

Uticaj ravnih žljebova alata na kvalitet zavara kod Friction Stir Welding procesa

Aleksandra Koprivica, Obrad Spaić, Mirjana Jokanović, Gojko Krunic

Fakultet za proizvodnju i menadžment Trebinje

Univerzitet u Istočnom Sarajevu

Trebinje

aleksandra.koprivica@ymail.com, obradspaic59@gmail.com, mirjana.jokanovic@gmail.com, gojkokrunic@gmail.com;

Sažetak — Iako postoji velika zainteresovanost za svakodnevnu upotrebu i razvoj FSW procesa, mnogi aspekti ove tehnologije nisu dovoljno istraženi, niti eksperimentalno dokazani. Na osnovu dobijenih eksperimentalnih rezultata, u radu su dati prijedlozi geometrije trna alata, čija primjena treba da omogući značajno unapređenje FSW procesa i predstavlja osnovu za standardizaciju alata, pri čemu kroz buduća kompleksna istraživanja treba izvršiti njihovu verifikaciju.

Ključne riječi - FSW tehnologija; mikrostruktura zavara; trn alata;

I. UVOD

Postoji značajan broj postupaka zavarivanja trenjem koji, u manjoj ili većoj mjeri, imaju komercijalnu primjenu. Za limove se uglavnom koristi frikciono zavarivanje rotacionim diskom i to za preklopne spojeve, vrlo tankih dijelova, od materijala slabijih mehaničkih svojstava. Tek pronalazak FSW (Friction Stir Welding) postupka omogućio je zavarivanje trenjem limova većih debljina, od različitih materijala i to u svim mogućim međusobnim položajima. FSW postupkom su najprije ostvareni pravolinijski spojevi, a zatim i krivolinijski, uključujući i kružne. Primjena ove tehnologije zavarivanja je vrlo široka i dinamična. Ona se danas koristi u brodogradnji, avio industriji, proizvodnji željezničkih vozila, automobilske industriji itd., odnosno svuda gdje se vrši zavarivanje pločastih ili profilisanih elemenata velikih dužina, tako da je iz upotrebe istisnula tradicionalne postupke zavarivanja.

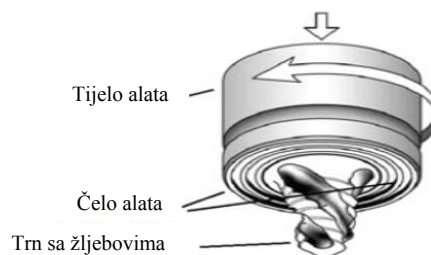
Generisanja toplote kod FSW je postupak kao i kod običnog zavarivanja trenjem. Međutim, kod zavarivanja pločastih elemenata, potrebna toplota se ne oslobađa trenjem direktno između kontaktnih površina zavarivanih dijelova, već posredno, pomoću specijalnog alata [1].

FSW se smatra jednom od najuspješnijih tehnologija spajanja materijala koje se koriste posljednjih decenija. To je ekološka tehnologija visoke energetske efikasnosti i nije štetna po životnu okolinu. U poređenju sa konvencionalnim metodama zavarivanja topljenjem, FSW troši značajno manje energije i ne koristi se atmosfera zaštitnog gasa. Spajanje se ostvaruje bez korišćenja dodatnog materijala i zbog toga se može ostvariti veza širokog dijapazona raznih legura, bez

bojazni da će se pojaviti problem nehomogenosti, koji se često javlja kod konvencionalnog zavarivanja. Kada je potrebno moguće je izvršiti i spajanje različitih metala i legura. U poređenju sa konvencionalnim frikcionim zavarivanjem, koje se obično izvodi na malim simetričnim dijelovima koji se mogu obrtati i biti pritiskivani međusobno kako bi se formirao spoj, FSW zavarivanje se može primjeniti na različite tipove spojeva kao što su sučeonni, preklapni i ugaoni [1].

