



**2009  
SOKOBANJA**

## **ZBORNİK RADOVA BOOK OF PAPERS**

**14. SIMPOZIJUM TERMIČARA SRBIJE  
14th Symposium on Thermal Science  
and Engineering of Serbia**

Sokobanja, 13-16.10.2009

Društvo termičara Srbije  
Mašinski fakultet u Nišu

# **ZBORNİK RADOVA**

## **14. Simpozijum termičara Srbije SOKOBANJA, 13-16.10.2009.**

Društvo termičara Srbije  
Mašinski fakultet Niš

ISBN 978-86-80587-96-7

Izdavač:  
Mašinski fakultet Niš

***Međunarodni programski odbor:***

dr Peter Novak, Slovenija  
dr Jordan Hristov, Bugarska  
dr Neven Dujčić, Hrvatska  
dr Vesna Barišić, Finska  
dr Petar Gvero, BiH, Republika Srpska  
dr Maria Ichim, Rumunija

***Programski odbor:***

dr Milan Radovanović  
dr Simeon Oka  
dr Predrag Stefanović  
dr Dragoslava Stojiljković  
dr Goran Jankeš  
dr Maja Đurović Petrović  
dr Vladan Karamarković  
dr Dragoslav Šumarac  
dr Dušan Gvozdenc  
dr Milun Babić  
dr Branislav Savić  
dr Gradimir Ilić  
dr Bratislav Blagojević  
dr Dragoljub Živković

***Počasni odbor:***

dr Miodrag Manić  
dr Zoran Boričić  
dr Dimitrije Voronjec  
dr Slobodan Laković  
dr Nenad Radojković

***Organizacioni odbor:***

dr Mladen Stojiljković  
mr Dejan Mitrović  
mr Mirjana Laković  
dr Branislav Stojanović  
dr Mića Vukić  
dr Jelena Janevski  
dr Gordana Stefanović  
dr Velimir Stefanović  
mr Goran Vučković  
mr Predrag Živković  
mr Dragan Kuštrimović  
Mirko Stojiljković  
Marko Ignjatović  
Jasmina Bogdanović Jovanović

***Predsednik organizacionog odbora***

*dr Mladen Stojiljković*

# 14. Simpozijum termičara Srbije

pod nazivom

***"Energija, ekologija, efikasnost"***

u organizaciji

**Društva termičara Srbije i  
Mašinskog fakulteta u Nišu**  
pod pokroviteljstvom

Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj  
Republike Srbije

pomogli su:

**Generalni pokrovitelj:**

**TERMOVENT KOMERC - Beograd**

**Generalni sponzor:**

**INŽENJERSKA KOMORA SRBIJE – Beograd**

**Veliki sponzori:**

**FOSTER WHEELER – Poljska**

**Sponzori:**

**VIA OCEL – Beograd**

**ENERGOPROJEKT – ENTEL – Beograd**

**CENTROMETAL – Hrvatska**

**ETAŽ - Beograd**

**HERZ - Beograd**

**WILO - Beograd**

**VOGEL & NOOT - Hrvatska**



14. SIMPOZIJUM TERMIČARA SRBIJE  
13–16. oktobar 2009, Sokobanja



DRUŠTVO TERMIČARA SRBIJE

MAŠINSKI FAKULTET NIŠ



Република Србија  
Министарство за науку и технолошки развој



ИНЖЕЊЕРСКА КОМОРА СРБИЈЕ



## I ENERGETSKI IZVORI I POTENCIJALI

I.1	POTROŠNJA UGLJA U SRBIJI I EMISIJA CO2 NASTALA NJEGOVIM SAGOREVANJEM CONSUMPTION OF COAL IN SERBIA AND CO2 EMISSIONS RELATED TO IT'S COMBUSTION V. Milisavljević, V. Čokorilo, D. Zlatanović, J. Milenković	1
I.2	PRIRODNI GAS U PROGRAMU OSTVARIVANJA STRATEGIJE RAZVOJA ENERGETIKE THE NATURAL GAS IN THE REALIZATION PROGRAM FOR THE STRATEGY OF ENERGY V. Vuletić, N. Đajić**	8
I.3	ENERGETSKE REPERKUSIJE SVETSKE EKONOMSKE KRIZE IMPACTS OF WORLD ECONOMIC CRISIS ON ENERGY SECTOR M. Mesarović	17
I.4	UTICAJ CENA GORIVA NA RAZVOJ I PRIMENU OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE IMPACT OF FUEL PRICES ON DEVELOPMENT AND USE OF RENEWABLE ENERGY SOURCES M. Mesarović	23
P.I.1	ENERGETSKA BUDUĆNOST SRBIJE THE FUTURE OF THE ENERGY SECTOR IN THE SERBIA B. Cvetanović	29

## II STRUJANJE I PROSTIRANJE TOPLOTE I MATERIJE

II.1	IZBOR OPTIMALNIH PROFILA BRZINE I TEMPERATURE U LAMINARNOM GRANIČNOM SLOJU PRI OPSTRUJAVANJU RAVNE PLOČE PRIMENOM INTEGRALNOG METODA PRORAČUNA SELECTION OF OPTIMAL VELOCITY AND TEMPERATURE PROFILES IN LAMINAR BOUNDARY LAYER ALONG FLAT PLATE APPLYING INTEGRAL METHOD OF CALCULATION B. Stanković, S. Belošević, M. Sijerčić, V. Bakić	35
II.2	FREKVENTNI ODZIV TURBULETNOG OSNOSIMETRIČNOG MLAZA NA MODIFIKACIJU ZVUČNIM OSCILACIJAMA TURBULENT AXISYMMETRIC JET FREQUENCY RESPONSE ON MODIFICATION BY ACOUSTIC OSCILLATIONS D.B. Cvetinović, S.M. Čantrak	43
II.3	TERMOHIDRAULIČKI UDAR U TERMoeLEKTRANAMA CONDENSATION INDUCED WATER HAMMER IN THERMAL POWER PLANTS S. Prica, V. Stevanović, B. Maslovarić, M. Jovanović	56
P.II.1	NUMERIČKA SIMULACIJA TURBULETNOG DVOFAZNOG STRUJANJA AEROSMEŠE U KANALIMA SA JEDNOSTEPENIM TURBULATORIMA NUMERICAL SIMULATION OF TURBULENT TWO-PHASE AIR-COAL MIXTURE FLOW IN THE CHANNELS WITH SINGLE BLADE TURBULATORS R. Jovanović, B. Rašuo, D. Cvetinović, P. Stefanović, Z. Marković, Z. Pavlović	62

## III ENERGETSKA EFIKASNOST I RACIONALNO GAZDOVANJE ENERGIJOM

III.1	PREGLED STANJA U ZAKONSKOJ REGULATIVI REPUBLIKE SRBIJE ZA UGRADNJU TNG INSTALACIJE U VOZILIMA REVIEW OF LEGISLATIVE PROCEDURES IN REPUBLIC OF SERBIA FOR LPG-INSTALLATION MOUNTING IN VEHICLES A. Stefanović, I. Klinar, B. Nikolić	75
III.2	OPŠTI PRISTUP ENERGETSKOJ EFIKASNOSTI U SEKTORU MLEČNE INDUSTRIJE A.S. Anđelković	81
III.3	ENERGETSKA EFIKASNOST KAO KRITERIJUM U PROCESU UPRAVLJANJA VOZIM PARKOVIMA ENERGY EFFICIENCY AS A CRITERION FOR VEHICLE FLEET MANAGEMENT PROCESS R. Mijailović, D. Vujanović, V. Momčilović, V. Papić	87
III.4	FREKVENTNA REGULACIJA RADA VENTILATORA I PUMPI KAO MERA POVEĆANJA ENERGETSKE EFIKASNOSTI SISTEMA KLIMATIZACIJE I VENTILACIJE HVAC SYSTEM ENERGY EFFICIENCY IMPROVEMENT WITH VARIABLE FREQUENCY CONTROL FOR FANS AND PUMPS I. Zlatanović, N. Rudonja, K. Gligorević	95
III.5	ENERGETSKA EFIKASNOST INDUSTRIJSKIH KONCENTRATORA SA EJEKTORSKOM TERMOKOMPRESIJOM V. Šarevski, M. Šarevski	101
III.6	TOPLOVODNI KOTAO SA DODATIM ZAGREJAČEM VODE ZA SAGOREVANJE BALIRANE BIOMASE HOT-WATER BOILER WITH ADDITIONAL WATER HEATER FOR BUNDLED BIOMASS COMBUSTION D. Tucaković, T. Živanović, D. Stojiljković, V. Jovanović, M. Todorović	112
III.7	UTICAJ REŽIMA PEČENJA NA KVALITET OPEKARSKIH PROIZVODA THE INFLUENCE OF FIRING REGIME ON QUALITY OF MASONRY PRODUCTS M. Vasić, Z. Radojević, M. Maričić	121

