

DUZS - Društvo za unapređivanje zavarivanja u Srbiji

ZBORNİK RADOVA

SAVETOVANJE ZAVARIVANJE

2016

Srebrno jezero, 14-17. septembar 2016

Priredio:
Branislav Lukić

Kompjuterska priprema:
Vojislav Simić

Izdavač:
DUZS
Društvo za unapređivanje zavarivanja u Srbiji
Grčića Milenka 67, Beograd

Beograd, septembar 2016

IMPRESSUM

NASLOV: ZBORNIK RADOVA - SAVETOVANJE ZAVARIVANJE 2016

UREDNIK: Branislav Lukić, dipl. inž.maš.

IZDAVAČ: DUZS - Društvo za unapređivanje zavarivanja u Srbiji, Grčića Milenka 67, Beograd

ŠTAMPA/UMNOŽAVA: AŠKOVIĆ STUDIO Beograd

TIRAŽ: 150 primeraka

ISBN broj: 978-86-82585-12-1

KOMPJUTERSKA PRIPREMA: Vojislav Simić

NAUČNO-STRUČNI ODBOR "ZAVARIVANJE 2016":

Milica Antić, dipl.ing.

Porf.dr. Katarina Gerić

Dr Vencislav Grabulov - predsednik Odbora

Prof. dr Vukić Lazić

Prof. dr Dragan Milčić

Dr Zoran Odanović

Prof. dr Radica Prokić-Cvetković

Prof. dr Nenad Radović

Prof. dr Aleksandar Sedmak

CIP - Каталогизација у публикацији - Народна библиотека Србије,
Београд

621.791(082)(0.034.2)

САВЕТОВАЊЕ Заваривање (2016 ; Сребрно језеро)

Zbornik radova [Elektronski izvor] / Savetovanje Zavarivanje 2016,
Srebrno jezero, 14-17. septembar 2016 ; priredio Branislav Lukić. -
Beograd

: Društvo za unapređivanje zavarivanja u Srbiji, 2016 (Beograd :
Ašković studio). - 1 USB fleš memorija ; 6 x 9 cm (u obliku kartice)

Sistemska zahtevi: Nisu navedeni. - Nasl. sa naslovne strane
dokumenta. -

Tiraž 150. - Bibliografija uz većinu radova. - Abstracts ; Apstrakti.

ISBN 978-86-82585-12-1

a) Заваривање - Зборници

COBISS.SR-ID 225785612

IMPRESSUM	2
NAUČNO-STRUČNI ODBOR "ZAVARIVANJE 2016":.....	2
I KONVENCIONALNI I NEKONVENCIONALNI POSTUPCI ZAVARIVANJA	7
I.1 ZAVARIVANJE CIJEVNIH SISTEMA U KOTLOGRADNJI WELDING OF TUBE/PIPE SYSTEMS IN BOILER PRODUCTION B. Despotović („Đuro Đaković“-Tep, Slavonski Brod, Hrvatska) i I. Samardžić, T. Marsenić	8
I.2 UTICAJ PREGREVANJA OSNOVNOG MATERIJALA I METALA ŠAVA, TOKOM ZAVARIVANJA TRENJEM SA MEŠANJEM, NA EFIKASNOST ZAVARENOG SPOJA THE INFLUENCE OF OVERHEATING OF FRICTION STIR WELD’S BASE MATERIAL AND WELD ON WELD’S EFFICIENCY M. Mijajlović (Mašinski fakultet, Niš)	21
I.3 ANALIZA UTICAJA VREMENA TRENJA NA OBLIK SPOJA I MIKROSTRUKTURU ZONE MEŠANJA PRI ZAVARIVANJU TRENJEM RAZLIČITIH ČELIKA ANALYSIS OF INFLUENCE OF FRICTION TIME ON WELDED JOINT SHAPE AND MICROSTRUCTURE OF MIXING ZONE DURING FRICTION WELDING OF DIFFERENT STEELS N. Ratković (Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac) i V. Lazić, D. Arsić	28
I. 4 NAPREDNE TEHNOLOGIJE ZAVARIVANJA – ZAVARIVANJE MODIFIKOVANIM LUKOM ADVANCED WELDING TECHNOLOGIES – MODIFIED ARC WELDING R. Jovičić (Inovacioni centar Mašinskog fakulteta, Beograd) i D. Pavlović, B. Zrilić, N. Pantelić, J. Markež.....	35
I. 5 PREGLED UTICAJA PARAMETARA FSW PROCESA NA UPOTREBLJIVOST NUMERIČKOG MODELA OVERVIEW OF INFLUENCE OF FSW PARAMETERS ON NUMERICAL MODEL USABILITY P. Tasić (Mašinski fakultet, Sarajevo, BIH) i I. Hajro.....	44
I.6 UNAPREĐENJE PROCESA NAVARIVANJA LEGURA KOBALTA PRIMENOM NANO ČESTICA IMPROVEMENT OF HARDFACING PROCESS OF COBALT BASED ALLOYS USING NANOPARTICLES S. Baloš (Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad) i P. Janjatović, M. Dramićanin, D. Labus Zlatanović, L. Šidanin, S. Tomić.....	52

