

ZBORNİK RADOVA

- **PREDGOVOR**
- **SPONZORI**
- **POČASNI ODBOR**
- **NAUČNO-STRUČNI ODBOR
„PROCESINGA 2010“**
- **ORGANIZACIONI ODBOR
„PROCESINGA 2010“**
- **NAUČNO-STRUČNI ODBOR
„ZAVARIVANJA 2010“**
- **ORGANIZACIONI ODBOR
„ZAVARIVANJA 2010“**
- **ORGANIZACIONI I
STRUČNI ODBOR
„IBR-a 2010“**
- **ORGANIZATORI**
- **PROGRAM**
- **SADRŽAJ**

ZBORNİK RADOVA

**Dvadeset treći međunarodni kongres o procesnoj industriji
PROCESING 2010**

**Dvadeset šesto savetovanje sa međunarodnim učešćem
ZAVARIVANJE 2010**

**Dvadeset šesto savetovanje sa međunarodnim učešćem
IBR 2010**

(Tara, 2-4 jun 2010)

Izdavači

Savez mašinskih i elektrotehničkih
inženjera i tehničara Srbije (SMEITS)
Sekcija za procesnu tehniku
Kneza Miloša 7a/II, 11000 Beograd

Društvo za unapređivanje
zavarivanja u Srbiji (DUZS)
Grčića Milenka 67, 11000 Beograd

Srpsko društvo za ispitivanje
bez razaranja (SDIBR)
Grčića Milenka 67, 11000 Beograd

Glavni urednik

Ilija Kovačević, dipl. inž.

Uređivački odbor

dr Dejan Radić, dipl. inž.,
dr Vencislav Grabulov, dipl. inž.,
mr Đurđija Čašić, dipl. inž.

Kompjuterska priprema

„Kvartet V“, Beograd

Štampa

„NO-KAČI“, Beograd

Tiraž

400 primeraka

*Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije i
Inženjerska komora Srbije finansijski su pomogli
organizovanje savetovanja „Zavarivanje 2010“*

PREDGOVOR

Pozitivni komentari učesnika, odjek iz privrede, promovisanje struke kroz osamnaest plenarnih predavanja od ukupno sto četrnaest, kao i impozantan broj od tri stotine učesnika iz zemlje i inostranstva, ponovo su udružili, Savez mašinskih i elektrotehničkih inženjera i tehničara Srbije (SMEITS), Društvo za unapređivanje zavarivanja u Srbiji (DUZS) i Srpsko društvo za ispitivanje bez razaranja (SDIBR) u želji da zajednički organizuju svoje tradicionalne skupove i da na taj način zajednički ostvaruju postavljene ciljeve:

- objedinjeno razmatranje komplementarne problematike („Procesinga 2010“, „Zavarivanja 2010“ i „IBR 2010“);
- da na jednom mestu, u isto vreme i sa jednom kotizacijom stručnjaci jednog preduzeća učestvuju na tri respektabilna naučno-stručna skupa;
- dopunjavanje tematskih oblasti koje omogućava učesnicima da slede logičan niz u životu jednog proizvoda (projekta, izrade - zavarivanja, ispitivanja, puštanja u rad, održavanja, popravke itd.);
- da radovi koji se pripremaju za skup budu sa tematikom iz svakodnevnog inženjerskog rada, kako bi se omogućilo učesnicima da reše ili dobiju ideju kako da reše konkretne probleme iz prakse;
- povećanje broja učesnika i članstva u SMEITS-u, DUZS-u i SDIBR-u;
- međusobno povezivanje učesnika, privrednih društava i organizatora kongresa odnosno savetovanja u cilju promovisanja struke i stalnog poslovnog kontakta u periodima između dva skupa;
- da zajedničko savetovanje postane embrion organizovanja budućih regionalnih skupova.

Sa željom da kvalitet rada skupa podignu na viši nivo, organizacioni i naučno-stručni odbori sva tri skupa su nakon prispeća i razvrstavanja radova napravili plan skupa koji podrazumeva zajednička plenarna izlaganja svih radova u istoj sali, osim šest radova za koje su se naučno-stručni odbori odlučili da budu prezentirani na posterima.

Na ovom disku su kompletni radovi pisani za sva tri skupa. Disk se uručuje učesnicima „trojnog“ skupa zajedno sa štampanim zbornikom rezimea (na srpskom i engleskom) tih radova. Pored osnovnih informacija o skupu - naziva pokrovitelja i sponzora, sastava odbora, programa skupa i oglasnog dela, na disku je i prednacrt „Pravilnika o tehničkim uslovima za obavljanje delatnosti punjenja, transporta, skladištenja i distribucije boca sa tehničkim gasovima“, kome je u programu skupa posvećen okrugli sto.

U Beogradu, maja 2010.

ORGANIZACIONI ODBORI
 „Procesinga 2010“,
 „Zavarivanja 2010“,
 „IBR 2010“

Dvadeset treći međunarodni kongres
o procesnoj industriji
PROCESING 2010

Dvadeset šesto savetovanje sa međunarodnim učešćem
ZAVARIVANJE 2010

Dvadeset šesto savetovanje sa međunarodnim učešćem
IBR 2010

održavaju se pod pokroviteljstvom
Ministarstva rudarstva i energetike
Republike Srbije

Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije
Ministarstva ekonomije i regionalnog razvoja Republike Srbije
Sekretarijata za energetiku i mineralne
sirovine AP Vojvodine
Privredne komore Srbije
Inženjerske komore Srbije

SPONZORI



Beograd



Beograd



Rumunija



Zagreb, Hrvatska



Beograd



Beograd



Bečej



Beograd



METAL
INSPEK DOO

Beograd



Čuprija



Novi Sad



Beograd



Beograd



Beograd



Beograd

ZAVOD ZA ZAVARIVANJE A.D

POČASNI ODBOR

Ernst Bode	Messer Tehnogas , Beograd
Marinko Bokić	EuroGas , Subotica
Nicolae Crunteanu	Ductil - Air Liquide Welding , Rumunija
Miroslav Cvetićanin	Remming , Novi Sad
Branko Cvetković	Bacco , Beograd
Vencislav Grabulov	Društvo za unapređivanje zavarivanja u Srbiji , Beograd
Branko Grbić	Delta inženjering , Beograd

Nenad Ilibašić	<i>Everest services</i> , Beograd
Branislav Jaćimović	<i>Mašinski fakultet</i> , Beograd
Aleksandar Jakovljević	<i>JP EPS</i> , Beograd
Slobodan Janjušević	<i>Kirka - SURI</i> , Beograd
Slobodan Macedonić	<i>Linde Gas Srbija - Industrija gasova</i> , Bečej
Tomislav Papić	<i>Sekretarijat za energetiku APV</i> , Novi Sad
Milutin Prodanović	<i>Ministarstvo rudarstva i energetike RS</i> , Beograd
Dragoljub Radojičić	<i>Srpsko društvo za ispitivanje bez razaranja</i> , Beograd
Milena Radujković	<i>ELIMP, Zagreb</i> , Hrvatska
Aleksandar Stanković	<i>SAGAX</i> , Beograd
Goran Sofronić	<i>Zavod za zavarivanje</i> , Beograd
Miodrag Stojiljković	<i>SMEITS</i> , Beograd
Slobodan Stošić	<i>MIP - Procesna oprema</i> , Čuprija
Dragoslav Šumarac	<i>Inženjerska komora Srbije</i> , Beograd
Miomir A. Todorović	<i>Privredna komora Srbije</i> , Beograd
Dimitrije Voronjec	<i>Mašinski fakultet</i> , Beograd

NAUČNO-STRUČNI ODBOR „PROCESINGA 2010“

Gradimir Ilić	<i>Mašinski fakultet</i> , Niš
Ioan Laza	<i>Mašinski fakultet</i> , Temišvar, Rumunija
Slobodan Macedonić	<i>Linde Gas Srbija</i> , Bečej
Dejan Radić	<i>Mašinski fakultet</i> , Beograd (predsednik Odbora)
Miroslav Stanojević	<i>Mašinski fakultet</i> , Beograd

ORGANIZACIONI ODBOR „PROCESINGA 2010“

Aleksandar Dedić	<i>Šumarski fakultet</i> , Beograd
Aleksandar Enbulajev	<i>BGA</i> , Beograd
Srbislav Genić	<i>Mašinski fakultet</i> , Beograd
Ilija Kovačević	<i>Pro-ING</i> , Beograd (predsednik Odbora)
Zoran Nikolić	<i>Messer Tehnogas</i> , Beograd
Aleksandar Petrović	<i>Mašinski fakultet</i> , Beograd
Vukašin Simeunović	<i>Toplana</i> , Kraljevo
Aleksandar Stanković	<i>SAGAX</i> , Beograd
Slobodan Stošić	<i>MIP - Procesna oprema</i> , Čuprija
Dragomir Šamšalović	<i>SMEITS</i> , Beograd
Dejan Vračar	<i>Babcock borsig power usluge</i> , Beograd

NAUČNO-STRUČNI ODBOR „ZAVARIVANJA 2010“

Milica Antić	<i>Zavod za zavarivanje</i> , Beograd
Katarina Gerić	<i>FTNS</i> , Novi Sad
Vencislav Grabulov	<i>Institut za ispitivanje materijala</i> , Beograd (predsednik Odbora)
Vukić Lazić	<i>Mašinski fakultet</i> , Kragujevac
Zoran Odanović	<i>Institut za ispitivanje materijala</i> , Beograd
Aleksandar Radović	<i>DUZS</i> , Beograd
Aleksandar Sedmak	<i>Mašinski fakultet</i> , Beograd

