusnim trnom alata povećava se hidrostatski tlak i dodirna površina. Većom dodirnom površinom između trna alata i osnovnog materijala povećava se naljepljivanje, a time i količina materijala koja se miješa naljepljivanjem. Materijal može nekoliko puta kružiti oko alata u vertikalnom i/ili horizontalnom smjeru te se na kraju deponira u metal zavara iza alata. Što materijal više kruži to će rezultirajući zavar imati finiju mikrostrukturu bez pora i razlomljene spojeve oksida [6]. Trnovi s izrađenim dodatcima na površini koriste se isključivo za zavarivanje mekših materijala kao što su aluminijske legure i legure bakra [6,7].

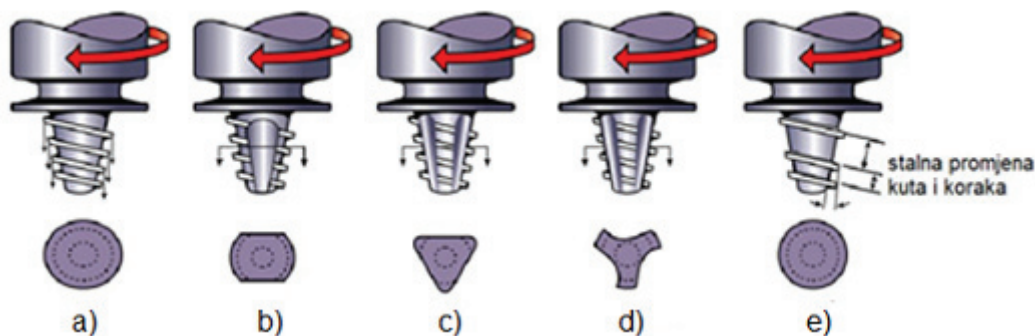
Tehnologijom urezivanja navoja mogu se obraditi bočne površine trna bilo da se radi o cilindričnom ili o konusnom trnu. Urezan navoj stvara i vertikalno i horizontalno miješanje nestlačivog omekšanog materijala u spoj (slika 11). Smjer miješanja materijala ovisi o smjeru izrade navoja (lijevi ili desni) i također o smjeru rotacije alata. Količina materijala koji se miješa ovisi o brzini rotacije alata, brzini zavarivanja i koraku urezanog navoja. Ovo miješanje povezano s miješanjem uzrokovanim rotacijom čela alata rezultira ukupnim miješanjem osnovnog materijala.



Slika 11. Skica rotacije alata i toka materijala oko trna alata sa narezanim navojem [19].

Na bočnim stranama trna može biti izrađeno više žlijebova, spiralnih ili ravnih koji stvaraju i horizontalno i vertikalno miješanje istodobno. Time se također povećava tok materijala oko alata i stvara dodatno unutarnje miješanje u omekšanom materijalu. Žlijebovi mogu biti izrađeni na svim vrstama trnova alata bilo da se radi o trnu s navojem ili trnu s višekutnim poprečnim presjekom.

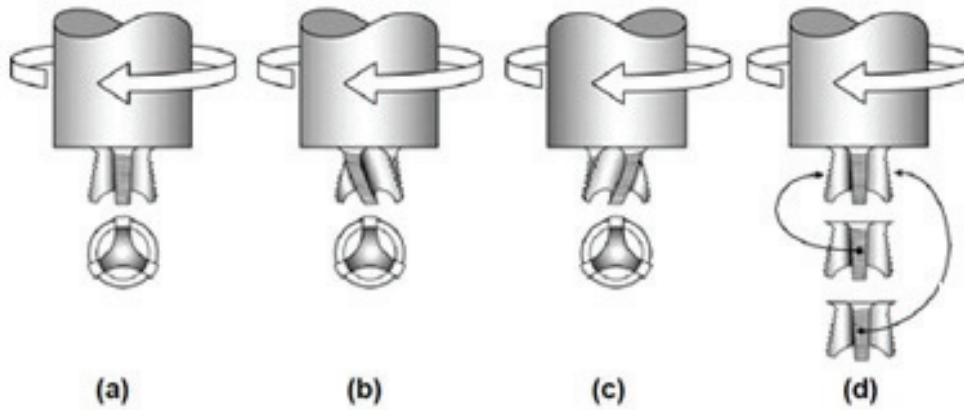
TWI je za potrebe zavarivanja aluminijskih legura većih debljina razvio nekoliko različitih alata koji objedinjuju konusni oblik, urezan navoj ili izrađenu zavojnicu, žlijebove ili lopatice koje povećavaju miješanje osnovnog materijala. Alati Whorl™ (slika 12) i MX Triflute™ (slika 2) omogućavaju zavarivanje aluminijskih legura do 50 mm debljine u sučeljenom spoju u jednom prolazu [6]. Pri zavarivanju ovakvim alatom parametar okretaj po pomaku ω_0 potrebno je držati višim nego što je to pri zavarivanju jednostavnim cilindričnim trnom bez navoja kako nebi došlo do naglog trošenja ovog alata.