III.8	ENERGETSKA EFIKASNOST KUĆNIH APARATA I RASVETE NAJVEĆI ENERGETSKI IZVOR U NAŠOJ ZEMLJI ENERGY EFFICIENCY OF THE HOME APPLIANCES AND LIGHTING THE GREATEST ENERGY SOURCE IN OUR COUNTRY D. Stojanović, M. Bjekić, R. Krneta, S. Đukić	128
III.9	POSTUPAK IZBORA OPTIMALNOG RJEŠENJA I ANALIZA IZVODLJIVOSTI ZA MOGUĆE KORIŠĆENJE KOGENERACIJE U REPUBLICI SRPSKOJ PROCEDURE FOR CHOOSING OPTIMAL SOLUTION AND FEASIBILITY ANALYSES FOR POSSIBLE USAGE OF CO-GENERATION IN REPUBLIC OF SRPSKA V. Babić, Z.N. Milovanović	140
III.10	MODELI PRIMJENE SISTEMA KOGENERACIJE U REPUBLICI SRPSKOJ - ODRŽIV RAZVOJ I KORIŠĆENJE MODELS FOR IMPLEMENTATION OF THE SYSTEM OF CO-GENERATION IN REPUBLIC OF SRPSKA - SUSTAINABLE DEVELOPMENT AND EXPLOITATION V. Babić, Z.N. Milovanović	146
III.11	ENERGETSKI POTENCIJAL ORGANSKOG OTPADA IZ KLANICA U OKOLINI KRAGUJEVCA ENERGY POTENTIAL OF ORGANIC WASTE FROM SLAUGHTERHOUSES IN THE VICINITY OF KRAGUJEVAC M. Despotović, S. Jovanović	152
III.12	MOGUĆNOST PROIZVODNJE BIOGASA OD OSTATAKA HRANE IZ RESTORANA PROCESOM KODIGESTIJE U POSTOJEĆEM POSTROJENJU ZA PREČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA POSSIBILITZ FOR BIOGAS PRODUCTION FROM FOOD RESIDUES FROM RESTAURANTS BY CO-DIGESTION IN THE EXISTING WASTEWATER TREATMENT PLANT M. Despotović, D. Nikolić	157
III.13	HIBRIDNI MODEL MINI VETROGENERATORSKE TURBINE IZOLOVANOG SISTEMA NAPAJANJA ELEKTRIČNOM ENERGIJOM POSLOVNOG PROSTORA MINI WIND TURBINE HYBRID MODEL OF SINGLE FEEDING ELECTRICAL POWER SYSTEM FOR NON RESIDENTIAL BUILDINGS Ž.Ž. Stevanović, V.V. Bakić	162
III.14	ENERGETSKI MENADŽMENT U PROZVODNJI AUTO-GUMA ENERGY MANAGEMENT IN CAR TYRE MANUFACTURING P. Milosavljević, D. Živković	170
III.15	PROMENLJIVI REŽIMI RADA KONDENZATORA PARNOG BLOKA A-110 MW U TE „KOLUBARA“-A DIFFERENT WORK REGIMES OF THE CONDENSER IN THE STEAM TURBINE POWER PLANT A-110 MW „KOLUBARA“-A D. Živković, Z. Stajčić, V. Stefanović, M. Laković	179
III.16	UTICAJ PROMENE PRITISKA KONDENZACIJE NA SNAGU PARNE TURBINE A-110MW U TE „KOLUBARA“-A THE INFLUENCE OF THE CONDENSATION PRESSURE CHANGE ON POWER OF THE STEAM TURBINE IN POWER PLANT „KOLUBARA“-A D. Živković, Z. Stajčić, V. Stefanović, M. Laković	188
III.17	ENERGETSKA EFIKASNOST ZGRADA U SRBIJI-STANJE I PERSPEKTIVE ENERGY EFFICIENCY OF BUILDINGS IN SERBIA-STATE OF THE ART AND PERSPECTIVES D. Šumarac	197
P.III.1	NUMERIČKA SIMULACIJA TOPLOTNIH KARAKTERISTIKA STAMBENE ZGRADE SA DALJINSKIM GREJANJEM NUMERICAL SIMULATION OF THERMAL CHARACTERISTICS OF A RESIDENTIAL BUILDING IN DISTRICT HEATING SYSTEM V. Turanjanin, B. Vučićević, M. Jovanović, V. Bakić	216
P.III.2	SIMULACIJA POTROŠNJE ENERGIJE I MOGUĆNOSTI UŠTEDE U SISTEMIMA SA ETAŽNIM GREJANJEM SIMULATION AND ENERGY SAVINGS IN DECENTRALIZED HEATING SYSTEMS B. Vučićević, V. Turanjanin, V. Bakić, M. Jovanović, N. Mirkov*	223
P.III.3	OPTIMIZACIJA KOMBINOVANOG POSTROJENJA ZA PROIZVODNJU POTROŠNE TOPLE VODE COMBINED SYSTEM OPTIMIZATION FOR DOMESTIC HOT WATER PRODUCTION V. Bakić, V. Turanjanin, M. Jovanović, M. Pezo, N. Miloradović	231
P.III.4	ENERGETSKA EFIKASNOST I ŠTEDNJA ENERGIJE U INDUSTRIJI I USLUŽNIM DELATNOSTIMA ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVING IN INDUSTRY AND SERVICES R.V. Filkoski, I.J. Petrovski, A.T. Nošpal, V.M. Stojkovski	237
P.III.5	IDEJNI PROJEKAT GASNE DISTRIBUTIVNE MREŽE PIROTA V. Stefanović, D.S. Živković D.S. Milčić	245
P.III.6	IDEJNI PROJEKAT TOPLOTNE DISTRIBUTIVNE MREŽE TOPLANE „SENJAK“ U PIROTU V.P. Stefanović, M.S. Laković, D. Ćirić, M. Tošić	254



P.III.7	RACIONALNOST IZBORA RADNIH PARAMETARA I OPREME ZA POVRATNO HLADJENJE PARNOG BLOKA RATIONALITY OF CHOICE OF WORKING PARAMETERS AND EQUIPMENT FOR POWER PLANT CLOSE-CYCLE COOLING S. Laković, M. Laković, V. Stefanović, M. Stojiljković	261
P.III.8	DNEVNA PROMENA PRITISKA U KONDENZATORU POVRATNO HLAĐENOG PARNOG BLOKA ZA LETNJI DAN STEAM POWER PLANT CONDENSING PRESSURE DAILY VARIATION DUE TO ATMOSPHERIC AIR PARAMETERS VARIATION DURING SUMMER PERIOD M.S. Laković, S.V. Laković, M. Stojiljković, V. Stefanović, P. Živković, D. Živković	269
P.III.9	MARKETING ENERGETSKE EFIKASNOSTI - PODIZANJE SVESTI I EDUKACIJA ZAPOSLENIH MARKETING ENERGY EFFICIENCY – AWARENESS RAISING AND EDUCATION EMPLOYEES S.Živadinović	278
P.III.10	SPEKTI GAZDOVANJA ENERGIJOM U GUMARSKOJ INDUSTRIJI ASPECTS OF ENERGY MANAGEMENT IN THE RUBBER PROCESSING INDUSTRY S.Živadinović	285