ORGANIZACIONI ODBOR**„ZAVARIVANJA 2010“**

Vera Božić	<i>DUZS</i> , Beograd
Aleksandar Đorđević	<i>Messer Tehnogas</i> , Beograd
Vencislav Grabulov	<i>Institut za ispitivanje materijala</i> , Beograd
Vladimir Lilić	<i>Weld-ing</i> , Beograd (predsednik Odbora)
Branislav Lukić	<i>Institut za zaštitu na radu</i> , Novi Sad
Dragan Mišković	<i>REFIT INŽENJERING</i> , Beograd
Dragan Mitić	<i>Zavod za zavarivanje</i> , Beograd
Ana Nanut	<i>HIP „Petrohemija“</i> , Pančevo

ORGANIZACIONI I**STRUČNI ODBOR****„IBR-a 2010“**

Đurdija Čašić	<i>Institut „Vinča“</i> , Beograd (predsednik Odbora)
Ljiljana Dunderski	<i>JP „Srbija gas“</i> , Zrenjanin
Aleksandar Jakovljević	<i>JP EPS</i> , Beograd
Nenad Marković	<i>Goša</i> , Smederevska Palanka
Vesna Peruničić	<i>Termoelektro</i> , Beograd
Dragoljub Radojčić	<i>Kontrol inspekt</i> , Beograd
Goran Sofronić	<i>Zavod za zavarivanje</i> , Beograd

ORGANIZATORI**„PROCESING 2010“**

Savez mašinskih i elektrotehničkih
inženjera i tehničara Srbije (SMEITS),
Sekcija za procesnu tehniku
Kneza Miloša 7a/II, 11000 Beograd
Tel. +381 (0) 11 3230-041, +381 (0) 11 3031-696,
tel./faks +381 (0) 11 3231-372
E-mail: office@smeits.rs,
web: www.smeits.rs

Savetovanje „ZAVARIVANJE 2010“

Društvo za unapređivanje
zavarivanja u Srbiji (DUZS),
Grčića Milenka 67, 11000 Beograd
Tel./faks +381 (0) 11 2850-794
E-mail: duzs@eunet.rs,
web: www.duzs.org.rs

Savetovanje „IBR 2010“

Srpsko društvo za ispitivanje
bez razaranja (SDIBR),
Grčića Milenka 67, 11000 Beograd
Tel. +381 (0) 11 2851-079,
faks +381 (0) 11 2850-648
E-mail: zzzgo1@eunet.rs,
web: www.sdibr.org.rs

PROGRAM SKUPA

SREDA, 2. jun 2010.

15.00–18.00 h	Prijavljivanje učesnika i podela kongresnog materijala	Hol hotela
18.00–19.30 h	Koktel dobrodošlice, otvaranje kongresa PROCESING 2010, savetovanja ZAVARIVANJE 2010 i IBR 2010, pozdravne reči i uručivanje povelja za 2009. godinu	Kongresna sala

ČETVRTAK, 3. jun 2010.

8.30–11.00 h	Izlaganje radova: PROCESING 2010 - od br. 1 do br. 5 I tematske grupe ZAVARIVANJE 2010 - od br. 75 do br. 79 IV tematske grupe IBR 2010 - br. 81 i 85 I tematske grupe, br. 87 i 88 II tematske grupe, br. 89 III tematske grupe i br. 91 do 95 IV tematske grupe Predstavljanje sponzora: 1. MESSER TEHNOGAS, Beograd 2. CWG, Beograd 3. METAL INSPEKT, Beograd	Kongresna sala
11.00–11.15 h	Pauza	
11.15–14.15 h	Skupština SDIBR-a	Sala u prizemlju
11.15–14.15 h	Izlaganje radova: PROCESING - od br. 6 do br. 12 II tematske grupe, od br. 37 do br. 43 VI tematske grupe ZAVARIVANJE 2010 - od br. 56 do br. 74 III tematske grupe	Kongresna sala
14.15–16.00 h	Pauza	
16.00–18.00 h	Predstavljanje sponzora: 1. ELIMP, Hrvatska 2. DUCTIL, AIR LIQUIDE WELDING, Rumunija 3. BACCO, Beograd Izlaganje radova: PROCESING 2010 - od br. 21 do br. 27 IV tematske grupe ZAVARIVANJE 2010 - od br. 49 do br. 55 II tematske grupe	Kongresna sala
18.15–19.30 h	PROCESING 2010 - Konferencija Društva za procesnu tehniku	Sala na I spratu
18.15–20.00 h	ZAVARIVANJE 2010 - Skupština DUZS-a	Sala u prizemlju
21.00 h	SVEČANA VEČERA	Restoran hotela

PETAK, 4. jun 2010.

9.00–12.00 h	Izlaganje radova: PROCESING 2010 - od br. 13 do br. 20 III tematske grupe i od br. 28 do br. 36 V tematske grupe ZAVARIVANJE 2010 - od br. 44 do br. 48 I tematske grupe IBR 2010 - od br. 82 do br. 86 I tematske grupe Predstavljanje sponzora: 1. REMMING, Novi Sad 2. SGS, Beograd 3. LINDE GAS SRBIJA, Industrija gasova, Bečej	Kongresna sala
12.00–12.15 h	Pauza	
12.15–13.00 h	Okrugli sto: PROCESING 2010 - Pravilnik o tehničkim uslovima za obavljanje delatnosti punjenja, transporta i distribucije boca sa tehničkim gasovima	Sala u prizemlju
12.15–13.00 h	Okrugli sto: IBR 2010 - Kvalifikacija i sertifikacija osoblja za IBR	Sala na I spratu
13.00–13.30 h	PROCESING 2010, ZAVARIVANJE 2010 i IBR 2010: Završna reč, kraj rada kongresa	Kongresna sala

Radovi navedeni u programu pod rednim brojevima 31, 41, 66, 69, 80 i 90 biće prezentirani na posterima sve vreme trajanja kongresa odnosno savetovanja, u holu hotela gde se održava izložba sponzora.

SADRŽAJ

RADOVI NA PROCESINGU 2010

I. Tehnička regulativa i sistemi kvaliteta

1. DOKUMENTACIJA I UPRAVLJANJE DOKUMENTACIJOM
- ŠTA JE TO?
Branislav Kovačević, Darko Nikolić i Vojislav Ibrahimović
2. UPOREDNI PREGLED STANDARDA
ZA DEFINISANJE KVALITETA ETANOLA
Marko Jarić, Nikola Budimir,
Branislav Jaćimović i Srbislav Genić
3. NOVI PRISTUP I GLOBALNI PRISTUP - OSNOVNA
KONCEPTUALNA REŠENJA
Zoran Bakić
4. MARKETING DANAŠNJE PROCESNE OPREME
Zoran Radojević
5. PRIMENA STANDARDA I TEHNIČKIH PROPISA PRI
TRANSPORTU ROBE KONTEJNERIMA
S. Nedeljković, A. Milošević i A. Boričić

II. Procesne tehnologije

6. REOKSIDACIJA NISKOLEGIRANIH ČELIKA KAO
FUNKCIJA TEMPERATURE LIVENJA
Ž. Radović, N. Jauković i M. Lalović
7. REGENERACIJA HDS (HIDRODESULFURIZACIJA)
KATALIZATORA POMOĆU INJEKTIRANJA KISEONIKA
U STRUJU AZOTA KOJI SE RECIRKULIŠE KROZ HDS
REAKTOR
Zoran Jurić, Stevan Ajdinović, Dušan Janošev i Sava Pavlović
8. PRIMENA KISEONIKA ZA TOPLJENJE SEKUNDARNOG
OLOVA U ROTACIONIM PEĆIMA
Nikola Pavlović
9. TRETMAN SIROVE PITKE VODE SA ČISTIM
KISEONIKOM (primer Fabrike vode u Apatinu)
Srđan Krstić, Jovan Lemić i Petar Bjegović
10. PRIMENA TEČNOG AZOTA ZA KRIOGENO MLEVENJE I
DOBIJANJE FINOG PRAHA OD GUME, TERMOPLASTIKE,
ZAČINA ILI FARMACEUTSKIH PROIZVODA
Miloš Kostić
11. PROMJENA SAVOJNE ČVRSTOĆE POLIPROPILENA
PUNJENOG STAKLENIM PRAHOM
Zoran Janjuš, Aleksandar Petrović, Aleksandar Jovović,
Radica Prokić-Cvetković i Predrag Ilić

12. UREĐAJ ZA UPRAVLJANJE PILANOM
Stanko Stankov, Zoran Ičić i Saša Nikolić

III. Projektovanje, izgradnja, eksploatacija i održavanje procesnih postrojenja

13. DIMENZIONISANJE PRSTENASTIH
VODOVODNIH MREŽA
K. Popovski, V. Mijakovski i M. Petkovski
14. EXPERIMENTAL STUDY CONCERNING THE
DEGRADATION PROCESS IN CASE OF USING A CEREAL
RECIPE DURING THE ANAEROBIC FERMENTATION
Adrian-Eugen Cioabla, Ioana Ionel & Dorin Lelea
15. PREDLOG UNAPREĐENJA SISTEMA ZA KONZERVACIJU
KOTLOVSKIH POSTROJENJA U TERMOELEKTRANAMA
Dejan Radić, Miroslav Stanojević, Milorad Jovanović,
Aleksandar Jovović i Marko Obradović
16. PRIMENA SAVREMENIH KONSTRUKCIJA ISPUNA U
HIPERBOLOIDNOJ RASHLADNOJ KULI
Dušica Golubović, Dušan Golubović i Srđan Vasković
17. PRIMER SISTEMA ZA MERENJE TOPLOTNE ENERGIJE
KOJA SE DISTRIBUIRA VODENOM PAROM PREMA
POTROŠAČIMA IZ TOPLANE U VREOCIMA
Sanin Mehmedagić
18. UREĐAJ ZA KATODNU ZAŠTITU POSTROJENJA OD
KOROZIJE
Stanko Stankov, Zoran Ičić i Saša Nikolić
19. ODRŽAVANJE MODERNIZOVANIH PREDAJNIH STANICA
U SISTEMIMA DALJINSKOG GREJANJA
Radovan Talić i Vladimir Radulović
20. SISTEMI ZA MERENJE MASENOG PROTOKA I FINOĆE
MLEVENJA UGLJENOG PRAHA KOJI SE KORISTI U
KOTLOVIMA TERMOELEKTRANA
Mileta Ružičić i Milorad Stanisavljević