I.7	ADAPTIVNA REGULACIJA PROCESA OTPORNOG TAČKASTOG ZAVARIVANJA AUTOMOBILSKOJ INDUSTRIJI ADAPTIVE REGULATION OF RESISTANCE SPOT WELDING PROCESS IN AUTOMOTIVE INDUSTRY M. Uran (Institut za varilstvo, Ljubljana, Slovenija i Beograd Srbija) i M. Jovanović	60
I.8	STANJE I TRENDOVI U RAZVOJU PODVODNOG ZAVARIVANJA STATE OF THE ART AND TRENDS IN DEVELOPMENT OF UNDERWATER WELDING S. Kralj (Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, Hrvatska) i I. Garasic, Z. Kožuh, J. Eržišnik	70
II OSNOVNI, DODATNI I POMOĆNI MATERIJALI.....		81
II.1	MIG/MAG ZAVARIVANJE PRIMJENOM AKTIVIRAJUĆEG TOPITELJA MIG/MAG WELDING WITH ACTIVATION FLUX A.M. Savickii (E.O. Paton Welding Institute, Kiev, Ukraina) i M.M. Savickii, D. Bajic	82
II.2	METODE ZA IZRAČUNAVANJE TEMPERATURA PREDGREVANJA PRI ZAVARIVANJU ČELIKA POVIŠENE I VISOKE ČVRSTOĆE METHODS FOR CALCULATING THE PREHEAT TEMPERATURE WELDING THE HIGH STRENGTH STEELS R. Jovičić (Inovacioni centar Mašinskog fakulteta, Beograd) i R. Prokić-Cvetković, O. Popović, N.Milošević.....	91
II.3	DEFINISANJE PARAMETARA ZAVARIVANJA POMOĆU VREMENA HLADENJA U INTERVALU TEMPERATURA 800 – 500°C DEFINITION OF WLEDING PARAMETERS BY COOLING TIME IN TEMPERATURE RANGE 800-500°C R. Jovičić (Inovacioni centar Mašinskog fakulteta, Beograd) i O. Erić Cekić, S. Petronić, S. Štrbački, D. Jovičić.....	101
II.4	ZAVARIVANJE PANCIRNOG ČELIKA VISOKE TVRDOĆE WELDING OF HIGH HARDNESS ARMOUR STEEL A. Čabrilo (Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad) i K. Gerić.....	111
II.5	KOEFICIJENT SLABLJENJA ZAVARENOG SPOJA NODULARNOG LIVA THE COEFFICIENT OF WEAKENING WELDED JOINT DUCTILE IRON L. Brestovački (Cobalt doo, Bačka Palanka)	120
II.6	KARAKTERIZACIJA SUČEONO ZAVARENOG SPOJA NODULARNOG LIVA I VISOKOMANGANSKOG ČELIKA MAG POSTUPKOM ZAVARIVANJA CHARACTERIZATION OF BUT WELD JOINTS DUCTILE IRON AND HIGH MANGANESE STEEL WITH GMAW WELDING PROCESS L. Brestovački (Cobalt doo, Bačka Palanka)	127

II.7	NEKI EFEKTI UVOĐENJA AZOTA U ARGON ZAŠTITNI GAS KOD TIG ZAVARIVANJA NERĐAJUĆIH ČELIKA SOME EFFECTS OF THE NITROGEN INTRODUCTION IN ARGON SHIELDING GAS IN TIG WELDING OF STAINLESS STEELS B. Alić (Metalurški institut „Kemal Kapetanović“, Zenica, BIH) i S. Pašić, E. Džihó	141
II.8	KOROZIONO PONAŠANJE AlMgMn LEGURE ZAVARENE POSTUPKOM TRENJEM ALATOM ORROSION BEHAVIOR OF FRICTION STIR WELDED AlMgMn ALLOY Lj. Radović (Vojnotehnički institut, Beograd) i I. Radisavljević, M. Bučko	150
II.9	MEHANIČKA I STRUKTURNA SVOJSTVA SPOJEVA OD RAZNORODNIH ALUMINIJUMSKIH LEGURA ZAVARENIH FSW POSTUPKOM MECHANICAL AND STRUCTURAL PROPERTIES OF FRICTION STIR WELD OF DISSIMILAR ALUMINUM ALLOYS I. Radisavljević (Vojnotehnički institut, Beograd) i A. Živković, N. Radović, V. Grabulov	160
III INTEGRITET KONSTRUKCIJA I OSIGURANJE KVALITETA...170		
III.1	KONCENTRACIJA NAPONA U ZAVARENOM SPOJU SA JEDNOSTRANIM UZDUŽNIM REBROM STRESS CONCENTRATION IN WELDED JOINT WITH ONE-SIDED LONGITUDINAL ATTACHMENT Z. Perović (Mašinski fakultet, Podgorica, Crna Gora) i K. Anđelić	171
III.2	ANALIZA TRENUTNOG STANJA I OCENA ČVRSTOĆE CEVOVODA NA HIDROELEKTRANI PIROT ANALYSIS OF CURRENT STATE AND STRENGTH EVALUATION OF THE PIPELINE AT HYDRO POWER PLANT 'PIROT' M. Arsić (Institut za ispitivanje materijala, Beograd) i V. Grabulov, M. Mladenović, Z. Savić	176
III.3	EKSPERIMENTALNO MERENJE ZAOSTALIH NAPONA U NAVARENIM SLOJEVIMA KOD TERMOPOSTOJANOG ČELIKA EXPERIMENTAL MEASURING OF RESIDUAL STRESSES IN HARD FACED LAYERS OF THE HOT WORK TOOL STEEL V. Lazić (Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac) i D. Arsić, M. Zrilić, S. Aleksandrović, M. Đorđević, N. Ratković	185
III.4	SANACIJA ZAVARIVANJEM PRSLINA SFERNOG REZERVOARA ZA ETILEN WELDING REPAIR OF CRACKS ON SPHERICAL TANK FOR ETHYLENE STORAGE D. Mitić (NIVAR DOO, Niš) i M. Ristić	196

