

# Ispitivanje uticaja Friction Stir Welding procesa na tvrdoću rotacionog alata

Aleksandra Koprivica, Mirjana Jakanović, Radoslav Vučurević, Gojko Krunic  
Fakultet za proizvodnju i menadžment Trebinje  
Univerzitet u Istočnom Sarajevu  
Trebinje, Bosna i Hercegovina  
aleksandra.koprivica@fpm.ues.rs.ba,  
mirjana.jakanovic@fpm.ues.rs.ba,  
radoslav.vucurevic@fpm.ues.rs.ba,  
gojko.krunic@fpm.ues.rs.ba

Petar Ivanković  
Elektroprivreda Republike Srpske  
Trebinje, Bosna i Hercegovina  
pivankovic@ers.com

**Sažetak**—Friction Stir Welding (FSW) zavarivanje je proces kod koga temperatura prelazi solidus liniju materijala koji se zavaruju. Dobijanje kvalitetnog zavarenog spoja u velikoj mjeri zavisi i od vrste materijala od kojeg je rotacioni alat napravljen. Pravilnim odabirom materijala alata, te odgovarajućom termičkom obradom pomenutog, mogu se izbjeći promjene dimenzija i oblika, odnosno, pojave habanja i lomljenja.

**Ključne riječi** - FSW; alat; termička obrada; (FSW, tool, thermal treatment)

## I. UVOD

Proces FSW uključuje složeno pomjeranje omekšanog materijala i plastičnu deformaciju. Jedan od najuticajnijih faktora u samom procesu zavarivanja je rotacioni alat. Zbog svoje specifične funkcije i namjene, alat mora geometrijski, metalurški i hemijski da bude prilagođen obliku, mehaničkim svojstvima, metalurgiji i hemijskom sastavu osnovnog materijala, kao i tehnološkim parametrima postupka zavarivanja.

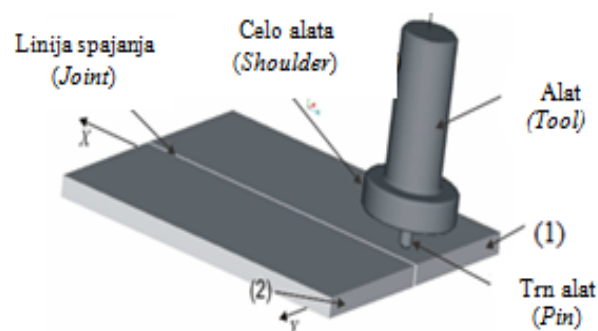
Alat, kao cjelina, neophodan je za formiranje zavara kod FSW postupka, međutim, kontakt između alata i ploča koje se zavaruju uvijek se ostvaruje preko aktivnih površina alata. Njegov konstrukcioni oblik je važan faktor koji može da ima uticaj sam kvalitet zavara. Pored dizajna, veliki uticaj ima i materijal alata, pa je samim tim veoma poželjno da materijal posjeduje dovoljnu čvrstoću i tvrdoću na temperaturi zavarivanja. Takve mehaničke osobine alata postižu se termičkom obradom.

Zagrijavanjem ili hlađenjem nekog metala, odnosno legure, dolazi do promjene strukture, čime se mijenjaju i njihove osobine u željenom pravcu. Sve takve postupke kod kojih je toplota glavni, a ne sporedni faktor nazivamo zajedničkim imenom termička obrada. Oni se uglavnom sastoje od zagrijavanja do određene temperature, zadržavanja na toj temperaturi određeno vrijeme, nakon čega slijedi hlađenje određenom brzinom, sve do sobne temperature. Glavna svrha termičke obrade je promjena osobina metala i legura i to povećanje čvrstoće i tvrdoće, uz potrebnu žilavost. Prilikom

izrade rotacionog alata korišten je čelik Č.3840, koji pripada grupi tzv. merilo legiranih alatnih čelika.

