



D. Dehelean, R. Cojocaru, L. Boțilă, B. Radu

Prevod: Miloš Pavlović

**ZAVARIVANJE RAZNORODNIH ALUMINIJUM-MAGNEZIJUM LEGURA
PRIMENOM FSW POSTUPKA****FRICTION STIR WELDING OF ALUMINUM MAGNESIUM DISSIMILAR JOINTS****Originalni naučni rad / Original scientific paper****UDK / UDC:** 621.791.1:669.715'721**Rad primljen / Paper received:**

Maj 2008.

Ključne reči: Zavarivanje trenjem alatom, raznorodni spojevi, IC termografija.**Izvod**

Na početku rada, analizirana su aktuelna istraživanja na temu zavarivanja trenjem alatom (FSW).

Predstavljena je originalna eksperimentalna postavka za izvođenje FSW, u čiji sistem praćenja je uključena infracrvena (IC) termografija.

Tehnologija zavarivanja je optimizovana za raznorodne spojeve između legura aluminijuma i magnezijuma, debljina od 3-10 mm, a u razmatranom slučaju 4 mm.

Za karakterizaciju zavarenih spojeva korišćene su metode ispitivanja bez razaranja (penetranti, radiografija, ultrazvuk), kao i metode statičkih i dinamičkih mehaničkih ispitivanja.

Analizirana je zavisnost između kvaliteta zavarenog spoja i realnog termičkog polja dobijenog tokom procesa zavarivanja, registrovanog IC termografijom.

* Rad je izlagan na Savetovanju sa međunarodnim učešćem "ZAVARIVANJE 2008" - Subotica

Adresa autora / Author's address:

D. Dehelean, R. Cojocaru, L. Boțilă, B. Radu

National R&D Institute for Welding and Material Testing
ISIM Timisoara, Bv. Mihai Viteazu. No.30, 300222,
Timisoara, RomaniaE-mail: ddehelean@isim.ro**Keywords:** Friction stir welding, dissimilar joints, monitoring infrared termography.**Abstract**

The paper starts with an analysis of the actual research topics in the field of friction stir welding process.

An original experimental set up for friction stir welding including a monitoring system by infrared thermography is presented.

The welding technology is optimised for dissimilar joints between aluminium and magnesium alloys for thicknesses of 3-10 mm (in this specific case 4mm).

A non-destructive examination using penetrant PT, radiographic RT and ultrasonic UT phased array methods as well as static and dynamic mechanical testing were used to characterise the welded joints.

The dependency between the real thermal field during the welding process appreciated by infrared thermography and the quality of welded joints is analyzed.

UVOD

Osmišljen u Engleskoj (1991) [1], prvi put primenjen na industrijskom nivou u Švedskoj (1995), postupak je izazvao posebno interesovanje u SAD i Japanu. Za kratko vreme, kvaliteti postupka su u ovim zemljama doveli do industrijske primene za zavarivanje legura lakih metala kao što su aluminijum i magnezijum, čak i pre potpunog razumevanja samog procesa zavarivanja.

FSW potiče od kontinuiranog zavarivanja trenjem, pri čemu je rotacioni alat utisnut u žleb spoja. Toplota nastala usled trenja između alata i zavarivanog materijala, stvara koncentričnu zonu materijala u plastičnom (testastom) stanju.

Uzdunim kretanjem alata po liniji spoja, dolazi do homogenizacije plastičnog materijala, koji teče kontinuirano od prednje ka zadnjoj zoni, gde se hladi i formira spoj između zavarenih delova.

INTRODUCTION

Invented in England (1991) [1], and applied at industrial level in Sweden (1995) for the first time, the process gathered particular interest in USA and Japan. In a short time, the qualities of the process led to industrial applications for joining light alloys like aluminium and magnesium in these countries, even before the welding process to be completely understood.

FSW derives from continuous friction welding process and consists from plunging a rotating tool in the welding groove. The heat developed due to friction between the tool and the welded material generates concentric zone of plasticized material.