#### IV TEHNOLOGIJE I POSTROJENJA

IV.1	REDLOG IZGRADNJE NOVE TOPLANE-ELEKTRANE U ZAJEČARU PRIMENOM TEHNOLOGIJE SAGOREVANJA U FLUIDIZOVANOM SLOJU PROPOSAL FOR DESIGN OF NEW CO-GENERATION THERMAL POWER PLANT IN ZAJEČAR BASED ON CIRCULATING FLUIDIZED BED TECHNOLOGY S. Oka, V. Čokorilo, N. Lilić, Z. Dragosavljević	292
IV.2	PRIKAZ PROJEKTA I TEHNOEKONOMSKE ANALIZE POSTROJENJA REKUPERACIJE TOPLOTE OTPADNOG VAZDUHA CPV-2 SISTEMA KLIMATIZACIJE VMA U BEOGRADU B. Aleksić, D. Gajić, D. Voronjec	310
IV.3	UTICAJI POSTAVLJENOSTI I RAZMEŠTAJA REŠETKI KOD DISTRIBUCIJE VAZDUHA C. Dimitrieska, G. Trombev, M. Serafimov, V. Trombev	318
IV.4	PROIZVODNJA VENTILACIONIH I KLIMATIZACIONIH KANALA U SRBIJI – TEHNOEKONOMSKA ZASNOVANOST I MOGUĆA TEHNIČKA REŠENJA PRODUCTION OF DUCT FOR VENTILATION AND AIR CONDITIONS IN SERBIA –TECHNO-ECONOMIC BASED AND POSSIBLE TECHNICAL SOLUTIONS A. Marinković, N.Rudonja, M.Komatina, D.Antonijević, N.Dondur, P.Milićević	324
IV.5	ODREĐIVANJE OPTIMALNE RAZLIKE TEMPERATURE HLADNE VODE U SISTEMU DALJINSKOG HLAĐENJA PRIMENOM ABSORBCIONE RASHLADNE MAŠINE Š.M.Bajmak	330
IV.6	PROCES GENERISANJA TOPLOTE KOD FRIKCIONOG ZAVARIVANJA SA MEŠANJEM - FSW HEAT GENERATION WITHIN FRICTION STIR WELDNG PROCESS M.M. Mijajlović, D.S. Milčić, M.B. Đurđanović, D.J. Mitić, A.B. Živković	338
IV.7	MOGUĆNOSTI SMANJENJA EMISIJE DIMA I AZOTOVIH OKSIDA PRIMENOM SISTEMA HLAĐENE RECIRKULACIJE IZDUVNIH GASOVA DIZEL MOTORA THE POSSIBILITIES OF DIESEL ENGINE NITRIC OXIDES AND SMOKE EMISSION REDUCTION BY APPLICATION OF COOLED EXHAUST GAS RECIRCULATION D. Knežević, S. Petrović, M. Tomić	347
IV.8	RAZVOJ BENZINSKOG MOTORA DMB 1.4 SA TURBOPUNJENJEM I ELEKTRONSKIM UBRIZGAVANJEM DEVELOPMENT OF GASOLINE ENGINE DMB 1.4 WITH TOURBOCHARGING AND ELECTRONIC FUEL INJECTION M. Tomić, S. Petrović, S. Popović, N. Miljić	353
IV.9	PNEUMATSKO-AKUMULACIONA TERMOELEKTRANA NA PRIRODNI GAS COMPRESSED AIR ENERGY STORAGE POWER PLANT ON NATURAL GAS V. Vuletić, M. Mesarović	363
P.IV.1	ANALIZA UTICAJA STRUJNIH I KONSTRUKTIVNIH VELIČINA NA KARAKTERISTIKE AKSIJALNIH VENTILATORA ANALYSIS OF INFLUENCE OF FLOW AND CONSTRUCTIVE PARAMETERS ON OPERATING CHARACTERISTICS OF AXIAL FANS Ž. Spasić, D. Milenković, B. Bogdanović, J. Bogdanović-Jovanović	369
P.IV.2	ZATVORENI GRADSKI BAZEN U PIROTU- IZVOD IZ STUDIJE OPRAVDANOSTI PRIMENE ENERGETSKI VISOKOEFIKASNOG POLIGENERACIJSKOG POSTROJENJA ZA PROIZVODNJU TOPLOTNE ENERGIJE V. Stefanović, D.S. Živković, M.S. Lakovic, S.R. Pavlović	375
P.IV.3	KONSTRUKTIVNE I RADNE KARAKTERISTIKE REKUPERATORA TOPLOTE VAZDUH-VAZDUH CONSTRUCTIVE AND WORKING CHARACHTERISTIC OF AIR TO AIR HEAT RECUPERATOR M. Ignjatović, B. Stojanović, J. Janevski, M. Stojiljković, D. Mitrović, M. Vukić	385



## V NOVI I OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE

V.1	UTICAJ STABILNOSTI ATMOSFERE NA VERTIKALNE PROFILE BRZINE VETRA ATMOSPHERE STABILITY IMPACT TO VERTICAL WIND VELOCITY PROFILES N. Mirkov, Ž. Stevanović, B. Grubor, Ž. Stevanović	392
V.2	PRIMENA ALGORITAMA ODLUČIVANJA U OBLASTI OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE UTILIZATION OF DECISION-MAKING ALGORITHMS WITHIN THE AREA OF RENEWABLE ENERGY SOURCES D. Ninković	406
V.3	REZULTATI ISPITIVANJA SAGOREVANJA BALIRANE BIOMASE NA EKSPERIMENTALNOM KOTLU RESULTS OF BALLED BIOMASS COMBUSTION RESEARCH ON EXPERIMENTAL BOILER B.S. Repić, D.V. Dakić, D.M. Đurović, A.M. Erić	412
V.4	PRIMENA STANDARDA ZA PROCENU POTENCIJALNIH LOKACIJA ZA IZGRADNJU VETROELEKTRANA APPLICATION OF STANDARDS FOR ASSESSMENT OF POTENTIAL SITES FOR WIND FARM BUILDING Ž. Stevanović, Ž. Stevanović, B. Grubor, P. Živković, G. Ilić, M. Vukić	418
V.5	KARAKTERISTIČNA OGRANIČENJA UTICAJA NA ŽIVOTNU SREDINU PRI IZBORU LOKACIJA ZA IZGRADNJU VETROELEKTRANA U SRBIJI SPECIFIC CONSTRAINS OF ENVIRONMENTAL IMPACT TO SERBIAN SITES SELECTION FOR WIND FARMS BUILDING Ž. Stevanović, Ž. Stevanović, B. Grubor, P. Živković, G. Ilić, M. Vukić	434
V.6	PRODUKCIJA BIOMASE MISCANTHUS GIGANTEUS SA ASPEKTA ENERGETSKE I EKOLOŠKE EFIKASNOSTI EKOSISTEMSKOG PROCESORA G. Dražić, M. Mitić, N. Mihailović, A. Đorđević, S. Marković	450
V.7	BIOFUELS IMPROVING SUSTAINABILITY OF TRANSPORT IN CROATIAN TOURIST RESORTS B. Čosić, G. Krajačić, N. Duić	456
V.8	PREDNOSTI ENERGIJE VETRA I NJENA UPOTREBA U VETROELEKTRANAMA BENEFITS OF WIND ENERGY AND ITS USAGE IN WIND TURBINE V. Miltenović, J. Stefanović-Marinović, M. Banić *	462
V.9	TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA MOGUĆNOSTI KORIŠĆENJA BIOMASE KAO ENERGENTA ZA PROIZVODNJU BIOGASA TECHNO-ECONOMIC ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF UTILIZING BIOMASS AS AN ENERGY SOURCE FOR BIOGAS PRODUCTION S.B. Milunović, S.N. Čurčić, S.M. Dragičević	468
V.10	UTICAJ PROMENLJIVOG MAGNETNOG POLJA NA SMANJENJE STVARANJA NASLAGA PRI PROTOKU GEOTERMALNE VODE IMPACT VARIABLE MAGNETIC FIELD FOR REDUCTION OF DEPOSITS CREATING WHEN FLOW OF GEOTHERMAL WATER D.T. Stojiljković, N.Č. Mitić, S.T. Stojiljković, M. Đurović-Petrović, Ž. Tasić	474
V.11	UBACIVANJE BIOGASA DOBIJENOG IZ POSTROJENJA ZA TRETMAN OTPADNIH VODA U MREŽU PRIRODNOG GASA BIOGAS FROM WASTEWATER TREATMENT PLANT INJECTION INTO THE NATURAL GAS NETWORK M. Despotović, N. Nikolić	482
V.12	KORIŠĆENJE BIOGASA IZ POSTROJENJA ZA TRETMAN OTPADNIH VODA KAO TRANSPORTNOG GORIVA BIOGAS FROM WASTEWATER TREATMENT PLANT AS TRANSPORT FUEL M. Despotović, N. Nikolić	488
V.13	STANDARDI ZA PROCENU POTENCIJALNIH LOKACIJA ZA IZGRADNJU VETROELEKTRANA STANDARDS FOR ASSESSMENT OF POTENTIAL SITES FOR WIND FARM BUILDING Ž. Stevanović, Ž. Stevanović, B. Grubor, P. Živković, G. Ilić, M. Vukić	494
P.V.1	ISPITIVANJE RADA KOTLA SNAGE 1,5 MW ZA GREJANJE PLASTENIKA U PKB-U KORIŠĆENJEM BALIRANE BIOMASE TESTING 1,5 MW BOILER FOR HEATING GREENHOUSES IN PKB USING BALLED BIOMASS D.Dakić, D.Đurović, B.Repić, A.Erić, M.Mladenović, G.Živković, A.Stojanović	508
P.V.2	EKONOMSKA ANALIZA MOGUĆNOSTI PROIZVODNJE TOPLOTNE I ELEKTRIČNE ENERGIJE KORIŠĆENJEM POLJOPRIVREDNE BIOMASE ECONOMIC ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF COMBINED HEAT AND ELECTRICITY PRODUCTION BURNING AGRICULTURAL BIOMASS D.Dakić, D.Đurović, B.Repić, A.Erić, M.Mladenović, G.Živković	514
P.V.3	OPCIJE ENERGETSKIH SISTEMA KOJE KORISTE GAS I OBNOVLJIVE IZVORE ENERGIJE ZA DOBIJANJE SANITARNE TOPLE VODE I PROCENA NJIHOVE ODRŽIVOSTI ENERGY SYSTEM OPTIONS WHICH USE GAS AND RENEWABLE ENERGY RESOURCES FOR SANITARY HOT WATER PRODUCTION AND ASSESSMENT OF THEIR SUSTAINABILITY M. Jovanović, Valentina Turanjanin, Biljana Vučićević,	520