II. GEOMETRIJA ALATA

Geometrija alata je najuticajniji faktor FSW procesa. Generalno, alat se sastoji od dva dijela: tijela alata i radnog dijela alata (čela i trna alata). Na Sl. 1. prikazan je kompleksni alat razvijen u TWI (The Welding Institute) institutu pod nazivom MX-Triflute kojim se mogu zavarivati Al legure debljine 50 do 60 mm. On ima tri kosa ugaona žljeba, odnosno spirale, objedinjena sa tri spiralna grebena. Ovako konstruisani trn omogućava da se smanji masa alata, obezbijedi bolje miješanje materijala i da se bolje razbije oksidna površina sa ploča koje se zavaruju. Površina alata koja uzrokuje nastanak trenja i razvijanje toplote u dodiru sa površinom materijala naziva se čelo alata. Trn alata zadužen je za plastičnu deformaciju materijala što omogućuje njegovo miješanje i povezivanje [1].



Slika 1. MX-Triflute alat za zavarivanje trenjem rotirajućim alatom [1]

Oblik alata utiče na tok omekšanog materijala, te različiti oblici alata mogu za posljedicu imati različito miješanje omekšanog materijala između limova u spoju. Tijelo alata može biti cilindričnog ili konusnog oblika. Oblik tijela nema značajan uticaj na zavarivanje zbog zanemarivo malog ulaza

tijela alata u osnovni materijal pri zavarivanju, koje iznosi svega od 1 do 5% debljine spoja [1].

Prema izgledu trna, alati za zavarivanje trenjem razlikuju se od jednostavnog cilindričnog trna ravnog dna do složenih konusnih trnova profilisanih zavojnicama i žljebovima na bočnim površinama. Prema tome trn alata može biti cilindričnog ili konusnog oblika, sa zavojnicom ili bez zavojnice, sa ravnim ili profilnim žljebovima na bočnim stranicama ili bez žljebova. Tako, poprečni presjek trna može biti krug, trougao, kvadrat, petougao, šestougao itd. ili drugog oblika. Trn omogućava smicanje materijala s prednje strane alata na zadnju, miješajući materijal dva lima u dodiru i u manjoj mjeri služi za dovođenje toplote trenjem [1].

III. MIKROSTRUKTURNE KARAKTERISTIKE

U literarnim izvorima, postoji više termina koji opisuju mikrostrukturne promjene kod procesa FSW. Prvi pokušaji mikrostrukturne podjele zavarenog spoja izvedeni su 1997. godine samo za legure aluminijuma. Ubrzo nakon toga intenzivno su se počeli koristiti nazivi mikrostrukturnih zona, koji su usvojeni konsenzusom i koji obuhvataju mikrostrukturne podjele ostalih metala. Mikrostrukturna podjela, prikazana na Sl. 2., izvršena je na TWI institutu [2].



Luk - prsten struktura

Slika 2. Struktura zavarenog spoja kod procesa FSW

A – zona osnovnog materijala

B – zona uticaja toplote (Heat Affect Zone – HAZ)

C – zona termo-mehaničkog uticaja (Thermo-Mechanically Affect Zone – TMAZ)

D - zona miješanja (Stirred Zone) ili “grumen zona” (Nugget Zone – NZ) [2]

Plastično deformisanje materijala, kao ni uticaj toplote, nije prisutan u zoni osnovnog materijala, pa samim time, nema ni mikrostrukturnih promjena.

Zona uticaja toplote, kao što joj i sam naziv kaže, izložena je uticaju toplote, ali se ne deformiše tokom zavarivanja, već prolazi kroz odgovarajući temperaturni ciklus koji dovodi do promjena mikrostrukture. Veličina ove zone prvenstveno zavisi od unesene toplote.