## II. FSW ZAVARIVANJE

Postupak FSW se izvodi na taj način što se na radnom stolu mašine, koji se kreće horizontalno, translatorno, postave i čvrsto stegnu limovi koje je potrebno spojiti. Cijeli postupak se zasniva na generisanju toplote za koju je „zadužen“ specijalni alat cilindričnog oblika, koji se sastoji od dva dijela i to: tijela većeg prečnika i rukavca manjeg prečnika koji rotiraju velikom brzinom. Uticaj tijela alata na generisanje toplote je zanemarljiv i on služi da se alat pričvrsti u stezne čeljusti mašine. Dio alata većeg prečnika naziva se čelo alata (*shoulder*), dok se dio manjeg prečnika naziva trn alata (*pin*) (Sl. 1) [1].

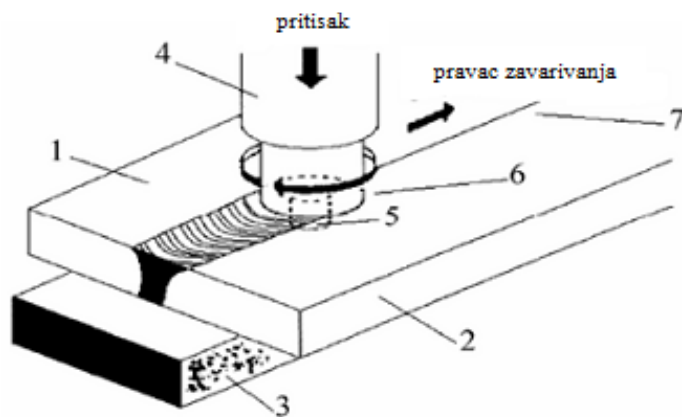


Slika 1. Alat i predmeti prije početka zavarivanja [2]

Postupak FSW započinje na taj način što se alat pozicionira iznad radnog stola mašine, alat rotira i prilazi upravno liniji spoja i zariva se u materijal – radne predmete (limovi (1) i (2) na Sl. 2 [2].

U materijalu (radnim predmetima) se formira početna rupa, pri čemu počinje da se generiše toplota. Trn alata prodire u materijal sve do momenta kada čelo alata napravi kontakt sa gornjom površinom radnih komada. Alat mora da sa dovoljnim pritiskom (Sl. 2) zadrži materijal unutar zone zavarivanja i da stvori dovoljnu temperaturu da bi se proces uspješno odvijao.

Materijal limova se zagrijava do blizu tačke topljenja i iz stanja elastičnosti prelazi u stanje plastičnosti, pa se uz pomoć trna alata, takav materijal kreće okolo rukavca i na taj način se miješa. U momentu kada čelo alata dodirne gornje površine limova, vrh rukavca se nalazi u blizini postolja, kretanje alata naniže se prekida i počinje horizontalno, translatorno kretanje postolja. U daljem toku rada, alat se kreće longitudinalno između limova u smjeru zavarivanja, materijal se zagrijava, postaje plastičan i neprekidno se miješa. Iza čela alata se stvara brazda glatkog zagrijanog materijala koji se hladi i očvršćava, a između limova se formira monolitan spoj. Pri tome, čelo alata oblikuje ravnu površinu šava sa gornje strane limova, a sa donje strane to isto čini postolje. Zavarivanje se završava jednostavno prekidanjem rotacionog i translatornog kretanja. Umjesto postolja, translatorno kretanje može da vrši samo alat, ili, u isto vrijeme, i postolje i alat [2].



Slika 2. Princip FSW – a (1 i 2 – limovi, 3 – postolje, 4 – tijelo alata, 5 – trn alata, 6 – čelo alata, 7 – linija dodira limova) [2]

Kod procesa FSW, poznavanje generisane toplote je veoma bitno. Ona se generiše iz dva glavna izvora i to:

- toplota generisana usljed trenja između čela alata i površine radnih predmeta i
- toplota generisana usljed plastične deformacije materijala, nastala od strane trna alata [3].