III.5	OPTIMIZACIJA PROCESA NAVARIVANJA VUČNIH SEGMENTATA NA BAGERU ERS-1000/25 SURFACING PROCESS OPTIMISATION OF TENSILE SEGMENTS ON EXCAVATOR ERS-1000/25 M. Tošanić (RB Kolubara, Lazarevac) i N. Radović	205
III.6	ISKUSTVA U PROCJENI I ASPEKTI INTEGRITETA ZAVARENIH ČELIČNIH REZERVOARA ASSESSMENT EXPERIENCES AND INTEGRITY ASPECTS OF WELDED STEEL TANKS I. Hajro (Mašinski fakultet, Sarajevo, BIH) i P. Tasić.....	214
III.7	ANALIZA LOMA ZAVRTNJEVA IZMENJIVACA TOPLOTE HEAT EXCHANGER BOLTS FAILURE ANALYSIS M. Ristić (Institut Goša, Beograd) i M. Prvulović, M. Prokolab, I. Vasović, Z. Milutinović	224
III.8	UTICAJ PROMENLJIVOG OPTEREĆENJA NA INTEGRITET ZAVARENOG SPOJA MIKROLEGIRANOG ČELIKA INFLUENCE OF FATIGUE LOAD WITH INTEGRITY OF WELDED JOINT ON MICRO ALLOYED STEEL Z. Burzić (Vojnotehnički institut, Beograd) i M. Manjgo, M. Burzić, V. Grabulov, S. Perković	232
IV	TEHNIČKA REGULATIVA, OBRAZOVANJE, EKOLOGIJA I ZAŠTITA	242
IV.1	NEW PRESSURE DIRECTIVE 2014/68/EU IN SLOVENIA U. Zupanc (Institut za varilstvo, Ljubljana, Slovenija) i M. Jovanović, A. Intihar, M. Uran	243
IV.2	VIRTUELNI SIMULATOR ZAVARIVANJA – TRENING METOD 21. VEKA U OBUCI ZAVARIVAČA VIRTUAL WELDING SIMULATOR - THE 21 ST CENTURY WELDING TRAINING METHOD M. Milčić (Mašinski fakultet, NIŠ) i D. Milčić, M. Mijajlović, N. Zdravković.....	244
IV.3	ŽILAVOST ZAVARENOG SPOJA KAO ASPEKT PRIHVATLJIVOSTI KVALIFIKACIJE TEHNOLOGIJE ZAVARIVANJA NA PRIMERU ČELIKA P91 THE IMPACT TOUGHNESS OF WELDED JOINT AS WELDING PROCEDURE QUALIFICATION ACCESSABILITY ASPECT ON STEEL P91 EXAMPLE S. Dikić (KONTROL-INSPEKT d.o.o. Beograd) i M. Antić	256

I

**KONVENCIONALNI I
NEKONVENCIONALNI POSTUPCI
ZAVARIVANJA**

UTICAJ PREGREVANJA OSNOVNOG MATERIJALA I METALA ŠAVA, TOKOM ZAVARIVANJA TRENJEM SA MEŠANJEM, NA EFIKASNOST ZAVAREN OG SPOJA

THE INFLUENCE OF OVERHEATING OF FRICTION STIR WELD'S BASE MATERIAL AND WELD ON WELD'S EFFICIENCY

Miroslav Mijajlović¹

¹ Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija

E-mail: mijajlom@masfak.ni.ac.rs

Rezime:

Prva faza u osvajanju i optimizaciji postupka zavarivanja trenjem sa mešanjem jeste prepoznavanje i odabir tehnoloških parametara postupka koji dovode do zavarenog spoja bez nesavršenosti ili sa nesavršenostima koje su dozvoljene standardima. Međutim, tokom praktične upotrebe postupka, pokazalo se da postoji više od jedne kombinacije tehnoloških parametara koja vodi ka kvalitetnom zavarenom spoju, ali se svaka od kombinacija odlikuje različitim mehaničkim osobinama zavarenog spoja. U ovom radu je prikazan uticaj pregrevanja osnovnog materijala, pre i tokom trajanja zavarivanja, kao i uticaj pregrevanja metala šava tokom zavarivanja, na efikasnost zavarenog spoja i uniformnost mehaničkih osobina spoja. Eksperimentalno istraživanje je pokazalo da je važno poznavanje i upravljanje termičkim procesima koji su izazvani tokom zavarivanja – nekad je pregrevanje neophodno radi poboljšanja efikasnosti spoja a nekad je od izuzetne važnosti pregrevanje izbeći ili umanjiti kako bi spoj uopšte nastao.