Slika 12: Izvedbe Whorl™ alata [24]:

- a) konusni oblik,
- b) oblik lopatice,
- c) trokutasti oblik,
- d) propulzni oblik,
- e) konusni oblik sa promjenjivim kutom i korakom zavojnice.

Kod preklopnih spojeva poželjno je postići veću širinu zavara kako bi se dobilo bolje protaljšivanje i bolje povezivanje limova [6]. TWI je za potrebe zavarivanja aluminijskih legura u preklopnom spoju razvio alate A-skew™ i Flared-Triflute™ koji postižu do 150% veću širinu zavara. Ramena alata A-skew™ uvijek su u potpunom dodiru s površinom osnovnog materijala, premda se trn alata ne giba okomito na ravninu zavarivanja. Ovaj alat omogućava bolje miješanje metala, te smanjuje nastanak šupljina u zavaru [6,24]. Rezultirajuća mikrostruktura pokazuje širu zonu miješanja metala od same širine čela alata. Flared-Triflute™ alat posebno je razvijen za zavarivanje preklopnih spojeva (slika 13). Veći žljebovi omogućuju miješanje veće količine metala i dobivanje šire zone spajanja. Smjer zakrivljenosti žljebova i smjer navoja ovise o smjeru rotacije alata i smjeru zavarivanja.



Slika 13. Flared-Triflute™ alat sa različitim smjerom zakrivljenosti žljebova [24] :

- a) neutral,
- b) lijevi,
- c) desni,
- d) neutral s različitim smjerom navoja na suprotnim bridovima.

7. ZAKLJUČAK

Zavarivanje trenjem rotirajućim alatom već se primjenjuje u industrijskoj proizvodnji za određene vrste proizvoda ali se i intenzivno istražuje kako bi se primjena mogla znatno proširiti [3,7,8,16,22,24,25]. Većina istraživanja usmjerena je na oblikovanje i dimenzioniranje alata. Primjeri novijih istraživanja utjecaja oblika alata su proračuni dinamičkog gibanja materijala pri zavarivanju za različite oblike alata i utjecaj dimenzija alata na mogućnosti miješanja materijala i dovođenje topline. Premda izgled alata direktno utječe na svojstva zavarenog spoja i ostale parametre u procesu razvoj alata do sada je bio empirijske prirode, temeljen na pokušajima i pogreškama, te još uvijek ne postoji klasifikacija alata prema osnovnom materijalu i obliku spoja. Ne postoje standardni alati koji se mogu nabaviti na tržištu za potrebu zavarivanja određenih proizvoda. Ne postoje proizvođači koji serijski izrađuju alate za potrebe proizvođača zavarenih konstrukcija. Ovim radom nastojao se pružiti sažet pregled utjecaja dimenzija i oblika alata na sam postupak zavarivanja.

Unos topline i dinamički tok omekšanog materijala pri zavarivanju trenjem rotirajućim alatom direktno su ovisni o obliku i dimenzijama alata kao utjecajnom čimbeniku u ovog procesu. Unos topline i širina lica zavara proporcionalni su s promjerom čela alata odnosno s veličinom dodirne površine čela alata i osnovnog materijala [6,7,8,25]. Oblikom čela i trna alata utječe se na miješanje materijala, a većim miješanjem razvija se i dodatna toplina nastala trenjem u samom materijalu pri miješanju. Dodaci kao što su utori ili gravure izrađeni na čelu alata povećavaju tok materijala s prednje strane na stražnju stranu alata. Izradom spiralnog utora na čelu alata može se i povećati tok materijala od ruba prema sredini zavara.

Trn alata zadužen je za superplastičnu deformaciju materijala što omogućuje njegovo miješanje i povezivanje. Dodaci izrađeni na površini cilindričnog ili konusnog trna kao što su urezan navoj, žljebovi ili zavojnica pospješuju miješanje materijal. Trnovi s izrađenim dodatcima na površini koriste se isključivo za zavarivanje mekših materijala kao što su aluminijske legure i legure bakra. Poprečni presjek trna alata koji je višekutan unosi dodatne impulsne pritiske pri rotaciji alata što usitnjava mikrostrukturu i smanjuje pore u zavaru. Oblik uzdužnog presjeka tijela alata ovisi o vrsti osnovnog materijala i mogućnosti postavljanja nagiba osi rotacije alata prema smjeru zavarivanja.

Većina do danas proizvedenih alata nastala je uslijed ispitivanja u laboratorijima sveučilišta, instituta ili drugih istraživačkih organizacija za potrebe eksperimentalnog rada [4,6,7,8,25]. Nužan je temeljit rad na sistematizaciji oblika i dimenzioniranju alata kako bi se stvorila osnova za širu industrijsku primjenu zavarivanja trenjem rotirajućim alatom.