By moving the tool along the groove, the plasticized material is homogenized and transferred continuous from the front to the back zone, where it cools and creates a solid state joint between the welded parts.



Postupak zavarivanja trenjem pomoću alata omogućava spajanje velikog broja sličnih i raznorodnih materijala koji se teško ili nikako zavaruju primenom drugih postupaka.

Primena FSW na raznorodnim spojevima očekivano dovodi do pristupa nekim aspektima koji nisu prisutni u slučajevima zavarivanja topljenjem. Prvi aspekt je geometrija spoja, koja proizilazi iz asimetrije samog postupka zavarivanja. Postavljanje delova raznorodnih materijala (levo ili desno) treba da bude u skladu sa smerom rotiranja i pravcem kretanja alata. Izborom načina postavljanja određujemo koji materijal će prioritetno teći ka šupljini sa zadnje strane alata. Postavljanje alata relativno u odnosu na liniju spoja takođe utiče na osobine nakon zavarivanja.

Fizička i hemijska podudarnost između dva materijala koji se zavaruju je takođe važna. Na temperaturama koje se dostižu tokom postupka zavarivanja (0.8 Tt), osobine tečenja materijala moraju biti uporedive [4].

TRENTUTNO STANJE U OBLASTI FSW

Međunarodna naučna zajednica fokusirana je na FSW, a dokaz je veliki broj objavljenih radova (oko 800), kao i preko 1750 patenata zaštićenih u industrijski razvijenim zemljama [2].

Većina međunarodnih konferencija sa temom zavarivanja ima sekcije namenjene postupku FSW zavarivanja, a održavaju se i međunarodni naučni skupovi čija je tema isključivo ovaj postupak.

Na slici 1 prikazan je dijagram raspodele po temama koje obrađuju naučni radovi usmereni na FSW postupak. Najveći broj radova (oko 26%) obrađuje teme vezane za osobine, kvalitet i kontrolu kvaliteta zavarenih spojeva. Posebna pažnja pridaje se kontinuiranom razvoju FSW postupka, opremi i alatima za zavarivanje (oko 23%) i primeni FSW postupka na druge materijale koji ne pripadaju grupi Al-legura (oko 16%).

Postupak FSW zauzima centralno mesto u radu Komisije III Međunarodnog instituta za zavarivanje (IIW), pod nazivom 'Zavarivanje otporom, zavarivanje u čvrstom stanju i srodni postupci', koja organizuje posebne aktivnosti tokom međunarodnih IIW konferencija.

The FSW process allows joining a large number of similar and dissimilar materials that are difficult or impossible to join by other processes.

FSW of dissimilar metals expects the approach some aspects that are not present in case of fusion welding. The first aspect is the weld geometry resulting from the welding process asymmetry.

Placing dissimilar materials (left or right) should be correlated with the rotating direction and movement of the welding tool. This placement determines which material is preferentially pushed in the cavity from the back of the welding tool. The placement of the tool relative to the welding line can affect the weld characteristics.

Physical and chemical compatibility between the two welding materials is also important. Materials' flow characteristics at temperatures reached during welding process (0,8 T_{fusion}) has to be comparable [4].

STATE OF THE ART IN FSW FIELD

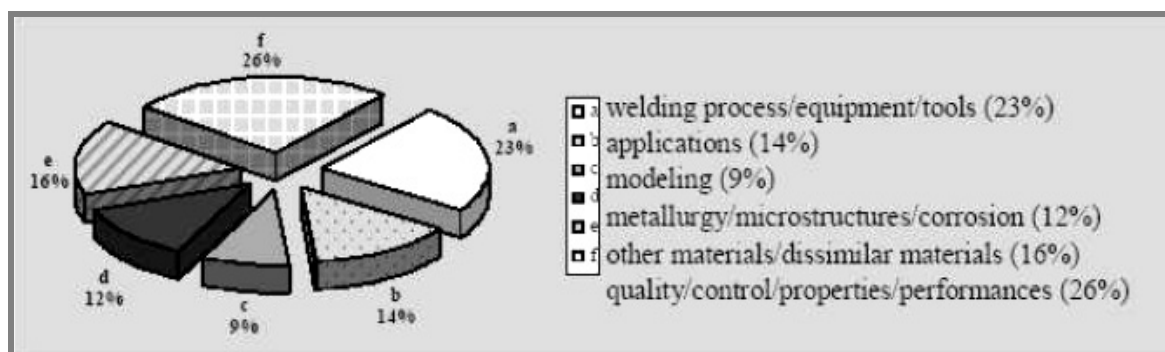
International scientific community focuses on FSW process, the proof being the extremely large number of scientific papers (around 800) published in the main flux of information, over 1750 patents protected in industrialized countries [2].