Ključne reči: Zavarivanje trenjem sa mešanjem, pregrevanje, efikasnost zavarenog spoja, ugaoni spoj

Abstract:

The first phase of the friction stir welding optimization process is the recognition and the selection of technological parameters of the process leading to the imperfection's free or acceptable performance imperfections. However, during the practical use of the process, it has been shown that there is more than one combination of technological parameters, which leads to high-quality welded joint, but each characterized by different combinations of mechanical properties of welded joints. This paper presents the impact of overheating of the base material before and during the welding, and the impact of overheating of the weld metal during welding on welded joint efficiency and uniformity of mechanical properties of the weld. Experimental research has shown that it is very important to understand and properly manage thermal processes caused by welding – sometimes is overheating necessary to the efficacy of the weld and sometimes is of utmost importance to avoid or reduce overheating in order to create welds.

Key words: Friction stir welding, Overheating, Weld's efficiency, Filet weld

1. UVOD

U „industriji letelica” (avio i svemirska industrija) primena „lakih konstrukcija” se podrazumeva i obuhvata upotrebu lakih materijala, izbor konstruktivnih rešenja koja imaju minimalnu masu a potrebnu nosivost, odnosno, najpovoljniji odnos mase i nosivosti (gde nosivost može da ima različite oblike, pa je odnos npr. kg/N, kg/Nm, kg/MPa, kg/W, kg/J isl. ali i kg/€).

Aluminijum i njegove legure su u upotrebi kod letelica gotovo od samog početka masovne proizvodnje aviona. U upotrebi su legure iz svih serija za različite namene, oblike i spojeve [1].

Kada su u pitanju spojevi, prvobitno su, kao najbezbedniji postupak formiranja spojeva, korišćene zakovane veze tokom druge polovine dvadesetog veka. Čelične zakovice su obezbeđivale da odnos nosivosti spoja i nosivosti osnovnog materijala (efikasnost spoja) bude 100%. U isto vreme, primena zakovica povećava masu čitavog spoja u odnosu na masu osnovnog materijala u proseku za 40%. Sa razvojem i napredovanjem tehnologija zavarivanja aluminijuma i aluminijumovih legura topljenjem od polovine dvadesetog veka, zakovani spojevi su lagano potiskivani iz upotrebe: masa spoja dobijene zavarivanjem je veća za samo 5% do 10% od mase osnovnog materijala ali je efikasnost zavarenog spoja ispod 100% – u nekim slučajevima je efikasnost zavarenog spoja samo 10% do 20% zbog pada efikasnosti osnovnog materijala u zoni uticaja toplote (ZUT-u). Sa razvojem legura titanijuma i primenom titanijuma za izradu zavrtnjeva, spojevi kod lakih konstrukcija su formirani grupnim zavrtnajskim vezama. Time je efikasnost spojeva podignuta na granicu od 98% do 100%, ali je i masa spoja povećana 10% do 20% u odnosu na osnovni materijal. Tokom osamdesetih godina dvadesetog veka su kod letelica postali popularni zalepljeni spojevi – masa konstrukcije je za 1% veća od mase osnovnog materijala ali efikasnost spoja direktno zavisi od lepka i varira od 20% do 100%. Kao poseban problem se pojavila postojanost i integritet konstrukcija – lepak na niskoj temperaturi, u zoni pojačanog ultraljučičastog zračenja ili u bezvazдушnom prostoru, oko 3 puta brže stari te su se i osobine spoja brže pogoršavaju nego kod zakovanih, zavrtnajskih ili zavarenih spojeva [1].

Trenutno se najčešće primenjuju kombinovane konstrukcije čiji spojevi se formiraju zavarivanjem, zavrtnjevima i lepljenjem. Time se postižu optimalni odnosi mase konstrukcije i efikasnosti zavarenog spoja.

Sa pronalaskom postupka zavarivanja trenjem sa mešanjem utvrđeno je da je ovim postupkom moguće zavarivati legure aluminijuma koje su nezavarive postupcima zavarivanja topljenjem a često se primenjuju kod letelica, i da pri tom ne dođe do pada čvrstoće u ZUT-u, odnosno, efikasnost spoja ostane visoka.

Uz oblik i tip alata, brzina zavarivanja i broj obrtaja alata (uz još nekoliko drugih parametara) predstavljaju osnovne parametre zavarivanja kojima se definišu kvalitet i osobine zavarenog spoja. Poslednja istraživanja pokazuju da je jedan od parametara koji utiču na kvalitet i efikasnost zavarenog spoja, temperatura. Pregrevanje osnovnog materijala i metala šava vodi ka degradaciji čvrstoće metala šava i materijala u ZUT-u te je upravljanje procesima generisanja i odvođenja toplote važno za ostvarivanje maksimalnih osobina zavarenog spoja.