IV. Konstruisanje, izrada, ispitivanje i montaža procesne opreme

21. REZULTATI ISPITIVANJA SAGOREVANJA BALIRANE
BIOMASE NA KOTLU TOPLOTNE SNAGE 70 kW
Branislav S. Repić, Dragoljub V. Dakić,
Dejan M. Đurović i Aleksandar M. Erić
22. BEZBEDNOST RADA I RADNE SREDINE U SKLADIŠTIMA
B. Cvetanović, M. Ristić i D. Radosavljević
23. IZRADA I KARAKTERISTIKE POROZNIH FILTERSKIH
CEVI OD AKTIVNOG UGLJA
O. Dimčić, D. Radić, B. Dimčić i D. Božić
24. KONTROLISANJE IZRADE NADZEMNOG
REZERVOARA ZA SKLADIŠTENJE TEČNOG
NAFTNOG GASA ZAPREMINE 250 m³
Zoran Anđelković i Ivan Radetić

25. ANALIZA NAPONA I DEFORMACIJA
RAVNIH ZAPORNIH VENTILA
M. Milošević, A. Petrović, N. Mitrović i N. Momčilović
26. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE OTPORNOSTI
NA KOROZIJU I LOM ZAVARENIH CEVI
ZA NAFTNE BUŠOTINE
Miodrag Arsić, Živče Šarkoćević, Marko Rakin,
Zoran Odanović i Aleksandar Veljović
27. ANALIZA ČVRSTOĆE MULTIMEDIJALNOG FILTERA
Miroslav M. Živković, Snežana D. Vulović,
Rodoljub S. Vujanac i Bratislav B. Milanović

V. Inženjerstvo životne sredine i održivi razvoj.

Zaštita životne sredine, zaštita radne sredine, racionalno korišćenje energije, obnovljivi izvori energije

28. UTICAJ OBOGAĆIVANJA I PREDGRIJAVANJA
VAZDUHA NA TEMPERATURU I SASTAV PRODUKATA
SAGORIJEVANJA TEČNOG GORIVA
M. Lalović i Ž. Radović
29. TRETMAN ALKALNIH OTPADNIH VODA
SA UGLJEN-DIOKSIDOM
(PRIMER PUNIONICE PIĆA TERRA PRODUCTION)
Ana Đorović
30. URBAN TRANSPORT IN TIMISOARA AND CITY
DEVELOPMENT
Luisa Izabel Dungan, Ioana Ionel, Adrian-Eugen Cioablă
31. MODELIRANJE UTICAJA TEMPERATURSKIH USLOVA
SAGOREVANJA NA EMISIJU ŠTETNIH PRODUKATA
SAGOREVANJA BIOMASE
Branislav S. Repić, Stevan Đ. Nemoda,
Ana D. Radojević i Andrijana D. Stojanović
32. PRORAČUN POSTROJENJA ZA SMANJENJE EMISIJE
AZOTNIH OKSIDA POSTUPKOM SNCR
Marko Obradović, Dejan Radić, Aleksandar Jovović,
Miroslav Stanojević, Dušan Todorović i Ivan Ćosić
33. RAZMATRANJE MOGUĆNOSTI UPOTREBE
OTPADNOG MULJA U INDUSTRIJI CEMENTA
S. Simić i M. Stanojević
34. MOŽE LI ENERGIJA VETRA BITI KONKURENT OSTALIM
OBLICIMA ENERGIJE I GDE SE ONA MOŽE PRIMENITI?
Dragica Milenković i Šefik M. Bajmak
35. PRIMENA PREČIŠĆAVANJA OTPADNIH VODA
FLOTACIJOM U DESTILERIJI ZA PROIZVODNJU
RAFINISANOG ALKOHOLA
Dimitrije Đorđević, Branislav Jaćimović i Srbislav Genić
36. TEHNIČKO-EKONOMSKI ASPEKTI KORIŠĆENJA
SOLARNE ENERGIJE ZA GREJANJE SANITARNE VODE
U SISTEMU SPECIJALNIH BOLNICA SRBIJE
A. Boričić, D. Blagojević, S. Mitić i N. Minčić

VI. Osnovne operacije, aparati i mašine u procesnoj industriji

37. BRZINA TEČNOSTI PRI INVERZNOJ FLUIDIZACIJI U BARBOTAŽNOJ KOLONI SA KONCENTRIČNOM CEVI
Dragica Z. Jovičević, Ivana M. Šijački,
Milenko S. Tokić i Predrag S. Kojić
38. KORELISANJE PRELAZA TOPLOTE PRI KONTAKTNOJ KONDENZACIJI NA SEGMENTNIM PODOVIMA
Branislav M. Jaćimović, Srbislav B. Genić i Ljubiša A. Vladić
39. FORMIRANJE VRTLOGA UNUTAR DUBOKIH CAVITY (ŠUPLJINA) PRIMENOM LATTICE BOLTZMANN METODE
Nataša Lj. Lukić, Jelena Đ. Marković,
Predrag M. Tekić i Jelena B. Rađenović
40. ANALIZA STRUJANJA FLUIDA I FORMIRANJA VRTLOGA IZMEĐU DVE NERAVNE PLOČE PRIMENOM NUMERIČKIH METODA
Jelena Đ. Marković, Nataša Lj. Lukić,
Predrag M. Tekić i Jelena B. Rađenović
41. UTICAJ DODATKA ALKOHOLA I TIPA DISTRIBUTORA NA HIDRODINAMIKU BARBOTAŽNE KOLONE SA KONCENTRIČNOM CEVI
Milenko S. Tokić, Predrag S. Kojić,
Ivana M. Šijački i Dragica Z. Jovičević
42. ANALIZA SLIČNOSTI PROCESA IZMENA TOPLOTE I MASE U MAGLENOJ KOMORI KLIMATIZACIONOG UREĐAJA
Šefik M. Bajamak
43. TESTIRANJE GASNO NEPROPUSNOG OBJEKTA PRIMENOM DIFUZIONOG - EFUZIONOG MATEMATIČKOG MODELA ZA ODREĐIVANJE KOEFICIJENTA PROPUŠTANJA D_u
Slobodan Rackov i Slobodan Ristić

RADOVI NA ZAVARIVANJU 2010

I. Konvencionalni i nekonvencionalni postupci zavarivanja

44. ZAVARIVANJA I REZANJE METALA PODVODNOM TEHNOLOGIJOM
S. Ju. Maksimov, V. S. But, O. I. Oleinik i D. Bajić
45. ELEKTROLUČNO ZAVARIVANJE POPUNJAVAJUĆOM ELEKTRODOM
G. V. Kuzmenko i D. Bajić
46. TEHNOLOGIJA ORBITALNOG ZAVARIVANJA CJEVOVODA PRIMJENOM AKTIVIRAJUĆEG TOPITELJA
S. Ju. Savitsky, D. Bajić, M. M. Savitsky,
V. N. Vashchenko, A. F. Lupan i Ju. M. Skrabaliuk

47. UTICAJ PARAMETARA FSW POSTUPKA ZAVARIVANJA NA KVALITET ZAVARENOG SPOJA ALUMINIJUMSKE LEGURE 5052
Miroslav Mijajlović, Aleksandar Živković, Dragan Milčić i Igor Radisavljević
48. KOMPARACIJA METODA KONAČNIH ELEMENATA I METODA KONAČNIH VOLUMENA NA PROBLEMU JEDNODIMENZIONOG NESTACIONARNOG PRENOSA TOPLOTE
E. Džih, S. Isić i S. Pašić

II. Osnovni, dodatni i pomoćni materijali

49. ANALIZA KVALITETA ZAVARENOG SPOJA ČELIKA X10CrNiMoTi18.10 DOBIJENOG ZAVARIVANJEM ELEKTRODOM PIVA 18/8/6B
Ž. Blečić, A. Vukosavljević, D. Blečić, V. Grabulov i I. Nikolić
50. ZAVARIVANJE I NAVARIVANJE POD PRAŠKOM - NOVOSTI
Jožica Cankar, Marjan Bregant i Mojca Šolar
51. KISELA ILI RUTILNA OBLOGA NA ELEKRODI ZA REL POSTUPAK VARENJA?
Z. Karastojković, Z. Kovačević, Z. Janjušević i N. Bajić
52. OPTIMIZACIJA REŽIMA ZAVARIVANJA KORIŠĆENJEM TOPITELJA
D. Bajić, M. M. Savitsky i Ž. Blečić
53. STRUKTURA METALA ŠAVA I ZUTA DOBIJENA SA PUNJENOM ŽICOM MAG POSTUPKOM
Nikola Bajić, Vera Šijački-Žeravčić, Marko Rakin i Slobodan Stojadinović
54. TEORIJSKO-EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE BRZINE HLAĐENJA PRI NAVARIVANJU KOVAČKIH ALATA I UTICAJ TE BRZINE NA KORISNE OSOBINE NAVARIVANIH ALATA
Vukić Lazić, Milorad Jovanović, Ružica Nikolić, Srbislav Aleksandrović, Božidar Krstić i Milan Mutavdžić
55. OCENA ZAVARLJIVOSTI I IZBOR NAJPOVOLJNIJEG POSTUPKA I TEHNOLOGIJE ZAVARIVANJA ČELIKA POVIŠENE JAČINE WELDOX 700
Milorad Jovanović, Vukić Lazić, Petar Marinković, Branislav Nedeljković, Srbislav Aleksandrović i Dragan Milosavljević