P.V.4	ENERGETIC POTENTIAL OF MORUS SP. BIOMASS PLANTS M. Ichim, D. Tanase, M. Yungen	527
P.V.5	ECOLOGICAL - ENERGY UTILIZATION OF WASTE BIOMASS IN TECHNOLOGICAL PROCESS Z. Đukić, S. Kovačević	533
P.V.6	POTENCIJALI ENERGIJE VETRA U PLANINSKIM OBLASTIMA SRBIJE WIND ENERGY POTENTIALS IN MOUNTAINEOUS REGIONS OF SERBIA P.M. Živković, G.S. Ilić, M.V. Vukić, Ž.M. Stevanović	539
P.V.7	EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE PERMEABILNOSTI BALIRANOG SOJINOG OSTATKA EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE BALLEED SOYA RESIDUE PERMEABILITY A. Erić, D. Dakić, S. Nemoda, M. Komatina	547

#### VI ISPITIVANJE POSTROJENJA U POGONU I EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA POSTROJENJA

VI.1	EXTREME VALUES FROM THE CLIMATIC CURVE AND THEIR INFLUENCE ON TPP'S "BITOLA" COLD-END I.N. Mijakovski, V.I. Mijakovski	553
VI.2	DETERMINATION OF EVAPORATION LOSSES IN HYPERBOLIC WET COOLING TOWER V.I. Mijakovski, I.N. Mijakovski	559
VI.3	FAKTOR PRENOSA TOPLOTE KOD RAZMENIVAČA TOPLOTE HEAT TRANSFER FACTOR AT HEAT EXCHANGERS K.J. Popovski	565
VI.4	EMISSION CHARACTERISTICS OF A LEAN PREMIXED SWIRL COMBUSTOR M. Adžić, M. Živković, V. Fotev, A. Milivojević	571
VI.5	EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE TOPLOTNIH SVOJSTAVA ZEMLJIŠTA KAO IZVORA TOPLOTE ZA GEOTERMALNE TOPLLOTNE PUMPE EXPERIMENTAL DETERMINATIONS OF THERMOPHISICAL CHARACTERISTICS OF SOIL AS A HEAT SOURCE OF GEOTHERMAL HEAT PUMPS M. Banjac	577
P.VI.1	EKSPERIMENTI SAGOREVANJA RAZLIČITIH TEČNIH GORIVA U LOŽIŠTU SA FLUIDIZOVANIM SLOJEM THE EXPERIMENTS OF FLUIDIZED BED COMBUSTION OF DIVERSELY LIQUID FUEL M. Mladenović, S. Nemoda, D. Dakić, B. Repić, A. Erić, D. Đurović, M. Komatina	585
P.VI.2	EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE KARAKTERISTIKA REKUPERATORA TOPLOTE VAZDUH- VAZDUH EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF CHARACHTERISTIC AIR TO AIR HEAT RECUPERATOR B. Stojanović, J. Janevski, M. Ignjatović, M. Stojiljković, D. Mitrović, M. Vukić	593

#### VII POUZDANOST PROCESA, OPREME I POSTROJENJA I AUTOMATIZACIJA I KONTROLA PROCESA

VII.1	METODOLOGIJA OCENE EKSPLOATACIONA POUZDANOST I UNAPREĐENJA MERA ODRŽAVANJA MAGISTRALNIH CEVOVODA SPROVEDENA NA PRIMERU SERVICE RELIABILITY ASSESSMENT METHODOLOGY AND MAITENANCE IMRUVEMENT OF MAGISTRAL PIPELINES THROUGH EXAMPLE G.M.Bakić, V.B.Šijački, M.B.Đukić, B.M.Rajičić, B.M.Anđelić	599
VII.2	PROCJENA POUZDANOSTI TERMOENERGETSKIH POSTROJENJA NA MAKRONIVOU ESTIMATION OF RELIABILITY OF THERMO-ENERGY PLANTS ON MACRO-LEVEL Z.N. Milovanović, V. Babić	605
VII.3	UPRAVLJANJE PROJEKTOM PODIZANJA KONKURENTNOSTI TERMOENERGETSKIH POSTROJENJA MANAGEMENT OF PROJECT FOR RAISING INDUSTRIAL COMPETITIVENESS OF THERMO- ENERGY PLANTS Z. N. Milovanović, V. Babić	611
VII.4	MODELOVANJA PROCESA U ENERGETSKIM BLOKOVIMA TERMOELEKTRANA – TRENAŽER ZA POSTROJENJA U TE-TO MODELING OF ENERGY IN THERMAL POWER PLANT BLOCKS - TRAINER FOR PLANTS IN TE- TO S. Stevanović, N. Radmilović, M. Milojević, N. Krajnović	617
VII.5	TERMOVIZIJA KAO SAVREMENI METOD ZA PREVENTIVNO ODRŽAVANJE, MONITORING I DIJAGNOSTIKU TRANSFORMATORSKIH STANICA THERMOVISION AS CONTEMPORARY METHOD FOR PREVENTIVE MAINTENANCE, MONITORING AND DIAGNOSE OF ELECTRIC POWER SUBSTATIONS D. Mančić, Z. Petrušić, I. Jovanović	625
P.VII.1	PRIMENA DETEKTORSKIH SISTEMA U REGULISANJU SAOBRAĆAJA APPLICATION OF DETECTION SYSTEMS IN TRAFFIC CONTROL M. Milošević, D. Stamenković, Lj. Vasin	640
P.VII.2	PRIMENA INTELIGENTNOG UPRAVLJANJA NA POSLOVNU ZGRADU U PROKUPLJU APPLICATION OF INTELLIGENT CONTROL TO A BUSSINES BUILDING IN PROKUPLJE S.M. Stojiljković, Ž.M. Čojbašić, M.S. Stoiljković	646