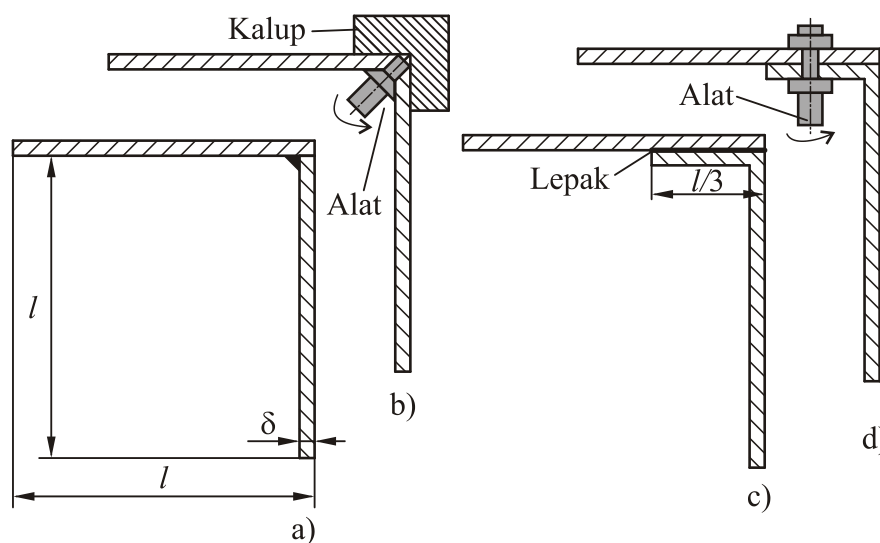
Toplotom, koja nastaje pri ZTM, se najlakše upravlja podešavanjem broja obrtaja alata, brzine zavarivanja i vremenom zastoja pre početka faze zavarivanja. Alat koji stoji u mestu (tokom faze zavarivanja) generiše toplotu na jednom mestu koja delom putuje kroz osnovni metal, a delom odlazi u okolinu.

U ovom radu biće reči o eksperimentalnom istraživanju ZTM postupka na ugaonom spoju ploča od Al 2024T3, i ispitivanju efikasnosti spoja dobijenog sa različitim dužinama trajanja vremena zastoja.

2. ZTM UGAONI SPOJEVI

Od svih spojeva koji se javljaju kod letelica, ugaoni spojevi ili preklopni spojevi, koji imitiraju ugaone spojeve na limovima, predstavljaju najbrojniju grupu – 65% svih spojeva. Preklopni spojevi se koriste kada su osnovni vezivni elementi zakovice, zavrtnjevi, lepak ili se spoj formira ZTM alatom u obliku kalema.

Razlog primene ovih spojeva je činjenica da su brojni delovi letelica najčešće limovi velike dužine koji su prvobitno spajani zakovicama ili zavrtnjevima. Naknadno su, radi umanjenja mase, takvi spojevi lepljeni ili su kombinovani zavrtnjevi i lepak. Kako je postojanje preklopa, zbog postojanja preklopne dužine lima, povećanje mase spoja za približno 15%, ugaoni spojevi su prihvatljivije rešenje sa aspekta smanjenja mase.



Slika 1 Spojevi na limovima ostvareni: a) ugaoni spoj dobijen TIG postupkom, b) ugaoni spoj dobijen ZTM postupkom sa kalupom, c) zalepljeni preklopni spoj, d) preklopni spoj dobijen ZTM postupkom sa alatom u obliku kalema

Sa druge strane, za izradu kvalitetnog ugaonog spoja na tankim limovima od aluminijuma je neophodna primena TIG postupka, koji je sam po sebi skup, zahteva kvalitetnu opremu, dobro obučenog zavarivača, proces zavarivanja traje dugo, pad čvrstoće u ZUT-u je neminovan. ZTM postupak na ugaonim spojevima na aluminijumovim legurama zahteva upotrebu alata sa konsunim ramenom kako bi alat mogao da priđe mestu spajanja ali je višestruko jeftiniji od TIG-a. Parametri zavarivanja kod ZTM postupka na ugaonim spojevima su isti kao kod sućeonog ili preklopnog postupka, ali je neophodna primena kalupa koji pomaže formiranje korena šava. Međutim, primena kalupa dovodi do koncentracije mase na mestu zavarivanja pa samim tim dolazi do sporijeg odvođenja toplote iz zone zavarivanja. Na slici 1 prikazano je nekoliko različitih postupaka za formiranje spojeva na tankim limovima – ZTM, TIG i zalepljeni spoj.