III. Integritet konstrukcija i osiguranje kvaliteta

56. TRIBOLOŠKE KARAKTERISTIKE I MIKROSTRUKTURNA SVOJSTVA NAVARENIH SLOJEVA SA NAJMANJOM I NAJVEĆOM OTPORNOŠĆU NA HABANJE
M. Perović, D. Veljić i A. Živković

57. NUMERIČKA ANALIZA ZAVARENIH SPOJEVA
VAGONSKIH KONSTRUKCIJA
M. Živković, V. Milovanović, D. Rakić i S. Vulović
58. UTICAJ PROCESA TERMIČKE OBRADJE I TOPLE
PLASTIČNE DEFORMACIJE NA ODABRANE OSOBINE
ZAVARENIH SPOJEVA RAZNORODNIH ČELIKA
R. Ćirić
59. PROCENA PREOSTALOG VEKA TRAJANJA
BUBNJA KOTLA SA ASPEKTA MIKROSTRUKTURE
ZAVARENIH SPOJEVA
Z. Kovačević, Z. Karastojković, Z. Odanović i R. Popović
60. UTICAJ TEMPERATURE PREDGREVANJA NA
MEHANIČKE KARAKTERISTIKE SUČEONO
ZAVAREN OG SPOJA NODULARNOG LIVA
Lazar Brestovački, Bela Sabo i Katarina Gerić
61. REPERATURA ZAVARIVANJEM SLOMLJENOG VRATILA
SA KONIČNIM ZUPČANIKOM
Željko Šteković i Ljubomir Šuša
62. MONTAŽA TLAČNOG CJEVOVODA
HE MOSTARSKO BLATO
Angela Topić, Mehmed Behmen i Marija Grbeš
63. PREDVIĐANJE OPTIMALNIH PARAMETARA
INTERVENTNOG REPARATURN OG ZAVARIVANJA
ČELIKA 13CrMo 4-5 ANALITIČKIM METODAMA
B. Katavić i B. Jegdić, Z. Odanović, N. Hut,
M. Mladenović, D. Jaković i M. Ristivojević
64. ISKUSTVA U SANACIJI SFERNOG REZERVOARA
ZA SKLADIŠTENJE TNG
Dragan Mitić, Boško Aleksić i Vlasćislav Bađura
65. UTICAJ REZANJA TEHNOLOGIJOM PLAZME
NA HRAPAVOST I MIKROSTRUKTURU
M. Edelinski, B. Sabo, K. Gerić i J. Dakić
66. KARAKTERIZACIJA ZAVARENIH SPOJEVA NA
VISOKOČVRSTOM KONSTRUKCIONOM ČELIKU S690QL
I. Hajro i O. Pašić i Z. Burzić
67. REGENERACIJA SEGMENTATA NA PAPUČAMA
TRANSPORTA BAGERA U RB KOLUBARA
Dragana Matijašević
68. ISPITIVANJE PLOČASTIH EPRUVETA SA PRSLINOM
Mersida Manjgo, Miron Torlo i Zijah Burzić
69. SANACIJA PUKOTINA NA KONSTRUKCIJI
PLAŠTA MLINA CEMENTA U PODRUČJU
OKO REVIZIONOG OTVORA
S. Avdić i E. Bikodušić
70. ISPITIVANJE TVRDOĆE ZAVAREN OG
SKRETNIČKOG SRCA
V. Đokić i S. Stevanović

71. SANACIJA KAVITACIONIH OŠTEĆENJA
NA KAPI RADNOG KOLA KAPLANOVE TURBINE
REPARATURNIM NAVARIVANJEM
Mustafa Šehić i Adis Bubalo
72. UTICAJ PARAMETARA ZAVARIVANJA NA POJAVU
NAPONA I DEFORMACIJA PRI ZAVARIVANJU
VISOKOLEGIRANIH ČELIKA
Mahira Kajtaz i Sead Avdić
73. TEHNOLOGIJA REPARATURNOG ZAVARIVANJA
VRATILA TURBINE NA HIDROELEKTRANI ĐERDAP BEZ
DEMONTAŽE AGREGATA
Brane Vistać, Miodrag Arsić, Vujadin Aleksić,
Mladen Mladenović, Dragan Jaković i Aleksandar Đorđević
74. REPARATURA TURBINSKOG VRATILA A8 NA HE
ĐERDAP II
Nemanja Gostović, Aleksandar Đorđević,
Brane Vistać, Miljan Jelić i Mile Bokić

IV. Tehnička regulativa, obrazovanje, ekologija i zaštita

75. VIRTUELNO ZAVARIVANJE - VELIKI POMAK U
EDUKACIJI ZAVARIVAČA
Miloš Jovanović i Peter Šprajc
76. INFORMACIONO MODELIRANJE ZAPISA O
NEUSAGLAŠENOSTI I KOREKTIVNIM MERAMA
ERWIN CASE ALATOM
Dušan Jovanić, Alempije Veljović i Zoltan Jonaš
77. RAZVOJ STANDARDA „KOORDINACIJA U ZAVARIVANJU“
OD EN 719:1994 DO EN ISO 14731:2006.
Zoltan Jonaš i Dušan Jovanić
78. UNAPREĐENJE SISTEMA MENADŽMENTA
SERTIFIKOVANOG PREMA SRPS ISO 9001
U CILJU SERTIFIKACIJE PREMA EN ISO 3834
O. Erić, M. Jelić i G. Šešić
79. NEKI PRISTUPI ZAŠTITI OD KOROZIJE
ČELIČNIH KONSTRUKCIJA
D. Jašović i N. Stojsavljević
80. POSTOJEĆE STANJE STANDARDA U OBLASTI
ZAVARIVANJA U SRBIJI
Aleksić Boško i Vlasćislav Bađura

RADOVI NA IBR-u 2010

I. Primena IBR-A, dijagnostika i inspekcija

81. MESTO I ULOGA METODA IBR-a U PRIJEMNOM
KONTROLISANJU ODLIVAKA - DELOVA ZA
TERMOENERGETSKA POSTROJENJA
Nadežda Filipović

82. UT - OSOVINA RADNOG TOČKA BAGERA -
TEHNIKA ČEONOG PRETRAŽIVANJA
Dragan Karišić
83. EKSPERIMENTALNE METODE ZA OTKRIVANJE I
ANALIZU PRSLINE U MAŠINSKIM KONSTRUKCIJAMA
Andreja Ilić i Danica Josifović
84. PHASED ARRAY ULTRASONIC TESTING -
PRACTICAL EXPERIENCE
U. Zupanc
85. OBLICI KOROZIJE U HEMIJSKOJ INDUSTRIJI
Dahna Stanković
86. ANALIZA UZROKA OTKAZA MOTORA R25-300 NA
AVIONIMA TIPA MIG-21 BIS USLED DEGRAGACIJE
UPRAVLJAČKIH PODSKLOPOVA MEMBRANA I
MANŽETNI U PUMPAMA REGULATORIMA OSNOVNOG I
FORSAŽNOG GORIVA
Emil Banjac, Elez Zoran i Dubravka Banjac

II. Ekologija - praksa

87. PRIMENA NEJONIZUJUĆIH ZRAČENJA
U INDUSTRIJI I MERE ZAŠTITE
B. Vilević i Đ. Čašić
88. RADIOGRAFSKI UREĐAJI GAMMAMAT SE
I GAMMAVOLT SU 50 SA IZVOROM ⁷⁵Se
I ZAŠTITA OD ZRAČENJA
Đ. Petrović, R. Dobrijević i Đ. Čašić

III. IBR standardizacija i sertifikacija

89. METODA MAGNETNE MEMORIJE METALA
U PRIMENI - DIJAGNOSTIKA ZAVARENIH
SPOJEVA - STANJE STANDARDA
Dragoljub B. Radojičić i Radoljub V. Došić
90. STANDARDI U OBLASTI ISPITIVANJA
METODAMA BEZ RAZARANJA
Boško Aleksić i Jano Kurai

IV. Oprema, razvoj, nove metode IBR-a

91. METODA MAGNETNOG PAMĆENJA METALA (MMM)
I PRAKTIČNA PRIMENA
G. Sofronić, P. Stefanović i M. Milić
92. KONTROLA KVALITETA ZAVARIVANJA
NA DIJELU REGIONALNOG VODOVODA
SISTEMA CRNOGORSKO PRIMORJE - PODVODNA
DIONICA NA SKADARSKOM JEZERU
Špiro Ivošević i Nikola Ivošević
93. KONTROLA DIMENZIONE STABILNOSTI
OPTIČKIM MERNIM SISTEMIMA
Milan Blagojević, Dragan Rakić,
Miroslav Živković i Zoran Bogdanović

94. MONITORING I OSCILOGRAFIŠANJE RADNIH
PARAMETARA TURBOMLAZNIH MOTORA I
STACIONARNIH GASNIH TURBINA PRIMENOM
SAVREMENIH AKVIZICIONIH PAKETA
Emil Banjac, Srđan Damjanović i Darko Tumanov
95. SPEKTRALNA ANALIZA VIBRACIJA TURBOMLAZNIH
MOTORA I STACIONARNIH GASNIH TURBINA
Emil Banjac, Maja Vojvodić,
Vlastimir Gluhović i Dubravka Banjac

**Prednacrt Pravilnika o tehničkim uslovima
za obavljanje delatnosti punjenja,
transporta, skladištenja i distribucije
boca sa tehničkim gasovima**