Plastično deformisani material se mehanički miješa i spaja, a pri tome se alat kreće u longitudinalnom pravcu, tj. duž linije spajanja.

Jedan od najznačajnijih faktora u samom procesu zavarivanja, te formiranju kvalitetnog zavara jeste rotacioni alat. S tim u vezi, materijal od koga se izrađuje alat za FSW zavarivanje, mora imati sljedeće osobine:

- povišenu čvrstoću i na visokim temperaturama;
- otpornost na habanje;
- odgovarajuću žilavost i
- dobru obradljivost [1].

Postoji nekoliko vrsta materijala koji se najčešće koriste za izradu alata pri zavarivanju određenih materijala:

- Alatni čelici – najčešće korišten materijal za izradu alata kod FSW postupka, dostupan i jednostavan za obradu, termički otporan na zamor materijala, otporan

na habanje, posebno korišten za zavarivanje legura aluminijuma, bakra i magnezijuma;

- Legure nikla i legure kobalta – visoka čvrstoća, dobra žilavost, radna temperatura je od 600 – 800 °C;
- Vatrostalni metali (W, Mo) – visoka temperaturna čvrstoća (najjače legure, radna temperatura od 1000 – 1500 °C), visoka cijena, teška obradivost, krtoš;
- Legure volframa – dobra čvrstoća, visoka radna temperatura, visoka cijena;
- Kompoziti, karbidne čestice ojačane metalom WC, WC-Co, TiC – visoka otpornost na habanje, odgovarajuća žilavost loma;
- Čelici sa obloženim polikristalnim kubnim bor nitridom (PCBN) – velika otpornost na habanje, niska žilavost loma, visoka cijena (Tabela I) [1].

TABELA I. VRSTE MATERIJALA ALATA ZA POJEDINE VRSTE MATERIJALA KOJI SE ZAVARUJE [1]

Materijal koji se zavaruje	Debljina [mm]	Materijal alata
Legure aluminijuma	3-50	Alatni čelici, Co-WC kompoziti
Legure magnezijuma	3-10	Alatni čelici, WC kompoziti
Legure bakra	3-50	Ni – legure, W – legure, alatni čelici
Legure titanijuma	3-10	W – legure
Nerđajući čelici	3-10	PCBN, W - legure
Nisko legirani čelici	3-10	WC kompoziti, PCBN
Legure nikla	3-10	PCBN

U cilju poboljšanja osobina alata, koji se izrađuju od alatnih čelika, provode se određeni postupci termičke obrade.

### III. TERMIČKA OBRADA

Svi postupci termičke obrade čelika mogu se podijeliti u dvije osnovne grupe:

- Postupci koji strukturu čelika približavaju ravnotežnom stanju: žarenje i poboljšanje,
- Postupci koji strukturu čelika udaljavaju od ravnotežnog stanja: kaljenje [4].

Prilikom prve faze, zagrijavanja čelika na propisanu temperaturu, upotrebljavaju se peći različitih sistema i konstrukcija, na čiji oblik i veličinu utiče veličina komada, vrsta metala, temperatura zagrijavanja, traženi kapacitet peći itd.

Kod metala, zagrijavanje se mora vršiti ravnomjerno čija brzina zavisi od njegove toplotne provodljivosti. Svaki metal ima različitu sposobnost provođenja toplote, koja zavisi od hemijskog sastava, stepena zagrijanosti i od stanja u kome se metal nalazio prije zagrijavanja (liven, kovan i sl.).

Svaki metal i svaka legura moraju se zagrijavati po propisanom režimu, u suprotnom dolazi do jakih naprezanja i stvaranja makro i mikro pukotina.

Određivanje brzine i trajanje zagrijavanja može se utvrditi računski, eksperimentalno ili iskustvenom formulom:

$$H = c \cdot d$$

gdje su:

- H [h] – vrijeme zagrijavanja predmeta obrade,
- d [cm] – prečnik predmeta obrade,
- c = 0,10 ÷ 0,15 – za ugljenične čelike,
- c = 0,15 ÷ 0,20 – za niskolegirane čelike,
- c = 0,20 ÷ 0,30 – za visokolegirane čelike,
- c = 0,30 ÷ 0,40 – za specijalne čelike [5].