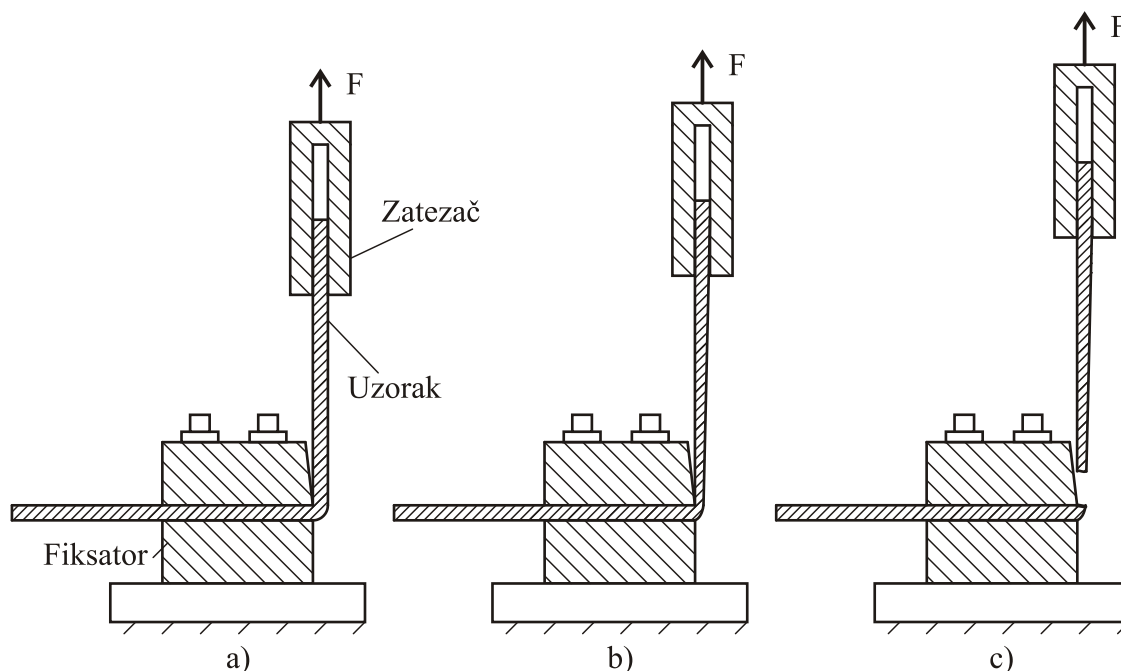
3. EKSPERIMENT

Postupkom ugaonog ZTM zavarene se ploče dužine 1100 mm, debljine $\approx 0,75$ mm, izrađene od legure aluminijuma Al 2024T3 [2], tako da je ostvarena dužina šava 950 mm. Zavarivanje je izvedeno sa kalupom za oblikovanje korena šava i sprečavanje nabiranja lima u

zoni dejstva alata. Broj obrtaja alata je ograničen na 490 min^{-1} a brzina zavarivanja na $2,44 \text{ mm/s}$.

Vreme predgrevanja osnovnog metala, odnosno, vreme prvog zastoja alata, predstavlja vreme koje alat stoji u startnoj poziciji i rotira. Vreme zastoja je uzeto 5 s, 10 s, 15 s, 20 s i 27 s. Tokom svih zavarivanja vršeno je merenje temperature alata i osnovnog metala.

Iz zavarenih ploča se isecaju uzorci širine 25 mm koji su iskorišćeni za „ispitivanje čupanjem” (slika 2). Čupanje predstavlja nestandardni postupak ispitivanja sa razaranjem gde se jedan deo uzorka učvršćuje u fiksatoru a drugi kraj uzorka se zatezačem opterećuje silom upravnom na fiksator. Spoj je u zoni deformisanja, u suštini, opterećen na zatezanje, a opterećivanje se vrši do kidanja materijala [3-7].



Slika 2 Ispitivanje epruvete na „čupanje”: a) inicijalni trenutak ispitivanja, b) plastično tečenje materijala, c) trenutak kidanja spoja

Prvo se izvrši ispitivanje uzorka dobijenog od savijenog osnovnog materijala kako bi se definisala efikasnost na čupanje osnovnog materijala preko sile. Potom se ponavlja postupak za epruvete dobijene iz zavarenog spoja, a odnos sile kidanja kod zavarenih uzoraka i uzoraka od osnovnog materijala predstavlja efikasnost spoja na čupanje. Ovako se definiše efikasnost ugaonog zavarenog spoja.

4. REZULTATI I DISKUSIJA

Tokom prvog pokušaja zavarivanja sa 5 s zastoja, šav nije formiran. Materijal koji je alat odsekao i pokrenuo se lepio za alat, mešao ga u monolitnu strukturu ali sa kavitacijama i neprovarenim krenom. Materijal koji je bio u zahvatu sa alatom se nije dovoljno zagrejao te nije bilo moguće formirati kvalitetan metal šava [8-9].

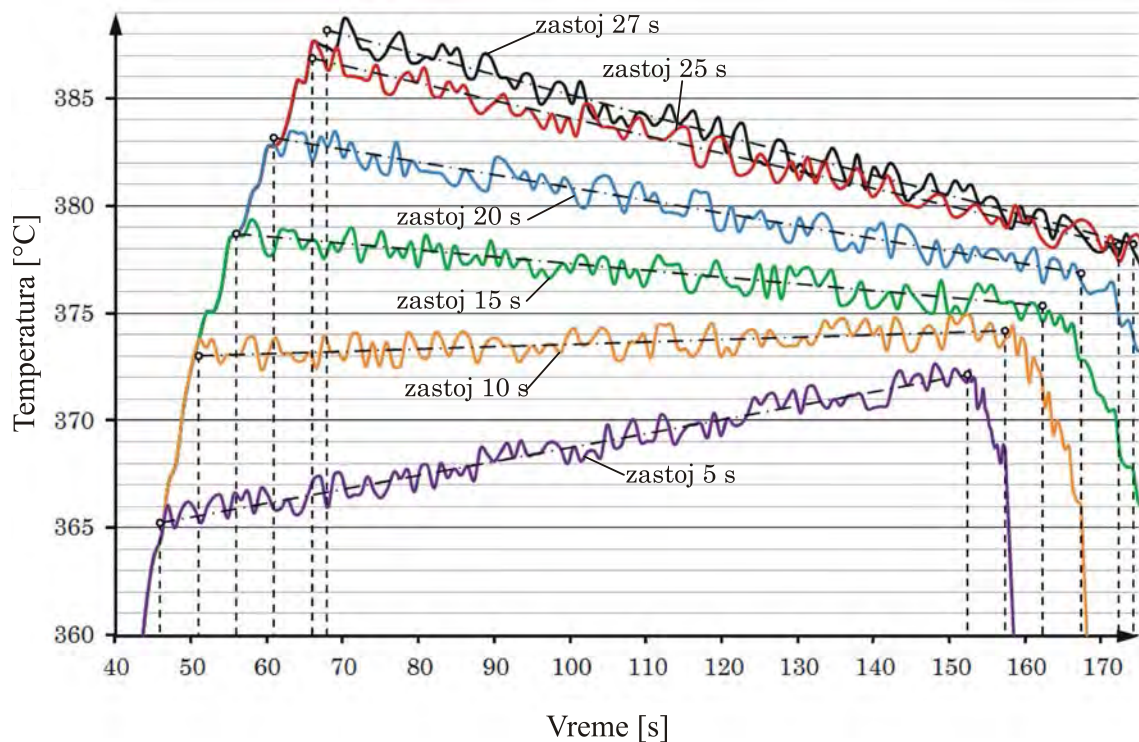
Za razliku od zavarivanja sa 5 s zastoja, pri zavarivanju sa vremenima zastoja od 10 s, 15 s, 20 s, 25 s i 27 s zavareni spojevi su bili bez grešaka ili sa greškama koje su prihvatljive.