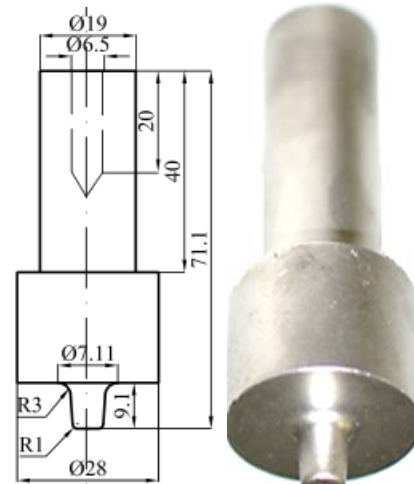
U TMAZ zoni, dolazi do plastičnog deformisanja materijala i uticaja toplote. Za razliku od zone miješanja, mikrostruktura u TMAZ zoni se razlikuje od strukture osnovnog materijala, mada je značajno deformisana, a i temperature su niže, pa je prilikom procesa zavarivanja i odgovarajuća mikrostruktura manje promijenjena. Kod aluminijuma u ovoj zoni jasno su vidljive tri oblasti: tzv. (nugget) - „grumen” zona, oblast izvan „grumen” zone i oblast rukavaca iznad „grumen” zone. Oblast izvan „grumen” zone u manjoj mjeri je deformisana i u zavisnosti od legure ne mora da bude rekristalizovana. U zoni

miješanja (tzv. nugget - „grumen” dinamički rekristalizovana zona) vladaju velike deformacije materijala. Mikrostrukturna zrna su grubo promiješana i manje su veličine od zrna u zoni osnovnog materijala. Veličina zrna kreće se od 1 - 10 μm , u zavisnosti od vrste legure i uslova zavarivanja [3].

IV. IZVOĐENJE EKSPERIMENTA

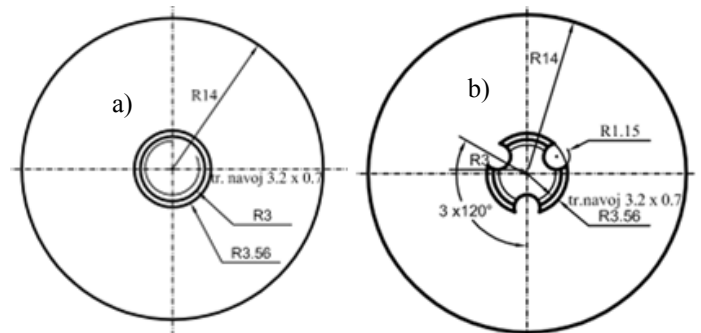
Zavarivanje FSW postupkom, aluminijumskih ploča, dimenzija 200x100x10mm, izvedeno je na Mašinskom Fakultetu u Podgorici. Eksperiment je izveden na vertikalnoj glodalici, pri laboratorijskim uslovima zavarivanja, koji su slični uslovima proizvodnje.

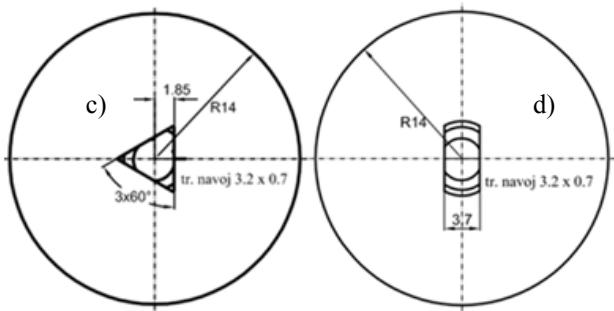
Alat koji se koristio za zavarivanje FSW postupkom (Sl. 3.) izrađen je od dva dijela, radnog dijela i tijela alata, s tim da je tijelo alata prilagođeno čeljustima mašine na kojoj se vrši zavarivanje. Radni dio alata se sastoji takođe od dva dijela i to čela alata i trna alata. Materijal alata koji se koristio u eksperimentu je alatni čelik Č. 3840, koji je nakon izrade, podvrgnut termičkoj obradi čime se dobila tvrdoća od 59 HRC [4].