Kod termičke obrade čelika veliku ulogu igraju i sredstva za hlađenje pri kaljenju, jer od tih sredstava zavisi brzina hlađenja. Ulje posjeduje najintezivnije dejstvo hlađenja, gas najmanje, a između njih je dejstvo hlađenja pri kaljenju u rastvoru soli. Ulje sprečava stvaranje karbida i na površini komada se brzo dostiže temperatura obrazovanja martenzita, a hlađenje jezgra komada teče znatno sporije što dovodi do napona koji mogu izazvati pucanje komada. Pri hlađenju u gasu temperaturna razlika između jezgra i površine je znatno manja pa nema tih napona, ali sporije hlađenje vodi jačem izdvajanju karbida. Povoljniji su uslovi hlađenja u soli, jer je izdvajanje karbida veće nego pri hlađenju u ulju. Brzina hlađenja u rastvoru soli je dovoljna da se spriječi obrazovanje perlita, zato se kombinuju prednosti austenitizacije u vakuumu sa prednostima hlađenja u rastvoru ulja [4].

#### A. Žarenje

U grupu žarenja se svrstavaju oni postupci termičke obrade za koje je karakteristično to da se hlađenje zagrijanih dijelova obavlja polako, kako bi se struktura približila ravnotežnom stanju. U zavisnosti od cilja koji se želi postići, sve postupke žarenja možemo podijeliti u tri grupe:

- žarenje za smanjenje ili uklanjanje neravnomjernosti strukture: difuziono žarenje i normalizacija,
- žarenje u cilju poboljšanja obradivosti: meko, visoko i rekristalizaciono žarenje i
- žarenje radi smanjenja ili uklanjanja napona.

Difuziono žarenje se primjenjuje kod čelika sa takozvanim kristalnim segregacijama. Najčešće se primjenjuje kod očvršćavanja odlivaka gdje u samom kristalnom zrnu dolazi do znatnih razlika u hemijskom sastavu, dakle materijal je hemijski heterogen. Budući da se ovim postupkom obezbjeđuje ravnomjerniji i homogeniji hemijski sastav, on se naziva i homogenizacija.

Normalizacija je takav postupak termičke obrade kod koga dolazi do usitnjavanja kristalnog zrna, a time i do poboljšanja mehaničkih osobina čelika.

Meko žarenje se izvodi u cilju postizanja zrnastog a ne lamernog perlita, jer zrnasti perlit ima manju tvrdoću, ali povećava žilavost i plastičnost.

Visoko žarenje ili žarenje na grubo zrno se izvodi u svrhu namjernog progrubljenja kristalnog zrna, a primjenjuje se kod podeutektoidnih čelika sa niskim sadržajem ugljenika.

Rekristalizaciono žarenje se primjenjuje u slučajevima kada je nekom prethodnom hladnom, plastičnom obradom zrno usmjereno i pretjerano izduženo. Takav čelik ima visoku tvrdoću i čvrstoću, a nisku plastičnost, te dalja plastična obrada nije moguća.

Žarenje za uklanjanje napona se izvodi kod onih proizvoda kod kojih nakon livenja, zavarivanja, kovanja, valjanja i sl. dolazi do neravnomjernog hlađenja, a time i do pojave unutrašnjih napona [4].