The majorities of international conferences with topics welding have sections dedicated to FSW process, but there are also scientific international manifestations dedicated exclusively to this process.

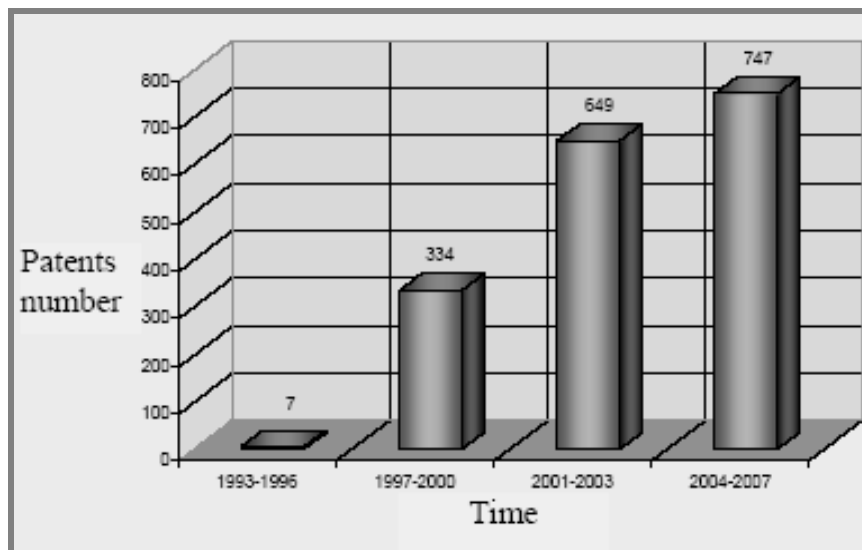
Figure 1 presents an image of the topics of scientific papers that treats FSW process. The larger number of scientific papers (~26%) treats aspects liked to performances, control and quality of the welded joints.

A special attention has the continuous development of the FSW process, equipments and welding tools (~23%) and application of the FSW process to other materials than Al (~16%).

FSW is in the center of attention of International Institute of Welding (IIW), Commision III "Resistance welding, solid state welding and allied joining processes", which organizes specific activities during IIW International Conferences.



Slika 1: Prikaz broja radova u specijalizovanim časopisima, po temama koje obrađuju [2]
 Figure 1: Variation of the number of papers, in specialized magazines, divided on topics broached [2]



Slika 2: Prikaz broja registrovanih patenata po periodima [2]

Figure 2: Evolution of FSW patent number in time [2]

Sa tačke gledišta patenata koji se odnose na FSW, do 2007. godine registrovano ih je 1750. U periodu 1993-1996 pominje se samo 7 patenata, a sledi veliki porast u periodu 1997-2000 [2].

Broj patenata koji se odnose na FSW neprestano raste (slika 2), a veliki broj patenata (oko 750) registrovan je u periodu 2004-2007. godine.

Samo nekoliko godina nakon otkrića, postupak je iz istraživačkih laboratorija ušao u industriju zavarenih konstrukcija kao što su brodogradnja, železnički transport, avioindustrija, svemirska vozila, vojna primena itd.