Merenjem temperature alata tokom eksperimenata ustanovljeno je da tokom faze zastoja, temperatura alata raste i to tako da što je duže vreme zastoja, temperatura zagrevanja alata i radnih komada je viša (slika 3). Nakon toga temperatura alata tokom faze zavarivanja ima različite trendove za različita vremena zastoja. Za zavarivanje sa 5 s zastoja temperatura tokom

faze zavarivanja raste gotovo $12\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ s}$, dok za zavarivanje sa 10 s zastoja raste $2\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ s}$, zatim sa 15 s zastoja opada $2\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ s}$, sa 20 s zastoja opada $10\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ s}$ a sa 25 s i 27 s zastoja temperatura opada više od $20\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ s}$.

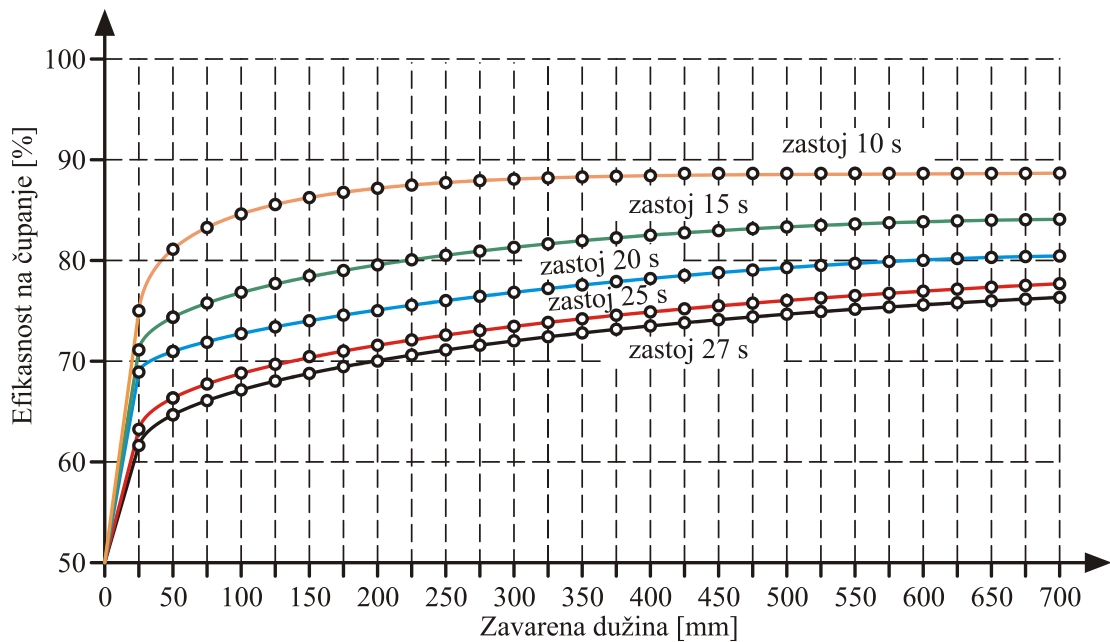
Tokom faze zavarivanje se očekuje da proces zavarivanja uđe u stacionarno stanje i da temperatura dostigne optimalnu vrednost brzo po početku faze zavarivanja.

Ploče i alat za zavarivanje u datoj konfiguraciji postaju pregrejane za vremena zastoja veća od 15 s i tokom faze zavarivanja, koja bi trebala da predstavlja stacionarnu fazu u procesu zavarivanja, odaju višak toplote okolini i kalupu za zavarivanje.



Slika 3 Temperatura alata tokom faze zavarivanja za različita vremena zastoja

Iz zavarenih komada su isečeni uzorci za čupanje koji su ispitani. Na slici 4 je prikazana efikasnost na čupanje svih ispitanih uzoraka za ranije definisana vremena zastoja.