LITERATURA

- [1] M. Andersson: Friction Stir Welding (FSW) – Progress in R&D and new applications, ZAVARIVANJE , Vol. 48 (3-4), str. 103-108, 2005.
- [2] W. M. Thomas, C. J. Goodfellow, D. G. Staines, E. R. Watts: Preliminary trials using dual-rotation friction stir welding, ZAVARIVANJE, Vol 48 (6), str. 237-243, 2006.
- [3] S. Vijayan, R. Raju: Process Parameter Optimization and Characterization of Friction Stir Welding of Aluminum Alloys, International Journal of Applied Engineering Research, Vol. 3 (10), str. 1303-1316, 2008.
- [4] D. Klobčar, L. Kosec, S. Smolej, J. Tušek: Weldability of aluminium alloy AlSi12 using FSW, Proceedings of EUROJOIN 8 conference, Pula, Hrvatska, str. 99 - 106 2012.
- [5] C. B. Fuller: Friction Stir Tooling: Tool Materials and Designs, Friction stir welding and processing ured. R. S. Mishra, M. W. Mahoney, ASM International, str. 7-35, 2007.
- [6] Y. N. Zhang, X. Cao, S. Larose, P. Wanjara: Review of tools for friction stir welding and processing, Canadian Metallurgical Quarterly, Vol. 51 (3), str. 250-261, 2012
- [7] R. Rai, A. De, H. K. D. H. Bhadeshia, T. DebRoy: Review: friction stir welding tools, Science and technology of welding and joining, Vol. 16(4), str. 325-342, 2011.
- [8] R. S. Mishra, Z. Y. Ma: Friction stir welding and processing, Materials Science and engineering R, Vol. 50, str. 1-78, 2005.
- [9] A. Scialpi, L. A. C. De Filippis, P. Cavaliere: Influence of shoulder geometry on Microstructure and mechanical properties of friction stir welded 6082 aluminium alloy, Materials and Design , Vol. 28., str 1124-1129, 2007.
- [10] K. Elangovana, V. Balasubramanian: Influences of tool pin profile and welding speed on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy, JOURNAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY, No. 200, str. 163-175, 2008.
- [11] C. S. Wu, W. B. Zhang, L. Shi, M. A. Chen: Visualization and simulation of plastic material flow in friction stir welding of 2024 aluminium alloy plates, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, No. 22, str. 1445 – 1451, 2012.
- [12] C. Hamilton, S. Dymek, A. Sommers: A thermal model of friction stir welding in aluminium alloys, International journal of machine tools & manufacture, Vol. 48, str. 1120 -1130, 2008.
- [13] M. Z. H. Khandkar, J. A. Khan, A. P. Reynolds: Prediction of temperature distribution and thermal history during friction stir welding: input torque based model, Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 8 (3), str. 165-174, 2003.
- [14] A. Arora, A. De, T. Debroy: Toward optimum friction stir welding tool shoulder diameter, Scripta Materialia, Vol. 64, str. 9-12, 2011.
- [15] R. Nandan, T. DebROY, H. K. D. H. Bhadeshia: Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties, Progress in Materials Science, Vol. 53, str. 980-1023, 2008.

- [16] W.M. Thomas, E. D. Nicholas, S. D. Smith: Friction Stir Welding – Tool Developments, Aluminium 2001, Proceedings of the TMS 2001, Aluminium Automotive Joining Session, TMS, str. 213-224, 2001
- [17] Z. W. Chen, R. Peris, R. Maginness, Material flow in the upper welded zone during friction stir welding, International journal of modern physics B, Vol. 20(25,26,27), str. 4081-4086, 2006
- [18] R. M. Leal, N. Sakharova, P. Vilaça, D. M. Rodrigues, A. Loureiro, Effect of shoulder cavity and welding parameters on friction stir welding of thin copper sheets, Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 16 (2), str. 146-152
- [19] L. Cederqvist, C. D. Sorensen, A. P. Reynolds, T. Öberg, Improved process stability during friction stir welding of 5 cm thick copper canisters through shoulder geometry and parameter studies, Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 14 (2), str. 178-184
- [20] I. Galvão, R. M. Lear, D. M. Rodrigues, A. Loureiro, Influence of tool shoulder geometry on properties of friction stir welds in thin copper sheets, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 213, str. 129-135, 2013.
- [21] M. Aissani, S. Gachi, F. Boubenider, Y. Benkedda, Design and optimization of friction stir welding tool, Materials and Manufacturing Processes, Vol. 25, str. 1199-1205, 2010.
- [22] W. M. Thomas, E. D. Nicholas: Friction stir welding for the transportation industries, MATERIALS & DESIGN, Vol. 18 (4/6), str. 269-273, 1997.
- [23] R. A. Prado, L. E. Murr, K. F. Soto, J. C. McClure, Self-optimization in tool wear for friction-stir welding of Al 6061 + 20% Al₂O₃ MMC, Materials Science and Engineering, No. A 349, str. 156-165, 2003.
- [24] C. E. D. Rowe, W. M. Thomas: Advances in tooling materials for friction stir welding, TWI and Cedar Metals Ltd., Velika Britanija, str. 1-11, 2005.
- [25] S. Kralj, D. Klobčar, Z. Kožuh, M. Bušić: Friction stir welding of advanced pore morphology sandwich panels, ZAVARIVANJE , Vol. 56 (5-6), str. 163-172, 2013.