U ovom trenutku, posebna pažnja usmerena je na upotrebu Al i Mg legura u automobilskoj industriji i transportu, u cilju smanjenja težine i potrošnje goriva. Magnezijum je laki konstruktivni metal, sa gustinom koja iznosi 2/3 gustine aluminijuma i 1/4 gustine čelika. Mogućnost spajanja zavarivanjem magnezijuma sa drugim materijalima, posebno aluminijumom, omogućava dodatnu fleksibilnost pri projektovanju i proširenu primenu lakih legura.

Ovo gledište povećalo je interes u svetu nauke, a rezultati u vezi zavarenih spojeva legura Mg-Al su prikazani u radovima objavljenim u specijalizovanim časopisima i člancima izlaganim na međunarodnim konferencijama.

EKSPERIMENTALNI PROGRAM

Za efikasnu primenu FSW postupka, potrebna je oprema koja tokom procesa obezbeđuje visoke sile koje deluju na zavarivane komponente u dugom vremenskom periodu. Posebna pažnja je posvećena tehnicima pozicioniranja i pričvršćivanja delova koji se zavaruju. Ovaj zahtev ima glavni uticaj na kvalitet zavarenog spoja.

Imajući na umu navedeno, za eksperimentalni FSW program je korišćena sledeća oprema:

From the point of view of patents regarding FSW, until 2007, there were identified over 1750 patents. During 1993-1996 only 7 patents were mentioned, followed by a large increase starting with 1997-2000 [2].

The number of patents in FSW is continuous increasing (figure 2), the larger number of patents being registered during 2004-2007 (~750).

In only a few year from the invention of the process, it left the research laboratories and entered in welded structures industry like shipbuilding, railway carriages, airplanes, space vehicles, military applications, etc.

In this moment, special interest is focused on using Al and Mg alloys for automotive industry and transport, to reduce weight and decrease the fuel consumption. Magnesium is a light metal for structures, with density 2/3 times lower than aluminum and a quarter the density of steel.

The possibility to weld Mg components with other materials, specially Al, allows a supplementary flexibility in design and an increase of the number of applications for light alloys.

This aspect raised the interest in scientific world, results of welded joints Mg-Al being presented in articles published in specialized magazines and papers presented in international conferences.

EXPERIMENTAL PROGRAM

To apply efficient FSW process, welding equipments has to provide high process forces, for a long time, acting on the welding components.

A special attention is given to a positioning and fixing of welded parts technique. This demand has a major influence on the welded joints quality.

Having in mind these considerations, experimental program used a FSW equipment composed of:



- Glodalica tipa FV32 (slika 3 pozicija 1), nominalne snage 16kVA, sa mogućnošću stepenastog biranja brzine rotiranja alata i podužnog kretanja.
- Uređaj za zavarivanje (slika 3, pozicija 2 i slika 4), sa mono-blok izvedbom, sačinjava:
 - telo, (slika 4, pozicija 1), masivna metalna konstrukcija balansirane geometrije, sa optimalnim radom pri velikim brzinama rotacije.
 - alat za zavarivanje, (slika 4, pozicija 2), sa dve bitne zone alata koje direktno utiču na kvalitet spoja a sastoje se od rotirajućeg valjka i trna. Alat za zavarivanje je pričvršćen za glavu uređaja pomoću zavrtnja, (slika 4, pozicija 3).
- Uređaj za bezbedno pričvršćivanje i pozicioniranje delova tokom postupka zavarivanja prikazan je na slici 3, pozicija 3.
- Pomoćna ploča - podloga je prikazana na slici 3, pozicija 4. Služi kao oslonac za delove prilikom zavarivanja i omogućava formiranje korenog šava.
- Sistem za praćenje procesa zavarivanja pomoću IC termografije, sastoji se od termografske kamere koja registruje temperature do $T_{max}=2500^{\circ}C$, slika 3 pozicija 5, specijalizovanog softvera za termografsku analizu u realnom vremenu, kao i laptop računara za prikupljanje, čuvanje i obradu podataka.

Koristeći prikazanu opremu, izvedeno je sučeono FSW zavarivanje na pločama Al 1050 i AZ31B, dužine 330 mm, širine 110 mm i debljine 4 mm. Hemijski sastav zavarenih materijala dat je u tabeli 1.