Oglasni deo

UTICAJ PARAMETARA FSW POSTUPKA ZAVARIVANJA NA KVALITET ZAVAREN OG SPOJA ALUMINIJUMSKE LEGURE 5052

INFLUENCE OF SOME FRICTION STIR WELDING PROCESS PARAMETERS ON AMOUNT OF HEAT GENERATED DURING THE WELDING PROCESS

MIROSLAV MIJAJLOVIĆ,
 MAŠINSKI FAKULTET, NIŠ,
 ALEKSANDAR ŽIVKOVIĆ,
 GOŠA FOM, SMEDEREVSKA PALANKA,
 DRAGAN MILČIĆ,
 MAŠINSKI FAKULTET, NIŠ,
 IGOR RADISAVLJEVIĆ,
 VOJNOTEHNIČKI INSTITUT, BEOGRAD

Postupak zavarivanja FSW (Friction Stir Welding) spada u grupu nekonvencionalnih metoda zavarivanja – zavarivanja bez dodatnog materijala. Budući da se postupak FSW odvija u čvrstom stanju, njime je moguće zavariti materijale koji se teško zavaruju konvencionalnim postupcima zavarivanja sa topljenjem. Primenom ovog postupka izbegavaju se pojave toplih prslina i poroznosti, a obezbeđuje dobra geometrijska stabilnost zavara. Generisanje toplote neophodne za zavarivanje i kvalitet zavarenog spoja zavise od velikog broja parametara, od kojih tehnološki parametri samog procesa zavarivanja (brzina rotacije i brzina zavarivanja) i geometrija alata imaju najveći uticaj. U radu su prikazani teorijski aspekti uticaja ovih parametara na količinu generisane toplote i rezultati eksperimentalnog zavarivanja legure aluminijuma 5052-H32.

Ključne reči: zavarivanje trenjem alatom; generisanje toplote; parametri zavarivanja

Friction Stir Welding (FSW) is an unconventional welding method – method without filler metal. Since FSW is a solid state welding method, the application of FSW is suitable on materials that are not weldable with conventional welding procedures. FSW enables the avoidance of hot cracks in welds and adequate geometrical stability. Generated heat during FSW and weld quality are direct products of numerous parameters, but, the most important are technological parameters of the process and geometry of the welding tool. Paper gives an overview of some parameters on heat generation and weld quality at FSW, during welding 5052-H32 Al alloy.

Key words: friction stir welding; heat generation; welding parameters

1. UVOD

Postupak zavarivanja trenjem alatom (FSW) razrađen je i patentiran od strane britanskog instituta za zavarivanje (TWI) 1991.g. Proces je sistematski razvijen u cilju zavarivanja različitih legura aluminijuma. Danas je ovaj postupak prerastao u rutinsku tehniku spajanja aluminijumskih komponenti, dok je njegova primena u spajanju različitih materijala (istorodnih i raznorodnih) takođe u usponu ali se sporije razvija. Sam proces omogućava visok stepen automatizacije.

Formiranje zavarenog spoja odvija se u čvrstoj fazi, pomoću specijalnog alata koji generiše toplotu potrebnu za formiranje spoja. To znači da se generisana toplota dobija na posredan način, za

razliku od klasičnog postupka zavarivanja trenjem, gde je ona dobijena direktnim kontaktom elemenata koji se zavaruju.

Specifična karakteristika FSW procesa je da je prenos toplote potpomognut lokalnim tečenjem materijala u blizini alata. Prenos toplote i mase zavisi od osobina materijala koji se zavaruju kao i od parametara zavarivanja tj. sile pritiska alata na radni komad, brzine rotacije, brzine zavarivanja kao i geometrije alata.

Teorijska razmatranja imala su za cilj da daju uvid u zakonitosti i osobenosti generisanja toplote tokom FSW postupka kao i uticaj tehnoloških i geometrijskih parametara na količinu generisane toplote.

Osnovna ideja eksperimentalnog rada je bila varirati geometrijske parametre alata i tehnološke parametre postupka (broj obrtaja alata i posmak alata) sa ciljem dobijanja kvalitetnog zavarenog spoja i oceniti njihov uticaj na kvalitet spoja.

2. GENERISANJE TOPLOTE

Zavarivanje FSW postupkom je postupak dobijanja zavarenog spoja u čvrstoj fazi, odnosno to je postupak zavarivanja bez dodatnog materijala pri čemu ne dolazi do topljenja osnovnog materijala. Tokom FSW postupka i alat i osnovni materijal ostaju u čvrstom stanju, s tim da se u zoni zavarivanja osnovni materijal nalazi u blago razmekšanom, „testastom“ stanju, što je posledica generisane toplote.

Tokom FSW postupka alat i osnovni materijal se nalaze u relativnom kretanju jedan u odnosu na drugi. Alat tokom zavarivanja rotira oko svoje ose konstantnom ugaonom brzinom ω , pri čemu se tokom pojedinih faza postupka alat i osnovni materijal translatorno kreću jedan u odnosu na drugi. Alat izvodi glavno, obrtno kretanje, dok pomoćno translatorno kretanje mogu da izvode ili osnovni materijal ili alat ili osnovni materijal i alat istovremeno. Najčešća je varijanta da osnovni materijal vrši translatorno kretanje, a ako se zavarivanje vrši na specijalizovanoj mašini za FSW moguće je da alat istovremeno vrši i obrtno i translatorno kretanje, pri čemu osnovni materijal može ili da miruje ili da se translatorno kreće.

Zavarivanje počinje tako što alat usled dejstva pritiskne sile prodire u osnovni materijal. Usled kontakta između osnovnog materijala i rotirajućeg alata, mehanička energija alata se najvećim delom transformiše u toplotnu energiju što za posledicu ima zagrevanje i alata i osnovnog materijala. Alat je izrađen od materijala koji ima znatno višu tačku topljenja i veću čvrstoću, pa je postojaniji od osnovnog metala. Termomehaničke promene alata pri procesu zavarivanja su zanemarljive, što nije slučaj kod osnovnog metala. Osnovni metal omekšava i postaje deformabilniji a alat u zahvatu ga deformiše, meša i formira zavareni spoj.

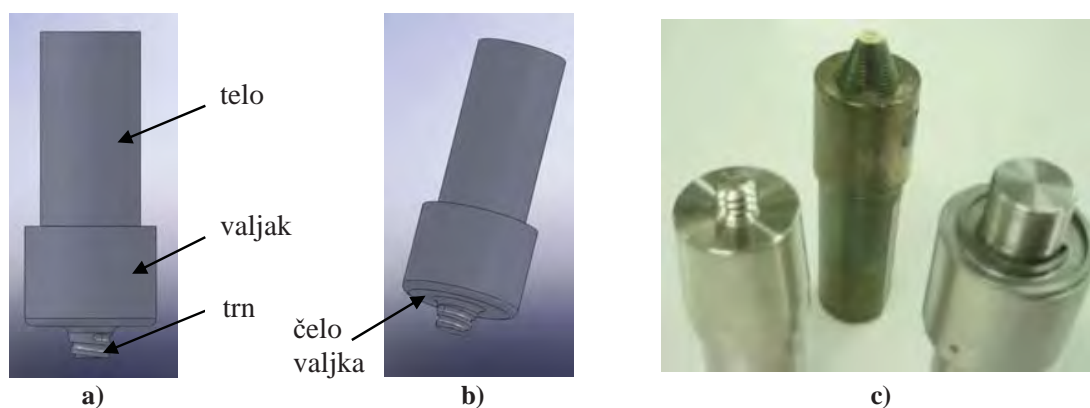
I kod FSW postupka važi princip minimalno potrebne ali dovoljne dovedene količine energije, kako bi se zavarivanje izvelo sa minimalnim promenama u zavarenom spoju i zoni uticaja toplote [1]. Kod FSW postupka veoma je teško odrediti kolika je to minimalno potrebna količina dovedene energije, međutim kao apsolutno tačno, može se tvrditi da količina energije koja se unese u zavar direktno zavisi od:

- 1) Mehaničkih karakteristika materijala alata i osnovnog metala,
- 2) Geometrijskih parametara alata i
- 3) Tehnoloških parametara samog procesa zavarivanja.

Mehaničke karakteristike materijala su uglavnom potpuno poznate veličine te je ova grupacija parametara manje interesantna za razmatranje sa aspekta sagledavanja samog postupka FSW. Ovu tvrdnju treba samo uslovno prihvatiti kao tačna, jer promene koje nastaju u materijalu prilikom FSW postupka mogu biti znatne. Međutim, zarad lakšeg sagledavanja samog postupka i lakše analize, biće razmatrani samo najbitniji parametri koji direktno utiču na postupak FSW.

3. GEOMETRIJA ALATA. TEHNOLOŠKI PARAMETRI POSTUPKA

Formiranje zavarenog spoja FSW postupkom ostvaruje se specijalnim alatom cilindričnog oblika, koji služi za generisanje toplote i mehaničko mešanje osnovnog materijala. Alat se sastoji iz tela, valjka i trna (slika 1a), pri čemu se prečnici ovih delova razlikuju. Radni deo alata predstavljaju čelo valjka i trn (slika 1b). Trn alata prvenstveno ima ulogu da ostvari mehaničko mešanje materijala u omekšanoj zoni i najčešće ima cilindrični oblik, mada postoje i drugačije profilisani trnovi. Konfiguracija trna određuje tok materijala pri mehaničkom mešanju tokom procesa zavarivanja. Čelo valjka uglavnom ima ravnu površinu ali može biti i sa profilisanom površinom (slika 1c). Alati sa profilisanim čelom valjka ostvaruju intenzivnije trenje između alata i radnog komada. Profilisana površina čela valjka ima ulogu rezervoara istisnutog omekšalog materijala iznad površine radnog komada, olakšava prenos materijala oko alata i sprečava stanjenje ploče u zoni zavarivanja. U odnosu na površinu radnog komada, osa alata može biti normalna na nju ili odstupati od normale. Zavisno od geometrije alata, tehnoloških parametara procesa, kontaktnog pritiska između alata i ploča, koeficijenta trenja itd., menja se i količina generisane toplote koja je potrebna za formiranje kvalitetnog zavarenog spoja.