#### B. Kaljenje

Kaljenje je postupak termičke obrade koji strukturu čelika udaljava od ravnotežnog stanja. Budući da se ono izvodi radi povećanja tvrdoće još se naziva i otvrdnjavanje. Izvodi se tako što se čelik zagrije do temperature austenitizacije, zadržava izvjesno vrijeme na toj temperaturi, a zatim naglo ohladi do sobne temperature. Zagrijavanjem čelika dolazi do preobražaja perlita u austenit dok se naglim hlađenjem austenita obezbjeđuje ponovni preobražaj austenita, ne u perlit, već u neku od struktura veće tvrdoće kao što su: sorbit, trustit ili martenzit. Prema načinu praktičnog izvođenja kaljenja ono se može podijeliti na:

- kaljenje u jednom rashladnom sredstvu – obično direktno kaljenje i
- kaljenje u dva rashladna sredstva – obično slomljeno, stepenasto i izotermalno kaljenje.

Zavisno od dubine prokaljivanja, do koje se odvijaju promjene, razlikujemo:

- kaljenje kroz cijeli presjek i
- površinsko kaljenje.

Obično direktno kaljenje se primjenjuje za čelike veće kritične brzine hlađenja. Radi efikasnijeg zakaljivanja potrebno je obezbjeđiti dovoljnu cirkulaciju vode.

Slomljenim kaljenjem se smanjuju unutrašnja naprezanja koja su posljedica temperaturnih razlika na površini i u jezgri dijela koji se kali.

Termička naprezanja se mogu znatnije smanjiti stepenastim kaljenjem koje se izvodi najprije brzim hlađenjem u jednom rashladnom sredstvu (rastopljena so), a zatim hlađenjem na vazduhu ili vodi. Suština ovoga kaljenja je u tome da se dijelovi, zagrijani do potrebne temperature, hlade u rastopljenim solima, čija je temperatura nešto iznad temperature početka martenzit transformacije za dati čelik. Poslije držanja na toj temperaturi određeno vrijeme, koje je potrebno da se izjednače temperature po cijelom presjeku, dijelovi se vade iz rastopljenih soli i hlade na vazduhu. Za vrijeme hlađenja u rastopljenim solima nema strukturnih promjena, a martenzit se obrazuje hlađenjem na vazduhu.

Izotermalnim kaljenjem se utiče na smanjenje i temperaturnih i strukturnih naprezanja, a time i na smanjenje pukotina – naprsina.

Otpuštanje je postupak termičke obrade koji redovno slijedi nakon postupka kaljenja kako bi se postigao određeni stepen smanjenja krtosti i unutrašnjih napona. U zavisnosti od

temperature zagrijavanja postoji nisko, srednje i visoko otpuštanje [4]-[6].

### C. Poboljšanje

Poboljšanje je postupak termičke obrade koji se sastoji iz kaljenja i visokog otpuštanja. Kaljenje se izvodi na temperaturi od 880 °C, jedan čas, u ulju, a dalje kao kod žarenja za uklanjanje napona slijedi grijanje na temperaturi iznad 550 °C, obično na 650 °C, u trajanju od dva časa, pri mirnom hlađenju. Ovaj postupak, koji slijedi nakon kaljenja naziva se otpuštanje [4].

## IV. TERMIČKA OBRADA ROTACIONOG ALATA IZRAĐENOG OD ČELIKA Č.3840

Termička obrada specijalnih alata (Sl. 3), namjenjenih FSW zavarivanju, izvedena je u Swisslion Industriji alata a.d. Trebinje.



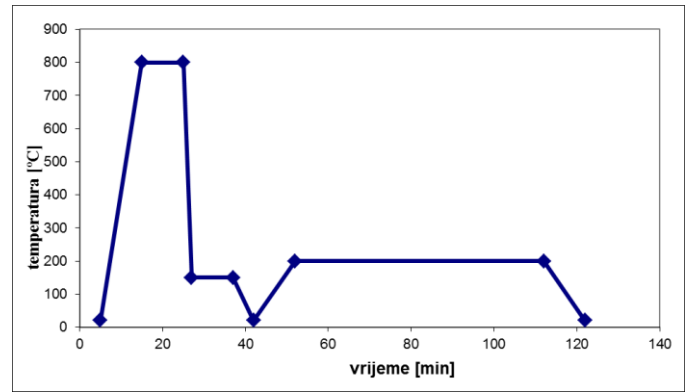
Slika 3. Specijalni alati za zavarivanje