Slika 3. Osnovni alat (I)

Radi ispitivanja uticaja geometrije trna alata na kvalitet zavarene površine, tokom zavarivanja korišteno je pet vrsta alata, osnovni alat prikazan na Sl. 3. i četiri alata prikazani na Sl. 4. kod kojih je modifikovan radni dio (trn).

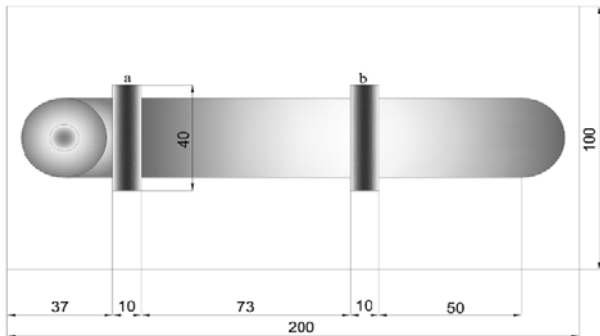




Slika 4. a) trn sa zavojnicom (II)

- b) trn sa zavojnicom i tri polukružna žlijeba urezana paralelno osi konusa (III)
 c) trn sa zavojnicom i tri ravna žlijeba urezana paralelno osi konusa (IV)
 d) trn sa zavojnicom i dva ravna paralelna žlijeba urezana paralelno osi konusa (V)

Na Sl. 5. data je usvojena šema rezanja uzoraka za metalografska ispitivanja. Uzorci su dimenzija 40x10x10 mm.



Slika 5. Prikaz šeme namjenjene za rezanje uzoraka

Rezanje je vršeno testerom debljine 1mm i dubine zuba 1mm. Pošto se, nakon rezanja, uzorci imali grubu i neravnu površinu, ravnanje neravnina je izvedeno korišćenjem odgovarajućih turpija, nakon čega su uzorci podvrgnuti finoj obradi u „Swisslion“ Industriji Alata a.d. Trebinje. U cilju dobijanja fine, glatke površine, uzorci su brušeni na uređaju za vodobrusno brušenje, brusnim papirom veće finoće 400, 600 i 1200, a nakon toga polirani na uređaju za poliranje, čime se postigao efekat ogledala. Hemijska obrada je vršena tretiranjem polirane površine u trajanju od 20 minuta sa rastvorom sljedećeg sastava: 2 ml 40% HF (Florovodonična kiselina), 200 ml destilovane vode.

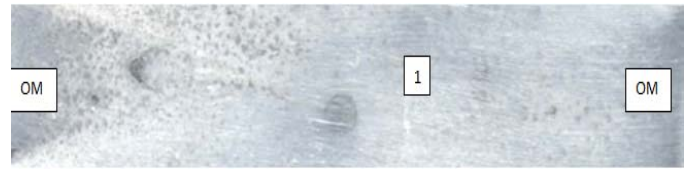
Za snimanje mikrostrukture zavarenog spoja korišten je mikroskop „Lecia EZ4 HD“ sa softverskim paketom „Lecia LAS EZ“, koji se nalazi na Medicinskom fakultetu u Foči. Ovaj mikroskop nudi uvećanje snimaka 5, 10, 20, 30, 50 i 100 puta, osvijetljenje je pomoću LED diode, a takođe sadrži integralni digitalni fotoaparatus koji nudi brz prenos podataka.

V. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Snimanje mikrostrukture je vršeno na dvadeset uzoraka, dobijenih korišćenjem pomenutih pet alata (I, II, III, IV, V) kojima je dva puta izvršeno zavarivanje (10 varova), te su se od svakoga vara izdvojile po dvije epruvete (a, b), tj. ukupno dvadeset uzoraka.