Slika 1. Izgled alata za FSW

Osnovni parametri neophodni za formiranje spoja kod FSW postupka su [2]: aksijalna sila, broj obrtaja i translatorska brzina alata. Ovi parametri najviše zavise od termofizičkih svojstava materijala i debljine limova, a njihove optimalne vrednosti se, za sada, određuju isključivo eksperimentalno. Na osnovu parametara procesa, određuju se i odgovarajući geometrijski parametri alata (prečnik trna i čela valjka).

Aksijalna sila predstavlja silu kojom alat deluje prilikom prodiranja u materijal. Aksijalna sila je najveća u početnom periodu prodiranja trna, a zatim se smanjuje, dostiže minimum na završetku faze prodiranja i ostaje konstantna do kraja zavarivanja. Veličina aksijalne sile zavisi od osobina materijala koji se zavaruju, geometrijskih karakteristika trna i čela valjka, a kreće se do 200 kN.

Broj obrtaja alata n je tokom rada konstantan i koristi se u širokim granicama od 100 do 4000 obr/min. Broj obrtaja definiše veličinu periferne brzine trna i čela valjka (v_{rot}) i ima važnu ulogu u procesu generisanja toplote. Vrednost periferne brzine određuje se u zavisnosti od svojstava materijala koji se zavaruju.

Translatorska brzina je istovremeno i brzina zavarivanja (v_{zav}) i ona zavisi od mehaničkih svojstava i debljine zavarivanog materijala. I ova brzina je tokom zavarivanja konstantna a najčešće se određuje iz odnosa $v_{zav}/\omega R$, gde je v_{zav} – translatorska brzina, R - poluprečnik trna i ω – ugaona brzina

alata. Ovaj odnos je veoma važan i utiče na pojavu grešaka ali pri pravilnom odabiru ovog odnosa dobijaju se kvalitetni zavareni spojevi.

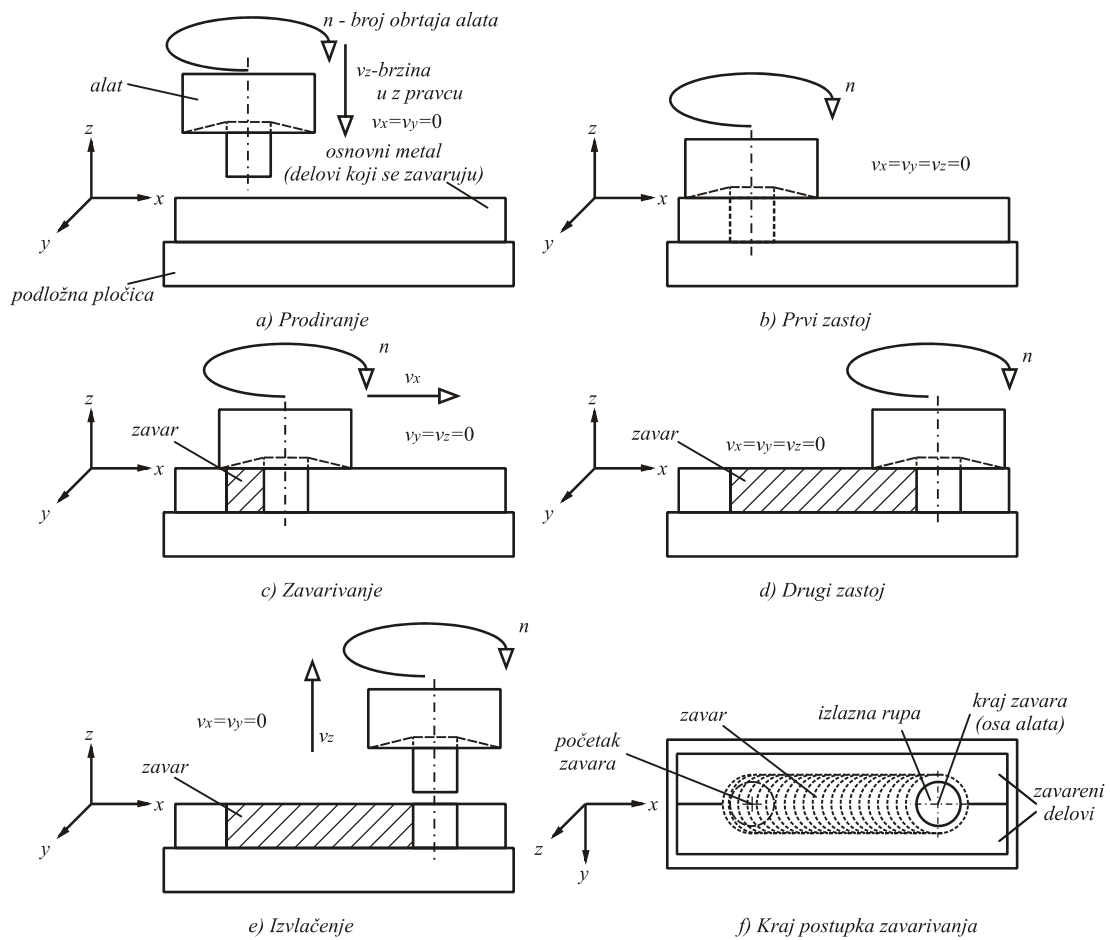
4. ANALITIČKI POSTUPAK ODREĐIVANJA GENERISANE KOLIČINE TOPLOTE

4.1. Faze FSW postupka

Alat i osnovni materijal se nalaze u međusobnom kontaktu i relativnom kretanju tokom čitavog postupka FSW. Međutim, njihov međusobni kontakt, kao i dejstvo alata na osnovni metal nisu istovetni tokom čitavog postupka. Na osnovu geometrijsko–kinematskog uticaja alata na osnovni metal, može postojati pet različitih faza (slika 2) u okviru postupka FSW, s tim da faze 2 i 4 mogu i da izostanu.

- 1) faza prodiranja alata – tokom ove faze trn prodire unutar osnovnog metala na početku linije spoja, usled trenja počinje zagrevanje i omekšavanje osnovnog materijala,
- 2) faza prvog zastoja alata – tokom ove faze trn i čelo valjka, generišu toplotu i vrše zagrevanje osnovnog metala u zoni zavarivanja, odnosno vrše aktivnu pripremu osnovnog metala za obrazovanje šava,
- 3) faza zavarivanja – tokom ove faze, usled translatornog kretanja alata, odvija se formiranje zavarenog spoja,
- 4) faza drugog zastoja alata – tokom ove faze prekida se translatorno kretanje, odnosno završava se formiranje zavarenog spoja,
- 5) faza izvlačenja alata – tokom ove faze se trn izvlači iz osnovnog metala.

Površine koje aktivno učestvuju u stvaranju zavarenog spoja i generišu toplotu su: čelo trna, bok trna i čelo valjka (Slika 3).



Slika 2. Faze FSW postupka

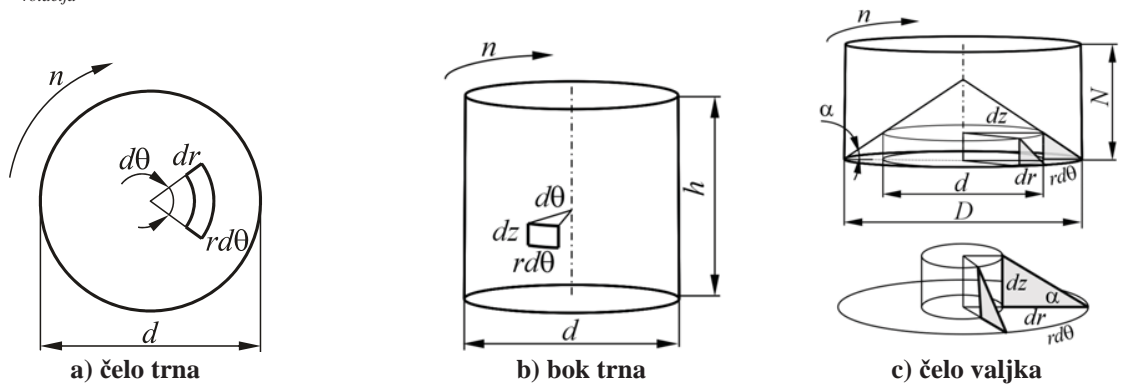
4.2. Opšti analitički izrazi za određivanje generisane toplote

Analizirajući kinetiku procesa, ukupna količina generisane toplote je posledica rotacije i translacije alata:

$$Q_{total} = Q_{rotacija} + Q_{translacija} \text{ [W]}, \quad (1)$$

a pošto se najveći deo mehaničke energije troši na ostvarivanje glavnog kretanja, to će i količina toplotne energije stvorene dejstvom alata biti najveća usled rotacionog kretanja, tj [3-6]:

$$Q_{total} \approx Q_{rotacija} \cdot \quad (2)$$



Slika 3. Aktivne površine alata

U procesu generisanja toplote učestvuju i uključuju se sukcesivno najpre čelo trna, zatim bok trna i na kraju čelo alata. Ukupna količina toplote generisana na čelu trna biće:

$$Q_{pt} = \int_0^{2\pi} \int_0^{d/2} \omega \cdot r^2 \cdot \tau_{cont} \cdot d\theta \cdot dr = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \omega \cdot \tau_{cont} \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^3 \quad (3)$$

Ukupna količina toplote generisana na boku trna biće:

$$Q_{ps} = \int_0^{2\pi} \int_0^h \omega \cdot r^2 \cdot \tau_{cont} \cdot d\theta \cdot dz = 2 \cdot \pi \cdot \omega \cdot \tau_{cont} \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot h \quad (4)$$

Prema tome, ukupna količina toplote generisana na čelu alata, ukoliko na čelu postoji konusna površina, ugla konusa α biće:

$$Q_{st} = \int_0^{2\pi} \int_{d/2}^{D/2} \omega \cdot r^2 \cdot \tau_{cont} \cdot (1 + \tan \alpha) \cdot dr \cdot d\theta = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \omega \cdot \tau_{cont} \cdot \left[\left(\frac{D}{2}\right)^3 - \left(\frac{d}{2}\right)^3 \right] \cdot (1 + \tan \alpha) \quad (5)$$

Međutim, ne učestvuju sve aktivne površine podjednako u generisanju toplote. U zavisnosti od faze u kojoj se nalazi postupak zavarivanja, neke od površina se sukcesivno uključuju ili isključuju iz aktivnog kontakta te se i njihov udeo u ukupnoj količini generisane toplote povećava ili smanjuje.