Čelik, Č. 3840, od koga je izrađen specijalni alat pripada grupi tzv. merilo legiranih alatnih čelika, legiran sa 2% Mn, 1,8% Cr, dok se sadržaj ugljenika kreće od 1 ÷ 1,5 %. Odlikuje se velikom tvrdoćom, minimalnom deformacijom, visokom prokaljivošću, dimenzionom stabilnošću pri termičkoj obradi, te dobrom postojanošću rezne ivice. Ovaj čelik ima univerzalnu primjenu. Koristi se za izradu: alata za sječenje i prosijecanje limova do 6 mm debljine, alata za rezanje navoja, burgija, razvrtača, kontrolnika, mjernih alata itd.

Termička obrada, izvedena prilikom eksperimenta, vršena je u peći koja kao sredstvo za kaljenje i otpuštanje koristi so. Pošto je trn alata prečnika reda veličine do 10 mm, primjenjeno je stepenasto kaljenje, kojim se smanjuju unutrašnji naponi alata, deformacije i mogućnosti nastanka naprslina.

Izmjerena tvrdoća čelika prije termičke obrade bila je 19 HRC. Nakon kaljenja na 800 °C, u trajanju od 10 minuta u soli GS 540, dobijena je tvrdoća od 63 HRC. Poslije kaljenja, alat je podvrgnut procesu niskog otpuštanja na 200 °C. Otpuštanje je izvedeno u AS soli, u trajanju od 1 časa, što je za rezultat imalo tvrdoću alata od 59 HRC. Cilj otpuštanja okaljenog alata jeste smanjenje nastalih unutrašnjih napona, povećanje čvrstoće i žilavosti bez bitnijeg smanjenja tvrdoće.

Zavisnost tvrdoće alata od temperature kaljenja prikazana je grafikonom na Sl. 4.



Slika 4. Dijagram termičke obrade alata

## V. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA UTICAJA FSW POSTUPKA NA TVRDOĆU ALATA

FSW zavarivanje je izvedeno u laboratoriji Mašinskog fakulteta u Podgorici na vertikalnoj glodalici, specijalno prilagođenoj ovoj vrsti zavarivanja. Za eksperimentalno izvođenje procesa FSW definisane su sljedeće postavke:

- radni mmaterijal je nisko legirana legura aluminijuma (99,5 % Al, tačka topljenja 660,4 °C ),
- dimenzije radnih predmeta (dvadeset ploča) za zavarivanje su 200 x 100 x 10 mm i
- proces zavarivanja, odnosno deformisanja, se izvodi u čvrstom stanju (bez topljenja materijala).

Proces zavarivanja započinje time što rotirajući alat, brzim hodom, dolazi do linije spajanja, nakon čega alat sa svojim trnom prodire u materijal. Proces zavarivanja trenjem započinje kada je čelo alata dotaklo radni predmet. Nakon toga, u rad se pušta uzdužno kretanje radnog stola glodalice, čime započinje spajanje materijala radnih predmeta. Na kraju radnih ploča, alat se izvlači iz pomenutih, čime se završava FSW proces.

Nakon završetka procesa, rotacioni alati su mehanički očišćeni od zaostataka očvrstnutog materijala radnih komada, te je pregledom njihovih površina ustanovljena nepromjenjenost oblika. Takođe, izvršena je postprocesna provjera tvrdoće, s tim da je mjerenje tvrdoće alata izvršeno u dvije tačke i to: mjerenje tvrdoće tijela alata koje direktno ne učestvuje u procesu zavarivanja (pozicija 1) i mjerenje trna alata koji direktno učestvuje u procesu (pozicija 2). Tvrdoća je mjerena na pet alata u dvije pozicije, pri čemu su dobijeni podaci prikazani u Tabeli II.