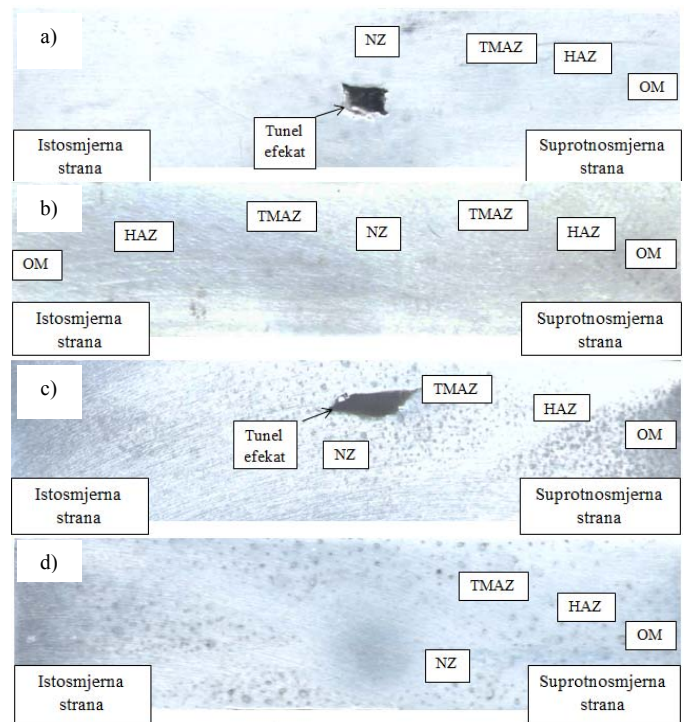
Mikrostrukturna analiza izvršena je u određenim karakterističnim pozicijama. Na Sl. 6. prikazan je snimak

mikrostrukture uzorka III1b, na kojoj se u poziciji 1, malo nazire granica između „grumen“ zone i TMAZ zone. Takođe, jasno su vidljive i zone osnovnog materijala, označene oznakom OM.



Slika 6. Mikrostruktura uzorka III1b

Na Sl. 7. a), b), c) i d) predstavljene su mikrostrukture procesa FSW za pojedine uzorke legure aluminijuma. U navedenim uzorcima, identifikovane su različite mikrostrukturne zone: zona osnovnog materijala, zona uticaja toplote (HAZ), zona termo-mehaničkog uticaja (TMAZ) i „grumen“ zona (NZ). Sa Sl. 7. c) i Sl. 7. d), na desnoj strani, vidljiv je i „bljesak“, odnosno mjesto niže vrijednosti tvrdoće, dok je na Sl. 7. a) i na Sl. 7. c) jasno vidljiv „tunel“ efekat, izražen u većoj mjeri. „Tunel“ efekat je okarakterisan kao negativna pojava i nastaje kao rezultat nedovoljnog tečenja materijala oko trna alata do istosmjernje strane, odnosno nastaje kada alat napreduje velikom brzinom [5]. Njega je moguće izbjeći samo pravilnim odabirom geometrije alata i kinematskih parametara zavarivanja.

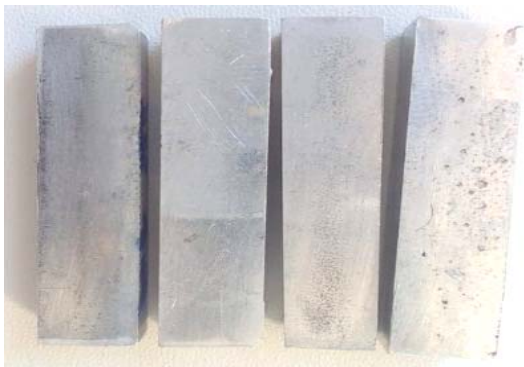


Slika 7. a) mikrostruktura uzorka III1a
 b) mikrostruktura uzorka III2a
 c) mikrostruktura uzorka III1a
 d) mikrostruktura uzorka III2b

I ostali uzorci su podvrgnuti tretiranju pod navedenim uslovima, ali jasna granica između zona nije vidljiva.