# PROCES GENERISANJA TOPLOTE KOD FRIKCIONOG ZAVARIVANJA SA MEŠANJEM - FSW

## HEAT GENERATION WITHIN FRICTION STIR WELDING PROCESS

Dragan S. Milčić, Mijajlović M. Miroslav, Đurđanović B. Miroslav,  
Dragan J. Mitić, Živković B. Aleksandar\*

*Mašinski fakultet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, Niš  
GOŠA FOM, Industrijska 70, Smederevska Palanka\**

**Abstract:** Friction Stir Welding – FSW) is unconventional-solid-state welding process which uses friction processes between welding tool and welding material in order to create a welded assembly. Welding tool is rotating around its spinning axle and transversally moving along the weld line of the weld material and generating heat as a product of friction processes between welding tool and welding material. Generated heat softens material of both welding plates and forces softened metal to create a soft joint that starts to cool down and become solid state weld. FSW process of welding is primarily used for welding of aluminum parts, for aerospace and airplane industry, for process industry etc. Strength of the weld is directly depending on amount of generated heat and it is important to provide satisfactory mathematical model which will describe welding process and heat generation with sufficient precision. This paper gives basic equations for calculation of generated heat during FSW process.

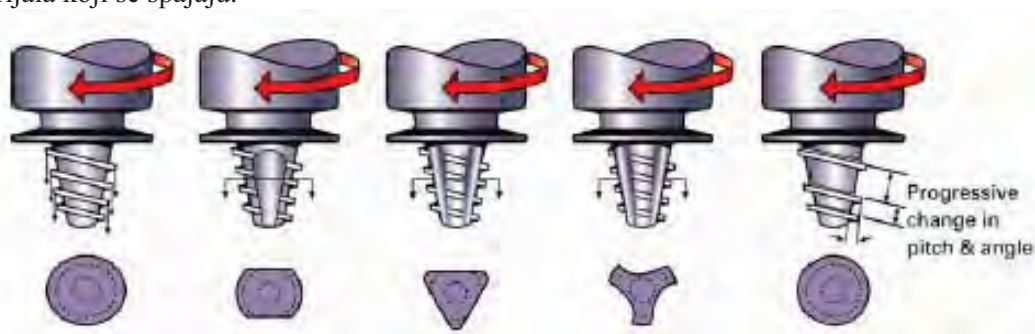
**Key words:** Friction Stir Welding, Heat Generation

### 1. UVOD

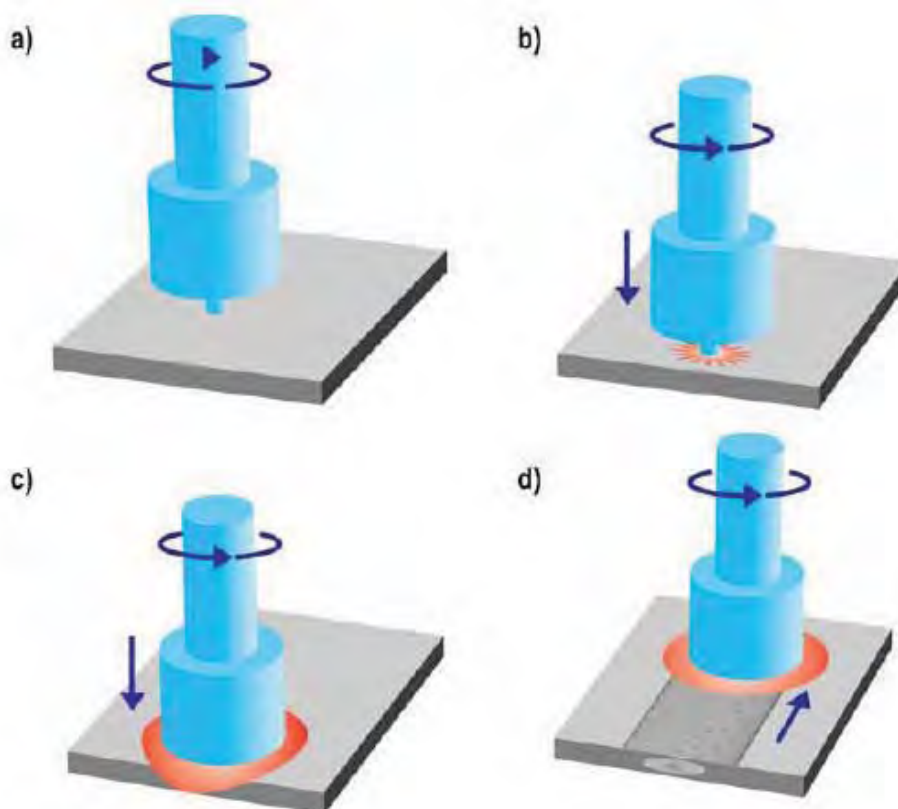
Zavarivanje trenjem sa mešanjem - FSW je proces razvijen na TWI Cambridge početkom devedesetih godina dvadesetog veka, a predstavlja metod spajanja metala bez dodatnog materijala. Ovaj metod se koristi posebno u raznim kritičnim slučajevima kod kojih ni jedan drugi metod ne daje zadovoljavajuće rezultate, anjegove prednosti se ogledaju u spajanju materijala kao što su aluminijum i njegove legure, nerđajući austenitni čelici koji se teško zavaruju konvencionalnim metodama, titan, nemetalni materijali itd. Ovaj proces daje veoma jake i homogene zavare, često i na spojevima koji važe za vrlo teško ostvarive konvencionalnim metodama i tehnikama. Najveću primenu nalazi za komponente koje su ravne i dugačke, no određenim adaptacijama alata moguće je odlično zavarivanje cevi, raznih šupljih elemenata kao i tačkasto zavarivanje.

Spojevi nastaju kombinacijom uticaja zagrevanja trenjem i mehaničkih deformacija koje nastaju usled delovanja specijalnog rotirajućeg alata – kod ove vrste zavarivanja, takozvanog *klina*. Maksimalne dostignute temperature ne prelaze 80% od temperature topljenja materijala koji se spajaju. Kako je prikazano na slici 1, alat ima kružne sekcije osim na kraju, na klinu, gde je alat profilisan u oblik sličan navoju, ili kao što je kod nekih alata slučaj, u još složenije profile. Deo koji se nalazi između tela alata i klina naziva se rame (ili šešir).

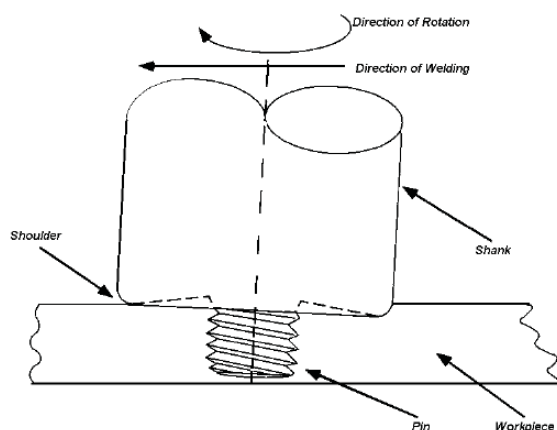
Proces zavarivanja FSW postupkom je prikazan na slici 2. Klin prodire u radni predmet dok rame ostaje na površini, rotirajući uz dejstvo visokog pritiska po površini delova koji se zavaruju (slika 2,b). Toplota neophodna za zavarivanje nastaje međusobnim delovanjem materijala koji se spajaju i alata koji rotira pritiskajući ih (slika 2,c). Toplota se zapreminski raspoređuje u zavaru, polazeći iz centra rotacije, u kojem se, po pretpostavci, toplota razvija adijabatskim procesom. Parametri zavarivanja moraju biti tako određeni da nivoi trenja i zapreminskih deformacija, kao i pritom nastajuće toplote, opadaju u slučaju rasta debljine materijala koji se spajaju.