TABELA II. TVRDOĆA ALATA NAKON IZVOĐENJA FSW PROCESA

	TVRDOĆA [HRC]				
	Alat I	Alat II	Alat III	Alat IV	Alat V
Pozicija 1	59	60,7	61	61,6	60,2
Pozicija 2	59	60,7	61	61,6	60,2

Na osnovu dobijenih podataka, može se zaključiti da odstupanja od početne tvrdoće nema, te da su izmjerene

vrijednosti u granicama oko 59 HRC. Dakle, odstupanja na obje pozicije svih mjerenih alata su neprimjetna.

## VI. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Sastav, struktura, način prerade i termička obrada kojoj mogu biti podvrgnuti metali i legure utiču na njihova svojstva i ponašanje u proizvodnim procesima i u toku same eksploatacije. Važna mehanička svojstva poput zatezne čvrstoće, tvrdoće, žilavosti i plastičnosti mogu se poboljšati kombinacijom hemijskog sastava – legiranjem, promjenom veličine metalnog zrna, ali na njih se može uticati i promjenom strukture i stvaranjem novih faza u procesima termičke obrade.

Cilj termičke obrade čelika jeste promjena mehaničkih osobina, prije svega povećanje tvrdoće, a njen efekat prvenstveno zavisi od: hemijskog sastava, mikrostrukture, stepena hladne deformacije, brzine zagrijavanja i hlađenja čelika itd.

Termičkom obradom alata izrađenog od čelika Č. 3840, promjenjene su ključne mehaničke osobine, prvenstveno tvrdoća alata, koja je procesom kaljenja, sa početnih 19 HRC povećana na 63 HRC, a usljed otpuštanja, koje je imalo za cilj eliminaciju zaostalih napona, tvrdoća je smanjena na 59 HRC.

Tvrdoća alata, dobijena nakon termičke obrade, nalazi se u referentnim granicama, potrebnim za nesmetano sprovođenje FSW zavarivanja.

Ispitivanjem tvrdoće na karakterističnim pozicijama alata, tj. na dijelu koji učestvuje u samom procesu zavarivanja i na dijelu alata koje nema direktnog uticaja u procesu, ustanovljeno je da sam FSW proces ne djeluje na smanjenje tvrdoće alata, čime je potvrđeno da dobijena tvrdoća alata izrađenog od čelika Č.3840, odgovara zahtjevima procesa zavarivanja aluminijuma FSW postupkom.

## LITERATURA

- [1] A. Koprivica, Zavarivanje legura od aluminijuma primjenom postupka FSW, master rad, Fakultet za proizvodnju i menadžment Trebinje, Trebinje, 2017.
- [2] N. Šibalić, Modeliranje i simulacija procesa spajanja deformisanjem – FSW, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet Podgorica, 2010.
- [3] M. Vukčević, N. Šibalić, S. Savićević, M. Janjić, Determination of microstructure of the FSW process, Univerzitet Crne Gore, Mašinski fakultet, Podgorica, 2013.
- [4] Lj. Zirojević, Materijali (skripta), Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Fakultet za proizvodnju i menadžment Trebinje, 1998.
- [5] R. Lučić, Mašinski materijali – nauka i inženjerstvo, Paraćin, 1995.
- [6] W. G. Moffatt, G. W. Pearsall, J. Wulff, Strukture i osobine materijala – knjiga I, TMF, Beograd, 1975.

## ABSTRACT

Friction Stir Welding (FSW) welding is a process in which temperatures exceed the solidus line of welding materials. Getting a quality welded joint depends to a large extent on the type of the material from which the rotary tool is made. By correct selection of the construction material of the tool, and by the appropriate thermal treatment of the aforementioned, it is possible to avoid changes in dimensions and shapes, that is, the appearance of wear and tear.

## IMPACT TESTING OF THE FSW PROCESS ON THE RIGIDITY OF THE ROTARY TOOL

Aleksandra Koprivica, Mirjana Jokanović, Petar Ivanković,  
Radoslav Vučurević, Gojko Krunić