Međutim, na svim uzorcima, osim na uzorcima IV1a, IV1b, IV2a i IV2b, koji su isječeni iz vara, zavarenog alatom, čiji je trn profilisan sa zavojnicom i tri ravna žljeba urezana

paralelno osi konusa, prikazani na Sl. 8., jasno je vidljiva pojava „tunnel“ efekta.



Slika 8. Uzorci bez pojave „tunnel“ efekta [4]

Najmanje izražen „tunnel“ efekat je na alatu V, tj. alatu čiji je trn profilisan zavojnicom i dva ravna žljeba urezana paralelno osi konusa.

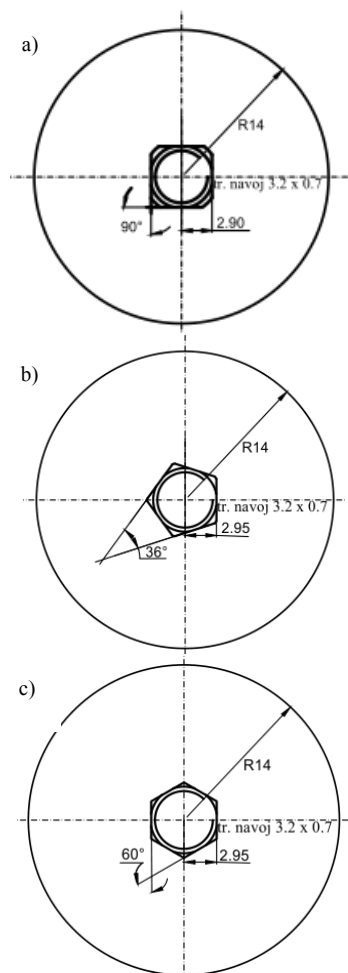
Na onovu navedenog, s pravom se može konstatovati da alat, čiji je trn profilisan sa zavojnicom i tri ravna žljeba urezana paralelno osi konusa, daje najkvalitetniji var u pogledu negativne pojave „tunnel“ efekta. Kod uzoraka izrezanih iz zavara dobijenih korišćenjem ovog alata, nisu jasno vidljive pojave pomenutog efekta. U svim ostalim uzorcima, jasno je vidljiv tunnel efekat, izražen u manjoj ili većoj mjeri. Takođe, i alat koji je profilisan zavojnicom i dva ravna žljeba, daje zavar, koji se, u poređenju sa preostala tri alata, može izdvojiti kao veoma kvalitetan.

Iz navedene analize se jasno vidi da alati čiji je trn profilisan zavojnicom i ravnim žljebovima (dva i tri ravna žljeba urezana paralelno osi konusa), daje mnogo kvalitetnije zavare u odnosu na alate profilisane samo zavojnicom ili zavojnicom i kružnim žljebovima.

VI. PRIJEDLOZI POBOLJŠANJA GEOMETRIJE ALATA

S obzirom da su se alati čiji je trn profilisan zavojnicom i ravnim žljebovima, eksperimentalnim putem, pokazali kao najbolje rješenje u formiranju vara, u cilju unapređenja postupka FSW, buduća istraživanja treba usmjeriti na određivanje optimalnog broja ravnih žljebova trna alata profilisanog zavojnicom. Istraživanje treba provesti na osnovama kompleksnih teorijskih i eksperimentalnih istraživanja i simulacije procesa. Moguće varijante trna alata profilisanog zavojnicom i ravnim žljebovima prikazane su Sl. 9. a), b) i c).

Tako je na Sl. 9. a) prikazan trn alata profilisan zavojnicom i četiri ravna žljeba, urezana paralelno osi konusa, na Sl. 9. b) trn alata profilisan zavojnicom i pet ravnih žljebova, takođe, urezanih paralelno osi konusa, a na Sl. 9. c) alat profilisan zavojnicom i šest paralelnih žljebova, urezanih paralelno osi konusa.