Slika 1.



Slika 2.

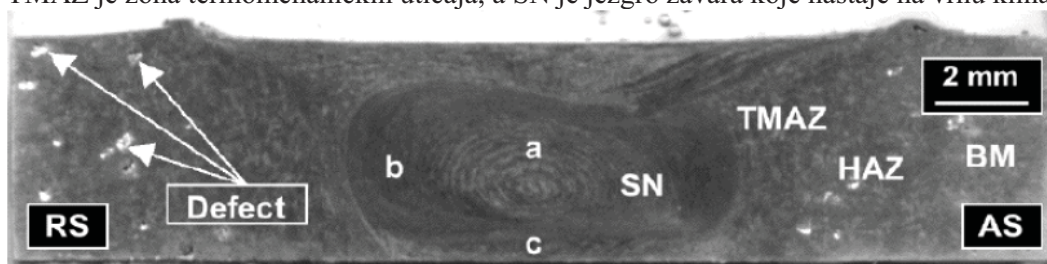


Slika 3.

Mikrostruktura zavara nastalog na ovaj način zavisi od određenih detalja u konstrukciji alata, brzina rotacije i translacije alata, korištenog pritiska te karakteristika materijala koje spajamo. Zona uticaja toplote (ZUT) je slična onoj koju imamo kod konvencionalnih metoda. Centralni region zavara ima strukturu slično onoj koju ima poprečno presečena lukovica i taj region je najviše deformisan u zavaru, iako je ponekad moguća i delimična rekristalizacija, tako da se taj region zavara može sastojati i od deformisanih zrna. Slojeviti deo zavara (lukovičasti izgled) je posledica načina na koji alat ostavlja materijal na svojoj zadnjoj strani, a koji je uzeo sa prednje strane zavara. Izgleda kao da su pojedini slojevi nastali istezanjem jednog delića materijala, što gledano duž zavara zaista ima izgled presečene lukovice.

Zona u kojoj vladaju termomehantički uticaji nalazi se između zone termičkih uticaja i jezgra zavara, a zrna originalne mikrostrukture u njoj trpe samo minimalne deformacije. Spoljašnja površina zavara ima značajno drugačiju strukturu, što je posledica pomeranja materijala koje vrši rotiranje alata.

Na slici 4 data je makrostruktura preseka u zavaru Al-Si legure. Kao što se na slici vidi, u osnovnom materijalu postoje pore. Oznaka HAZ predstavlja zonu termičkog delovanja, TMAZ je zona termomehantičkih uticaja, a SN je jezgro zavara koje nastaje na vrhu klina.



Slika 4.

## 2. ZAVARIVANJE FSW POSTUPKOM

Dve polovine koje se spajaju moraju biti vrlo kruto fiksirane pre otpočinjanja zavarivanja. Klin ili trn, koji je sastavni deo alata, prodire u materijal u cilju njegovog mešanja, rame trenjem proizvodi najveći deo toplote. Kada je zavar gotov, alat se izvlači, ostavljajući rupu za sobom. Zavar, a ujedno i spoj dva elementa koji se izrađuje, su tako konstruisani da se deo zavara u kojem ostaje otvor naknadno odseca i tako uklanja. Prisustvo takvog otvora je sasvim nepoželjno prilikom zavarivanja cevi ili rezervoara, no posebnim oblikovanjem alata,



pri čemu se trn vrlo lagano uvlači u rame, dakle u telo alata, povlačeći za sobom deo materijala koji na taj način popunjava prazninu ostavljajući celovit zavar.

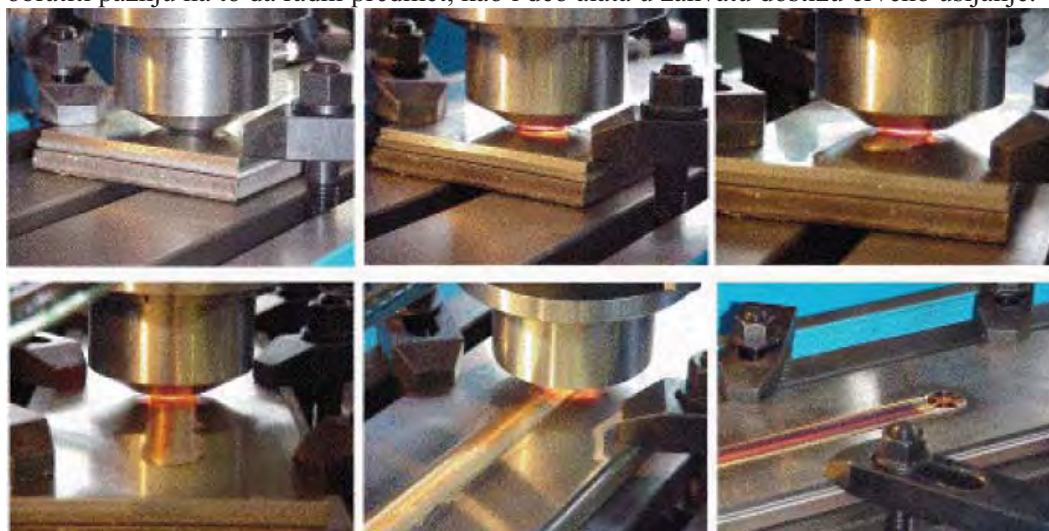


*Slika 5. Spoj dve Al – ploče.*



*Slika 6. Zavar bez nastajanja rupe na izlazu alata.*

Zavarivanje čelika je moguće, ali osnovni problem kod ovog postupka je veliko habanje alata usled ogromnog otpora materijala. Ispitivanjem zavara, moguće je u njemu pronaći uključke koji potiču sa alata, a koji dospevaju u zavar habanjem istog. Uprkos ovom značajnom problemu, ovaj postupak zavarivanja se ipak koristi u nekim posebnim slučajevima. Na narednim slikama prikazano je zavarivanje nerđajućeg čelika oznake 316L. Posebno treba obratiti pažnju na to da radni predmet, kao i deo alata u zahvatu dostižu crveno usijanje.



*Slika 7. Zavarivanje čeličnih ploča FSW postupkom*

Pošto alat dostiže tako visoku temperaturu, neophodna je njegova zaštita od atmosferskog delovanja – oksidacije, korišćenjem sredine sa zaštitnim gasom. Najznačajnija primena ove metode zavarivanja čelika je spajanje elemenata od nerđajućih čelika, koji su veoma teško za zavarivanje konvencionalnim metodama. Na primer, austenitni nerđajući čelici se mogu zavarivati metodom električnog luka. Međutim, zavarivanje trenjem sa trnom daje kvalitetnije spojeve sa manjim deformacijama usled termičkog delovanja te značajno umanjenu poroznost vara. Druga prednost je izbegavanje stvaranja gasova koji sadrže heksavalentni hrom, koji je jako kancerogen. Dalje, hemijsko razgrađivanje spojeva u čeliku se na ovaj način izbegava – nema dakle izlučivanja ugljenika u okolinu zavara, što ima ogroman značaj na kvalitet zavara. Ovakva izlučivanja imaju za posledicu slabljenje antikorozivnih svojstava čelika pošto tako nastaju različita elektrolitička područja sa različitim potencijalima, što dovodi do unutrašnje korozije materijala i ima za posledicu potencijalno uništenje zavara i prekid spoja.