4.3. Fizički mehanizmi generisanja toplote

Dva fizička procesa dominiraju mehanizmom generisanja toplote pri FSW postupku: deformacija i adhezija. Površinski sloj alata stupa u kontakt sa mekšim i deformabilnijim slojem osnovnog metala, te adhezione sile koje se javljaju između površine alata i osnovnog materijala vezuju tanak sloj osnovnog metala za površinu alata. S druge strane, u osnovnom metalu javlja se otpor dejstvu alata, odnosno deformaciji, pa se javlja klizanje.

Tokom zavarivanja aktivne površine alata se u proces trenja uključuju sukcesivno: najpre se uključuje kružna površina čela trna, zatim bok trna i na kraju čelona površina valjka. Pošto se proces trenja odvija između metalnih tela, prema [7] može se usvojiti da je koeficijent trenja na kontaktu alata i osnovnog metala jednak:

$$\mu = \tau / p \quad (6)$$

gde je τ - tangencijalni napon smicanja mekšeg materijala (ovde je to osnovni metal) i p - kontaktni pritisak (normalni napon na kontaktu alata i osnovnog materijala).

Prema tome, za:

$$1) \text{ slučaj deformacije, kontaktni napon } \tau_{kont} \text{ jednak je } \tau_{kont} = \tau, \quad (7)$$

$$2) \text{ za slučaj adhezije, kontaktni napon } \tau_{kont} \text{ jednak je } \tau_{kont} = \mu \cdot p. \quad (8)$$

Ukupna količina toplote generisana alatom usled deformacije Q_{def} u nekom trenutku vremena t tokom postupka FSW, jednaka je:

$$Q_{def}(t) = Q_{pt}^{def}(t) + Q_{ps}^{def}(t) + Q_{st}^{def}(t) \quad (9)$$

gde je: Q_{pt}^{def} - količina generisane toplote na čelu trna u trenutku t , Q_{ps}^{def} - količina generisane toplote na boku trna u trenutku t , Q_{st}^{def} - količina generisane toplote na čelu alata u trenutku t .

Ukupna količina toplote generisana alatom usled adhezije Q_{adh} u nekom trenutku vremena t tokom postupka FSW, jednaka je:

$$Q_{adh}(t) = Q_{pt}^{adh}(t) + Q_{ps}^{adh}(t) + Q_{st}^{adh}(t) \quad (10)$$

gde je: Q_{pt}^{adh} - količina generisane toplote na čelu trna u trenutku t , Q_{ps}^{adh} - količina generisane toplote na boku trna u trenutku t , Q_{st}^{adh} - količina generisane toplote na čelu alata u trenutku t .

Prema tome, može reći da je ukupna količina generisane toplote funkcija deformacije i adhezije:

$$Q = f(\text{deformacija, adhezija}) \quad (11)$$

Koji je udeo deformacije a koji je udeo klizanja u generisanoj količini toplote Q je veoma teško predvideti. Pojava adhezije i deformacije gotovo da imaju slučajni karakter te se vrlo teško može napisati matematički izraz koji potpuno tačno definiše ovu pojavu. Kao jednostavan vid opisa stanja adhezije i deformacije, uveden je koeficijenta stanja δ , koji je dat kao odnos brzine tečenja osnovnog metala v_{ometal} i obimne brzine alata v_{rot} :

$$\delta = v_{ometal} / v_{rot} \quad (12)$$

Na osnovu brzine kretanja alata v_{alat} i brzine kretanja posmatrane čestice materijala v_{ometal} , može se zaključiti da:

- 1) za slučaj čiste adhezije, gde je $v_{ometal} \approx 0$, koeficijent stanja ima vrednost $\delta=0$,
- 2) za slučaj čiste deformacije, gde je $v_{ometal} \approx v_{rot}$, koeficijent stanja ima vrednost $\delta=1$,
- 3) za slučaj delimičnog klizanja i delimične deformacije, koeficijent stanja ima vrednost $\delta=0+1$.

Prema tome, ako se kaže da je totalna količina generisane toplote usled deformacije jednaka Q_{def} a totalna količina generisane toplote usled adhezije jednaka Q_{adh} , ukupna količina generisane toplote Q je jednaka:

$$Q(t) = \delta \cdot Q_{def}(t) + (1 - \delta) \cdot Q_{adh}(t) \quad (13)$$

5. EKSPERIMENT

Zavarivane su ploče od aluminijumske legure 5052-H32, dimenzija 200×130×6.5mm. U Tabelama 1 i 2 dati su hemijski sastav i mehaničke osobine osnovnog materijala. Za zavarivanje su korišćena dva alata izrađena od alatnog čelika. Geometrija alata br.1 je: prečnik valjka Ø25mm, trn konusnog oblika dužine 6mm sa levom spiralnom zavojnicom nagiba 7° i prečnikom korena 7mm, čelo valjka bez rezervoara sa radijalnim zaobljenjima na prelasku ka telu valjka i korenu trna. Geometrija alata br. 2 je: prečnik valjka - Ø25mm, trn konusnog oblika dužine 6mm sa levom zavojnicom nagiba 10° i prečnikom korena 7mm, čelo valjka sa neprofilisanim rezervoarom i radijalnim zaobljenjima na prelasku ka telu valjka i korenu trna. Bočne površine ploča su mašinski poravnate, priljubljene jedna uz drugu i kruto stegnute za potpornu ploču. Zavarivanje je izvedeno na prilagođenoj glodalici, pri čemu je na svakoj probi ostvarena dužina spoja od oko 150mm. Broj obrtaja alata n (v_{rot}) je variran u granicama od 450 do 1500 obr/min, a brzina zavarivanja (v_{zav}) u granicama od 46 do 380 mm/min, pri čemu se odnos v_{rot} / v_{zav} kretao od 3,16 do 32,60. Nagib alata iznosio je 1° i držan je konstantnim. Optimalni rezultati ostvareni su pri odnosu $v_{rot} / v_{zav} = 6,45$ do 8,22.

Tabela 1. Hemijski sastav osnovnog materijala (Al legura 5052)

Mg	Si	Cu	Fe	Mn	Zn	Cr
2,25	0,12	0,02	0,27	0,12	0,03	0,2

Tabela 2. Mehaničke karakteristike legure 5052

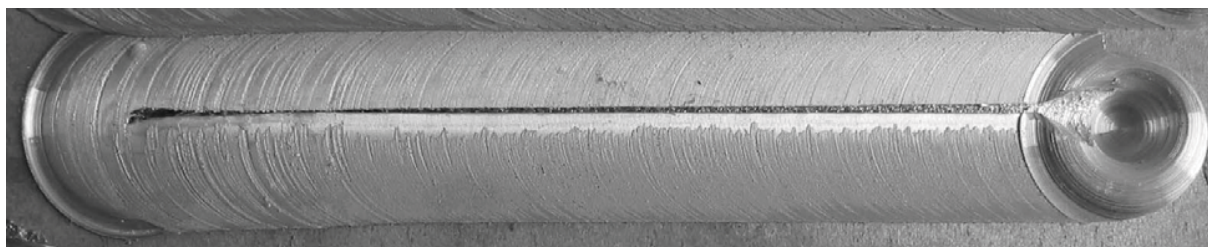
$Rp_{0,2}$ (MPa)	Rm (MPa)	A (%)	Тврдоћа HV3
175	232	21,8	69

Zavareni spojevi su prvo podvrgnuti vizuelnom pregledu u cilju otkrivanja površinskih grešaka. Na spojevima kod kojih nije uočeno prisustvo površinskih grešaka, izvršena su rendgenska ispitivanja u cilju otkrivanja unutrašnjih (zapreminskih) grešaka. Mehanička ispitivanja obavljena su samo na spojevima kod kojih nije uočeno prisustvo površinskih i zapreminskih grešaka. Zatezne karakteristike zavarenog spoja kao celine i mesto preloma, određivani su na epruvetama sa paralelnim bokovima izrađenim prema standardu ASTM E-8M. Epruvete u radnom delu imaju obuhvaćen OM, ZUT, ZTMU (zona termomehaničkog uticaja) i „grumen“ u dužini koja je veća od 4 debljine uzorka.