Legura AZ 31B je postavljena na levu stranu gde se smer rotacije alata poklapa sa pravcem podužnog kretanja, a legura Al 1050 je postavljena na suprotnu stranu, slika 5.

- Milling machine type FV32 (figure 3, pos.1), installed power 16 kVA, with a possibility to prescribe rotating speed and advancing speed for the welding tool in steps.

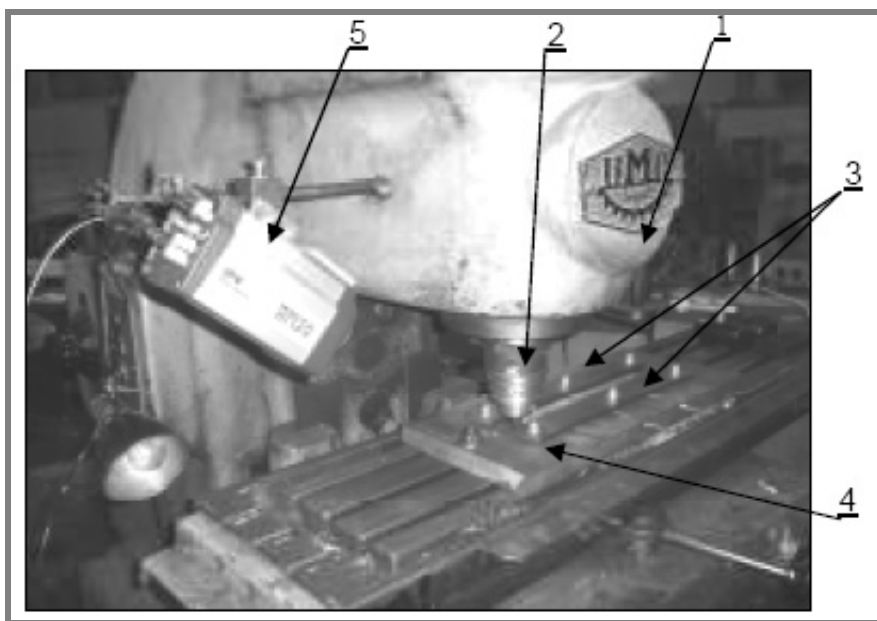
Welding device (figure 3, pos. 2, figure 4), design in mono-block type, composed by:

- body - (figure 4, pos. 1) – massive metallic construction, with balanced geometry, working optimum at high rotating speeds.
- welding tool - (figure 4, pos.2), with two important zones with direct influence on weld quality: shoulder and tool rotating pin. Welding tool is fixed in the head of the welding device by a screw (figure 4, pos. 3).
- Fixing/positioning device for safe fixing of parts during welding process (figure 3, pos. 3)
- Base plate (figure 3, pos. 4) for supporting the parts during FSW process and supporting the root weld.
- Monitoring system of the welding process using an infrared thermography, composed by thermographic camera with $T_{max} = 2500^{\circ}C$ (figure 3, pos. 5), specialized software for real time thermographic analysis, laptop for data acquisition, storing and processing.

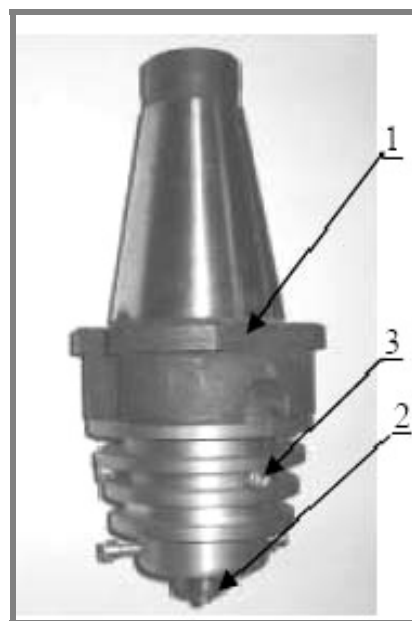
Using the presented welding equipment, FSW but joints on plates Al 1050 and respective AZ31B, with dimensions 330mm length, 110mm width, thickness of 4mm, were done.