### **3. VAŽNI PARAMETRI ZAVARIVANJA FSW POSTUPKOM**

#### **3.1. Rotacija alata i brzina translacije**

Prilikom zavarivanja, alat poseduje dve brzine koje se uzimaju u obzir. Radi se o brzini rotacije alata i brzini njegove translacije duž zavara. Ova dva parametra su od bitnog značaja te se moraju birati vrlo pažljivo ako se želi ostvariti uspešan i kvalitetan proces zavarivanja. Veza između ove dve brzine i nastanka toplote u zavaru je vrlo kompleksna, no uopšteno gledano, smatra se da povećanje ove dve brzine dovodi do većeg zagrevanja zavara. U cilju pravilnog zavarivanja, neophodno je da materijal u zavaru i njegovoj okolini postigne dovoljnu visoku temperaturu koja će ga dovesti u stanje plastičnog tečenja koji je potreban za minimizaciju sila koje deluju na alat. Pored toga, ako materijal ima prenisku temperaturu, u zavaru mogu nastati šupljine i druge nehomogenosti, a materijal ispred alata može usled očvršćavanja zbog plastične deformacije postići tako visoku čvrstoću tako da može doći čak i do loma alata. Sa druge strane, previsok nivo toplotnih delovanja u zavaru može imati drastične posledice po zavar. Postoji velika mogućnost za nastajanje novih faza u materijalu koje imaju značajno drugačije osobine od osnovnog materijala, zbog čega se znaju pojaviti prsline karakteristične za neke konvencionalne metode spajanja materijala zavarivanjem. Zbog toga je kod ove tehnologije definisan određeni opseg parametara izvan koga se ne sme izaći. Unutar tog opsega nalaze se kombinacije parametara koje daju zadovoljavajuće rezultate u postizanju zahtevanih toplotnih delovanja.

#### **3.2. Nagib alata i dubina prodiranja "ramena"**

Dubina prodiranja „ramena“ alata predstavlja dubinu između slobodne površine materijala i najniže tačke koju dostiže rame alata. Ovo je jedan od kritičnih parametara ove vrste zavarivanja. Veća dubina prodiranja podiže pritisak ispod alata i osigurava adekvatnu raspodelu omekšanog materijala iz alata. Naginjanjem alata unazad za 2 - 4 ° postiže se da je zadnji kraj alata niži od prednjeg, čime se takođe značajno povećavaju vrtložne pojave iz alata. Pravilnim izborom dubine prodiranja ramena alata ostvaruje se potrebni pritisak i dobro mešanje materijala. Problem mogu nastati kod visokih zadatih vrednosti pritiska, što često dovodi do elastičnog pomeranja alata sa posledicom nedovoljne dubine prodiranja kao i do njene neujednačenosti. U cilju rešavanja ovog problema izrađuju se alati koji imaju dužinske kompenzatore koji obezbeđuju konstantan pritisak na materijal kao i ujednačenu dubinu prodiranja.

#### **3.4. Delovanje sila prilikom zavarivanja**

Tokom zavarivanja, na alat deluje niz različitih sila:

- sila pritiska je potrebna za zadržavanje pravilnog položaja alata na i u materijalu.
- translatorna sila djeluje paralelno pravcu zavarivanja i ima isti smer kao i translatorno kretanje alata. Pošto ova sila povećava otpor materijala, očekuje se njeno smanjivanje ako se temperatura zavara poveća.
- obrtni moment ima zadatak da obrće alat, a njegov iznos zavisi od sile pritiska kao i od koeficijenta trenja materijala (dinamičko trenje) kao i čvrstoće materijala.

#### **3.5. Tečenje materijala**

Rani radovi na ispitivanju toka materijala oko alata vršeni su tako što su u materijale koji su se spajali dodavane legure različite boje, što je omogućavalo da se posmatranjem pod mikroskopom prati tok materijala. Na ovaj način se moglo utvrditi i istražiti kretanje



materijala u odnosu na alat. Dobijeni rezultati su tumačeni na sledeći način: alat, omekšani materijal vara i bazni elementi koje spajamo predstavljali su neku vrstu komore za istiskivanje, iz koje je omekšani materijal bivao istiskivan rotacionim i translatorskim delovanjem alata. U ovom modelu se smatralo da alat povlači za sobom zanemarljivo malo materijala, dok u stvarnosti sam alat povlači materijal ispred sebe i ostavlja ga iza sebe. Dalje se smatralo da materijal omekšava samo zahvaljujući delovanju trna, te da nakon omekšavanja, on usled translatorskog kretanja alata izlazi iza alata, gde ga pritisak ramena sabija i on se hladi.

1. Novija istraživanja i teorije pokazali su značajniji uticaj kretanja materijala na nekim lokacijama uz alat. Ove teorije smatraju da deo materijala rotira oko trna – sasvim je sigurno da materijal izvrši jednu punu rotaciju oko trna, te da ovo kretanje uzrokuje lukovičasti izgled preseka jezgra zavara. Istraživanja, prilikom kojih je korišćeno i rendgensko snimanje, uključivala su i metod «zamrzavanja» alata, prilikom kojih je alat trenutno kočen usred postupka zavarivanja.

Najveća prednost ove druge teorije je to što zadovoljavajuće objašnjava nastanak lukovičastih struktura unutar jezgra zavara.

### 3.6. Nastanak i tok toplote

Za svaki metod zavarivanja je cilj postići što veću radnu brzinu kao i minimizaciju nastanka toplote pošto to povećava produktivnost mi smanjuje uticaj postupka zavarivanja na mehaničke osobine materijala u blizini spoja. Međutim, u isto vreme, toplota je neophodna pošto tek ona omogućava pravilan tok materijala i homogenizaciju zavara. Kada se poveća brzina translacije alata, a spreči se nastanak dodatne količine toplote, skraćuje se vreme zavarivanja, čime toplota ima manje vremena da se koncentriše ispred alata te se značajno povećavaju termički gradijenti. Međutim, pri nekoj dovoljno velikoj brzini translacije alata, materijal ispred njega postaje previše hladan, što će odmah dovesti do loma alata.

Ciklus zavarivanja može se podeliti u nekoliko faza, tokom kojih će termički profili biti različiti:

- Omekšavanje:  
Materijal se predgreva alatom koji samo rotira, ne krećući se, čime se obezbeđuje postizanje dovoljno visoke temperature ispred alata. U ovom periodu se vrši i utiskivanje trna u materijal.
- Tranzitno zagrevanje  
Kada alat otpočne translatorsno kretanje, nastupa period tranzicije toplote u kojem se ona rasipa i temperatura delimično opada, pre nego što se postigne pseudostatičko toplotno stanje.
- Pseudostatičko stanje  
Iako u materijalu dolazi do jakih fluktuacija, termička polja oko alata su približno nepromenljivog karaktera (posmatrano na mikorskom nivou).
- Poststatičko stanje  
Na kraju linije zavarivanja, toplota biva reflektovana od kraja ploča koje spajamo, što dovodi do dodatnog zagrevanja alata i zavara u njegovoj blizini.

Proizvodnja toplote prilikom zavarivanja trenjem sa trnom nastaje iz dva glavna razloga: trenja materijala između površina radnih predmeta i alata i deformisanja materijala oko trna i ramena alata. Često se uzima da većina toplote nastaje upravo ispod ramena alata, usled velike dodirne površine između alata i materijala. Uslovi ispod ramena alata mogu se opisati kao dinamičko trenje klizanja, uzimajući u obzir koeficijent trenja  $\mu$  pritisak između površina  $p$ .