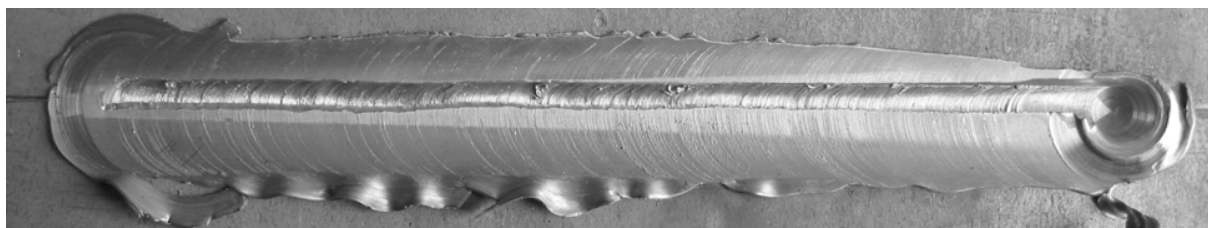
Ovakav način izrade i ispitivanja epruveta omogućava da se odrede karakteristike spoja kao celine i mesto preloma. Ispitivanje tvrdoće kroz presek zavarenog spoja urađeno je metodom Vikersa HV3, prema standardu SRPS C.T3.051.

Rezultati eksperimenta

Pojava greške tipa „tunela“ (slika 4 i 5) na vodećoj strani zavara je posledica nedovoljnog transporta materijala sa prateće ka vodećoj strani zavara oko trna alata, do čega dolazi usled neodgovarajuće (prevelike) brzine zavarivanja.



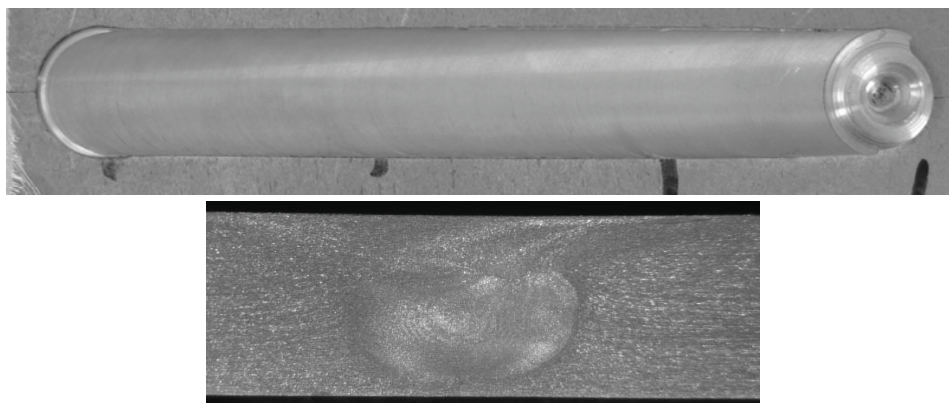
**Slika 4. Izrazito prisustvo tunela – lice spoja zavarenog alatom br. 2,
parametri zavarivanja: $v_{rot} = 1500$ obr/min, $v_{zav} = 300$ mm/min, $v_{rot} / v_{zav} = 5$**



**Slika 5. Izrazito prisustvo tunela – lice spoja zavarenog alatom br. 1,
parametri zavarivanja $v_{rot} = 1500$ obr/min, $v_{zav} = 150$ mm/min, $v_{rot} / v_{zav} = 10$**

Parametri zavarivanja su naročito nepovoljni u slučaju kada je prisustvo tunela bilo primetno i pri vizuelnoj kontroli, odnosno kada je došlo do „otvaranja“ lica šava. Iako je brzina zavarivanja kod spoja zavarenog alatom br. 1 duplo manja nego kod spoja zavarenog alatom br. 2 uočeno je da je tunel „otvoreniji“. Ovakvo ponašanje se objašnjava uticajem geometrije trna alata, jer korak i oblik zavojnice alata br. 1 ne omogućavaju transporta materijala oko trna u potrebnoj meri.

Ispitivanja zatezanjem su pokazala da je najkritičnije mesto zavarenog spoja deo osnovnog materijala koji se nalazi u ZTMU na vodećoj strani zavara, neposredno pored grumena. Karakter preloma kod svih epruveta je isti, a prslina se prostirala duž linije razdvajanja grumena i ZTMU. Potrebno je primetiti, da se greška tipa tunela takođe javlja u ovoj zoni spoja. Na slici 6 je dat izgled dobro ostvarenog zavara sa alatom 2 za odnos $v_{rot} / v_{zav} = 8,22$.



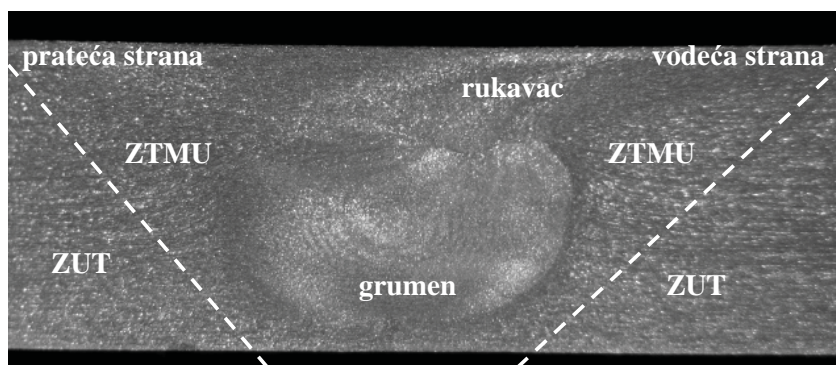
Slika 6. Izgled lica spoja (gore) i makroskopski presek (dole),
spoj zavaren alatom br.2 pri odnosu $v_{rot} / v_{zav} = 8,22$

Rezultati ispitivanja zateznih karakteristika zavarenog spoja kao celine dati su u Tabeli 3.

Tabela 3. Zatezne karakteristike zavarenog spojeva dobijenog pri odnosu $v_{rot} / v_{zav} = 8,22$

v_{rot} / v_{zav}	Rm (MPa)	A (%)	$Rm / Rm_{(OM)}$ (%)	Mesto preloma
8,22	183	9,80	78,9	ZTMU – vodeća strana
	180	7,00	77,6	
	186	11,50	80,1	
	179	7,10	77,1	
	181	7,40	78,0	
sr. vr.	182	8,56	78,4	

Raspodela tvrdoće kroz presek spoja pokazuje da je u zavarenom spoju došlo do pada nivoa tvrdoće u odnosu na osnovni materijal, što je posledica procesa otpuštanja do koga dolazi usled toplote stvorene trenjem. Najveći pad tvrdoće zabeležen je u ZTMU. Raspodela tvrdoće je u saglasnosti sa rezultatima zateznih karakteristika. Makro ispitivanjima poprečnog preseka zavarenih spojeva uočeno je postojanje oblasti grumena, rukavca, ZTMU i ZUT-a, njihov položaj i oblik (slika 7). Jasno izražene linije tečenja materijala ukazuju na karakter i smer toka materijala pri odvijanju procesa zavarivanja.



Slika 7. Delovi spoja zavarenog FSW postupkom

7. ZAKLJUČAK

Količina generisane toplote kod postupka FSW zavisi od mnogobrojnih parametara, kako svojstava materijala, triboloških uslova, tako i od kinematsko-tehnološko-geometrijskih uslova pri kojima se formira zavareni spoj.

Pojava greške tipa „tunela“ je posledica nedovoljnog transporta materijala oko trna sa prateće na vodeću stranu zavara do čega dolazi usled prevelike brzine zavarivanja.

Najkritičnije mesto zavarenog spoja je deo koji se nalazi u ZTMU na vodećoj strani zavara, neposredno uz grumen.

Jasno izražene linije tečenja ukazuju na karakter i smer toka materijala pri odvijanju procesa zavarivanja.

Količina generisane toplote mora biti u odgovarajućim granicama jer usled procesa otpuštanja dolazi do degradacije materijala.

Formiranje kvalitetnog spoja uslovljeno je odgovarajućim odnosom brzine rotacije alata i brzine zavarivanja te je za dobijanje spoja zadovoljavajućeg kvaliteta neophodno usaglasiti zahteve za minimalno potrebnom količinom unete toplote u zavar a pri tom održati odgovarajući odnos brzina.

ZAHVALNOST

Ovom prilikom, autori izražavaju neizmernu zahvalnost prof. dr Miroslavu B. Đurđanoviću, redovnom profesoru u penziji Mašinskog fakulteta u Nišu, na iskrenoj i sveobuhvatnoj pomoći vezanoj, kako za eksperiment, tako i za analitičku formulaciju problema generisanja toplote kod postupka FSW.

LITERATURA

□

Časopis

[1] H Schmidt, J Hattel and J Wert: An analytical model for the heat generation in Friction Stir Welding, *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.* 12 No 1 (January 2004) pp.143-157.

[2] Stamenković D, Đurđanović M, Mitić D.: ZAVARIVANJE POSTUPKOM FSW, "Zavarivanje i zavarene konstrukcije", godina LI, 2006, br. 2, st.59–66.

[3] Song, M., Kovačević, R. (2003) Thermal modeling of friction stir welding in a moving coordinate system and its validation. *International Journal of machine Tools & Manufacture*, 43, 605-615.

[4] H. Schmidt, J. Hattel: Thermal modeling of friction stir welding *Scripta Materialia*, Volume 58, Issue 5, Pages 332-337.

[5] Thomas, WM; Nicholas, ED; Needham, JC; Murch, MG; Temple-Smith, P. Dawes, CJ. *Friction-stir butt welding*, GB Patent No. 9125978.8, International patent application No. PCT/GB92/02203, (1991).

[6] Ulysse, P. (2002) Three-dimensional modeling of the friction stir-welding process. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 42, str. 1549-1557.

Knjiga

[7] Frank Philip Bowden, David Tabor (1982): Friction – An Introduction to Tribology. *Robert E. Krieger Publishing Company, INC, Krieger Drive, Malabar, Florida 32950.*