Slika 4 Efikasnost zavarenog spoja u odnosu na trajanje zastoja i lokaciju uzorka iz zavarenog spoja

Kidanje uzoraka se u svim slučajevima dogodilo na granici jezgra – termomehanički deformisanog materijala i zone uticaja toplote.

Zapaženo je da je efikasnost maksimalna za minimalna vremena zastoja, odnosno, zavareni spojevi kod kojih nije došlo do pregrevanja tokom faze zastoja pa hlađenja tokom faze zavarivanja pokazuju bolju efikasnost spoja. Efikasnost kod ispitanih uzoraka raste sa udaljenjem od polazne tačke i dostiže više vrednosti kod spojeva sa kraćim vremenom zastoja. Takođe, efikasnost brže dostiže maksimum kod spojeva sa kraćim vremenima zavarivanja.

5. ZAKLJUČAK

Postupak zavarivanja trenjem sa mešanjem se uvek realizuje kroz najmanje dve faze: faze zastoja, odnosno, faze zagrevanja i faze zavarivanja, odnosno, faze formiranja zavarenog spoja. Faza zastoja predstavlja pripremnu fazu za samo zavarivanje: osnovni materijal i alat se zagrevaju, osnovni materijal omekšava kako bi se jednostavnije i uspešno izvršilo mešanje osnovnog materijala u šav. Na osnovu eksperimentalnih istraživanja ugaonih spojeva dobijenih ZTM postupkom, pokazano je da trajanje faze zastoja mora da bude što kraće iz nekoliko razloga:

Predugo trajanje faze zastoja dovodi do pregrevanja alata i osnovnog materijala što dovodi do hlađenja osnovnog materijala i materijala alata tokom faze zavarivanja.

Efikasnost zavarenog spoja raste sa smanjenjem trajanja faze zastoja,

Efikasnost zavarenog spoja ima ujednačenije vrednosti od samog početka faze zavarivanja kod spojeva sa kraćom fazom zastoja,

Faza zastoja ne sme da bude suviše kratka inače nije moguće formirati zavareni spoj.

Vreme zastoja pri postupku zavarivanja trenjem sa mešanjem je parametar zavarivanja koji se u praksi retko ozbiljno analizira i sistematično primenjuje pri zavarivanju. Provedeno eksperimentalno istraživanje pokazuje da preciznim izborom vremena zastoja, uz ispravan odabir ostalih parametara zavarivanja, može doći do značajnog poboljšanja i ujednačavanja čvrstoće spoja na zatezanje/čupanje, pri zavarivanju teško zavarive legure aluminijuma 2024T3.

LITERATURA

Časopis

- [1] Nandan, R. et. al., Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties, Prog. in Materials Science, 53 (2008), 6, pp. 980-1023, doi:10.1016/j.pmatsci.2008.05.001,
- [2] ISO 25239-5:2011 Friction stir welding -- Aluminium -- Part 5: Quality and inspection requirements,
- [3] Milčić, D., Mijajlović, M., Milčić, M.: Eksperimentalna istraživanja zavarivanja trenjem sa mešanjem na leguri aluminijuma 2024 T351, Zbornik radova na CD-u, (Ilija Kovačević), Dvadesetsedmo savetovanje sa međunarodnim učešćem "ZAVARIVANJE 2012", Divčibare, Srbija, 2012,
- [4] Veljić, D. et. al., Experimental and numerical thermo – mechanical analysis of friction stir welding of high – strength alluminium alloy, Thermal Science, 18 (2014), Sup. 1, pp. s29-s38, doi: 10.2298/TSCI130512171V,
- [5] Živković, A., Radović, N., Mijajlović, M., Radisavljević, I., Uticaj geometrije čela alata na kvalitet zavarenog spoja ostvarenog postupkom FSW na legurama AL 5052-H3 i AL 2024-T3, Zbornik radova na CD-u, (Ilija Kovačević), Dvadesetsedmo savetovanje sa međunarodnim učešćem "ZAVARIVANJE 2012", Divčibare, Srbija, 2012,
- [6] Olea, C., Influence of Energy Input in Friction Stir Welding on Structure Evolution and Mechanical Behaviour of Precipitation-Hardening in Aluminium Alloys (AA2024-T351, AA6013-T6 and Al-Mg-Sc), Ph. D., University of Bochum, Bochum, Germany, 2008,
- [7] Mijajlović, M., Milčić, D., Đurđanović, M., Heat Generation - Temperature Phases of the FSW Process, Proceedings, (Predrag Dašić), 10th International Conference "Research and Development in Mechanical Industry" RaDMI 2010, Donji Milanovac, Serbia, 2010, pp. 331 - 335,
- [8] Mijajlović, M., Stamenković, D., Milčić, D., Đurđanović, M., Study About Friction Coefficient Estimation in Friction Stir Welding, Proceedings, (K.-D. Bouzakis), 7th Balkantrib '11 International Conference on Tribology, Thesaloniki, Greece, 2011, pp. 323 - 330,
- [9] Khandkar, M et. al., Prediction of temperature distribution and thermal history during friction stir welding: input torque based model, Science and Technology of Welding and Joining, 8 (2003), 3, pp. 165-174, doi: 10.1179/136217103225010943