#### 4. ANALITIČKI METOD ODREĐIVANJA GENERISANE TOPLOTE

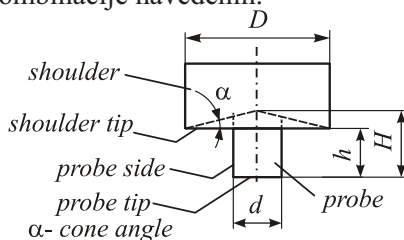
Može se pretpostaviti da je ukupna količina generisane toplote dobijena usled trenja koje se javlja pri kontaktu alata i delova koji se zavaruju. Može se konstatovati da količina generisane toplote poseduje dve komponente: deformacionu (*deformation, sliding*) i adhezionu (*adhesion, sticking*):

$$Q = Q_{adhesion} + Q_{deformation} \cdot Q_{adhesion} = Q_{sliding}; \quad Q_{deformation} = Q_{sticking} \quad (1)$$

Sa druge strane, ukupna količina generisane toplote  $Q$  generisana dejstvom cilindričnog alata se može izraziti kao suma toplote generisana na čelu trna (*probe tip surface*)  $Q_{pt}$ , boku trna (*probe side surface*)  $Q_{ps}$  i „pod šeshirom“ alata (*shoulder tip surface*)  $Q_{st}$ .

$$Q = Q_{pt} + Q_{ps} + Q_{st} \quad (2)$$

Kao što je ranije napomenuto, toplota se generiše tokom dva osnovna tribološka procesa koji nastaju pri kontaktu alata i delova koji se zavaruju: čisto klizanje – adhezija i čisto „čupanje“ deformacija. Stanje čistog klizanja je potpuno objašnjeno kao Coulomb – ovo trenje uz pretpostavku da su pritisak između alata i delova  $p$  i koeficijent trenja  $\mu$  konstantni ili linearno zavisne promenljive više drugih promenljivih. Čisto deformisanje podrazumeva „čupanje“ slojeva omekšalog materijala i uniformnost tangencijalnih napona (smicanja)  $\tau$  koji se javljaju pri „čupanju. Na žalost, realna situacija je najčešće znatno složenija i ne dešava se ni jedan „čist“ postupak već postoje kombinacije navedenih.



Slika 8

Slika 8 prikazuje osnovni oblika alata koji se primenjuje pri zavarivanju FSW.

Do osnovnih jednačina (na osnovu slike 8 i pretpostavki navedenih ranije), za generisanu količinu toplote došlo se na osnovu izraza:

$$dQ = \omega \cdot dM [J] \quad (3)$$

pri čemu je:

$\omega$  – ugaona brzina alata,  $\text{rad}^{-1}$

$dM$  – obrtni moment alata, Nm.

Ukoliko se obrtni moment zameni proizvodom obimne sile  $dF$  i rastojanja u radijalnom pravcu  $r$ , a obimna sila se zameni proizvodom napona smicanja  $\tau$  i beskonačno male posmatrane površine materijala  $dA$ , jednačina generisane toplote postaje:

$$dQ = \omega \cdot r \cdot \tau \cdot dA. \quad (4)$$

Primena jednačine (3) uz razmatranje stanja deformacije (*sticking*) i klizanja (*sliding*) daje jednačine po kojima se može odrediti količina toplote na pojedinačnim površinama alat:

Površina čela „šesira“ (*shoulder tip*):

$$\text{sticking} \quad (5)$$

$$Q_{st} = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \tau \cdot \omega \cdot \left[ \left( \frac{D}{2} \right)^3 - \left( \frac{d}{2} \right)^3 \right] \cdot (1 + \tan \alpha)$$

sliding

$$Q_{st} = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \mu \cdot p \cdot \omega \cdot \left[ \left( \frac{D}{2} \right)^3 - \left( \frac{d}{2} \right)^3 \right] \cdot (1 + \tan \alpha) \quad (6)$$

gde je  $\alpha$  - ugao konusa „šesira“.

Površina čela klina (probe tip surface):

sticking

$$d < d_0 \quad Q_{pt} = 0$$

$$d = d_0 \quad Q_{pt} \approx 0$$

(7)

$$d > d_0 \quad Q_{pt} = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \tau \cdot \omega \cdot \left[ \left( \frac{d}{2} \right)^3 - \left( \frac{d_0}{2} \right)^3 \right]$$

Sliding

$$d < d_0 \quad Q_{pt} = 0$$

$$d = d_0 \quad Q_{pt} \approx 0$$

(8)

$$d > d_0 \quad Q_{pt} = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \mu \cdot p \cdot \omega \cdot \left[ \left( \frac{d}{2} \right)^3 - \left( \frac{d_0}{2} \right)^3 \right]$$

Površina boka klina (probe side surface):

Sticking

$$Q_{ps} = \theta \cdot \tau \cdot \omega \cdot \left( \frac{d}{2} \right)^2 \cdot H, \quad \theta = 0 \div 2\pi \quad (9)$$

Sliding

$$Q_{ps} = \theta \cdot \mu \cdot p \cdot \omega \cdot \left( \frac{d}{2} \right)^2 \cdot H, \quad \theta = 0 \div 2\pi \quad (10)$$

gde je  $\theta$  - obuhvatni ugao alata.

Pokušaj objašnjenja realne situacije (stanje deformacije i klizanja, bez prideva „čisto“), kao i brojni eksperimenti u svetu, pokazali su da se stanje „delimičnog klizanja“ i „delimične deformacije“ mogu opisati konstantom stanja  $\delta$ . Ona, fizički posmatrano, predstavlja odnos brzine čestica „iščupanog materijala“ na površini  $v_{cp}$  i brzine alata  $v_{\omega}$ .

$$\delta = \frac{v_{cp}}{v_{\omega}} \quad (11)$$

Kako je veoma teško izmeriti brzinu kretanja čestica, konstanta stanja se određuje eksperimentalno. Stanje čiste deformacije je definisano za  $\delta=1$ , čisto klizanje za  $\delta=0$  a kombinacija oba stanja za  $0 < \delta < 1$ .

Prema tome, ukupna količina generisane toplote od deformacione i adhezione komponente je:

$$Q = \delta \cdot Q_{sticking} + (1 - \delta) \cdot Q_{sliding} \quad (12)$$

Očekivana preciznost navedenih jednačina je zadovoljavajuća jer analitički izračunata količina toplote u odnosu na izmerenu, prilikom eksperimenta, daje grešku ispod 12%.

## 5. ZAKLJUČAK

Zavarivanje trenjem je nekonvencionalna metoda zavarivanja koja se zasniva na pojavi difuzije na površini dodira dva materijala koji se međusobno relativno kreću. Izuzetno visok kvalitet nastalih spojeva, minimalna termička naprezanja, mogućnost spajanja sasvim različitih materijala, samo su neke od prednosti ove metode. Međutim, potreba za specijalnom opremom i visoka cena iste, kao i bitna ograničenja koja se tiču dimenzija obradaka uslovljenih dimenzijama mašina, dovode do toga da se ova metoda koristi uglavnom samo u specijalne svrhe, posebno tamo gde se traži visok kvalitet spoja bez nuspojava usled termičkog delovanja. Pored svih svojih prednosti, ova metoda usled tih ograničenja nije našla širu primjenu u industriji, ali ima veliki značaj u specijalizovanoj i maloserijskoj proizvodnji.

## REFERENCE

- [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) 143-157.
- [2] Song, M., Kovačević, R. Numerical and experimental study of the heat transfer process in friction stir welding. *Journal Engineering Manufacture*, vol. 217 Part B.
- [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] Ulysse, P. (2002) Three-dimensional modeling of the friction stir-welding process. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 42, str. 1549-1557.
- [5] Arbegast, J.W. (2006) Friction stir welding after a decade of development. *Welding Journal*.
- [6] Stamenković D, Đurđanović M, Mitić D.: ZAVARIVANJE POSTUPKOM FSW, "Zavariva-nje i zavarene konstrukcije", godina LI, 2006, br. 2, st.59–66.
- [7] Shigley, J.E., Mischke, C.R., *Mechanical Engineering Design*, Fifth Edition, McGraw-Hill, Inc, 1989, ISBN 0-07-056899-5.
- [8] 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).
- [9] H. Schmidt, J. Hattel: Thermal modeling of friction stir welding *Scripta Materialia*, Volume 58, Issue 5, Pages 332-337.
- [10] Friction stir welding – Wikipedia, the free encyclopedia, (2006).