Slika 9. a) alat profilisan zavojnicom i četiri ravna žljeba
b) alat profilisan zavojnicom i pet ravnih žljebova
c) alat profilisan zavojnicom i šest ravnih žljebova

VII. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Najveći broj istraživanja kako same primjene FSW postupka, tako i samih mikrostrukturnih promjena zavarenog spoja je urađen na alatima za zavarivanje osnovnog cilindričnog oblika, zbog lakog dizajna i izrade. Postupak FSW je moguće značajno unaprijediti, konstruisanjem alata različitih oblika trna.

Na osnovu eksperimentalnog istraživanja i analize mikrostrukture zavarenih spojeva, dobijenih alatima različite geometrije, došlo se do različitih pokazatelja u pogledu mikrostrukture zavarenih spojeva.

Najkvalitetniju zavararenu površinu u pogledu mikrostrukture daje alat kod koga je trn profilisan zavojnicom i tri ravna žljeba urezana paralelno osi konusa. Kod pomenutog spoja nema vidljivih tragova pojave „tunnel efekta“ koji nastaje tokom miješanja materijala odnosno koji se javlja kao posljedica slabijeg protoka materijala oko trna alata.

Na svim ostalim uzorcima, uključujući i uzorke koji nisu prikazani na prethodnim slikama, u manjoj ili većoj mjeri

došlo je do pojave pomenutog efekta. Ovaj efekat zapravo pokazuje da je materijal plastično deformisan tokom izvođenja procesa zavarivanja. Uzrok navedenoj pojavi može biti: mala brzina obrtanja, velika brzina uzdužnog kretanja ili oblika trna alata.

Zbog toga su u radu predložena nova rješenja geometrije trna alata koja predstavljaju temelj budućih istraživanja. Kroz proces kompleksne analize, koja uključuje teorijska i eksperimentalna istraživanja i numeričke simulacije, treba izvršiti njihovu verifikaciju.

LITERATURA

- [1.] M. Vukčević, N. Šibalić, O. Spaić, A. Koprivica, „Geometrija alata kod postupka FSW“, KODIP, 24.-27.06.2015., Budva, Zbornik radova str.169-175.
- [2.] A. Koprivica, M. Vukčević, O.Spaić, M. Jakanović, „Uticaj geometrije alata na mikrostrukturu aluminijuma zavarnog FSW postupkom“, KODIP, 14. - 17.06.2017., Budva, Zbornik radova, str. 93 – 99.
- [3.] A. Koprivica, „Zavarivanje legura od aluminijuma primjenom postupka FSW“, Master rad, Fakultet za proizvodnju i menadžment Trebinje, Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Trebinje, 2017.
- [4.] N. Šibalić, M. Vulčević, M. Damjanović, A. Koprivica, „Examination of Microstructure of Welded Joint of Similar Materials, Obtained by FSW Method“, International Conference of Materials Processing Technology 2017, November 30 – December 1, 2017, Bangkok, Thailand, pp. 164 – 169.

- [5.] W. M. Thomas, E. D. Nichols, S. D. Smith, S. K. Das, J. K. Kanfman, T. J. Lienert, „Aluminium 2001“, proceedings of the TMS 2001, TMS, 2001.

ABSTRACT

Although there is great interest in the day-to-day use and development of the FSW process, many aspects of this technology have not been sufficiently explored or experimentally proven. On the basis of the experimental results obtained, the toolkit geometry proposals are given, the application of which should

Although there is great interest in the day-to-day use and development of the FSW process, many aspects of this technology have not been sufficiently explored or experimentally proven. On the basis of the obtained experimental results, the paper offers suggestions of the tool's geometry, the application of which should enable a significant improvement of the FSW process and represents the basis for standardization of the tools, and through their future complex research their verification should be carried out.

THE INFLUENCE OF FLOAT GROOVE TOOLS ON THE QUALITY OF WELDING IN THE FSW PROCESS

Aleksandra Koprivica, Obrad Spaić, Mirjana Jakanović,
Gojko Krunić