Chemical composition of the welded plates are presented in table 1.

Alloy AZ 31B was placed on the advancing side and alloy Al 1050 on the retreating side of the welding tool (figure 5).



Slika 3: Oprema za FSW zavarivanje
Figure 3: FSW equipment

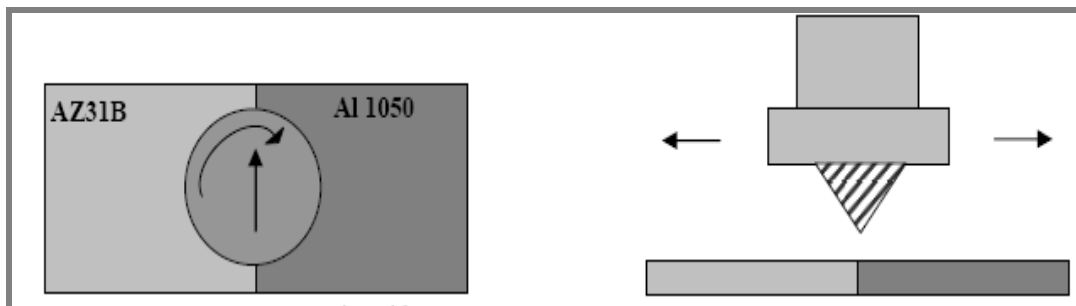


Slika 4: Uređaj za zavarivanje
Figure 4: Welding device



Tabela 1: Hemijski sastav zavarenih materijala
Table 1: Chemical composition of the welded plates

Material / Materijal	Content of elements, mass., % / Hemijski sastav, mas. %									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Ca	Ni	Al
Al 1050	0,25	0,40	0,05	0,05	0,05	0,07	0,05	-	-	rest
AZ 31B	max. 0,1	max. 0,0005	max. 0,05	min. 0,2	97	0,6-1,4	-	max. 0,04	max. 0,005	2,5-3,5



Slika 5: Geometrija spoja tokom FSW zavarivanja: a) Smer rotacije alata u odnosu na pravac kretanja, b) Položaj alata u odnosu na linioju spoja

Figure 5: Welding geometry during friction stir welding: a) Direction of tool rotation with respect to direction of travel, b) Placement of tool with respect to centerline of weld [4]

Oblik alata utiče na stepen mešanja dva materijala tokom zavarivanja. Stepenn mešanja pri zavarivanju raznorodnih materijala je različit od stepena mešanja sličnih materijala.

Eksperimentalno zavarivanje je izvedeno koristeći uglavnom dva oblika rotirajućeg alata, slike 6 i 7.

Korišćene su različite kombinacije parametara zavarivanja kao što je brzina rotiranja i brzina zavarivanja, tabela 2.

Na slici 5 prikazan je smer rotacije alata i pravac kretanja alata. Prečnik cilindričnog dela alata je $\phi=22$ mm, prečnik trna sa žlebovima je $\phi=6$ mm a dužina žlebova na trnu je 3.85 mm.

Kombinovanjem ovakvih uslova eksperimentalnog zavarivanja (smer rotacije i pravac zavarivanja), ako je ploča Mg-legure na desnoj strani, na kojoj je smer

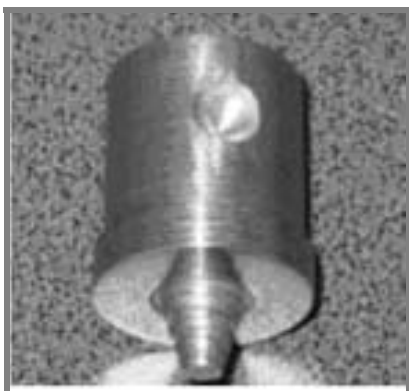
Tool shape influences the degree in which the two materials are mixed during welding. The degree of mixing during FSW dissimilar materials is different for the one obtained during FSW of similar materials.

Welding experiments have been realized using mainly two geometries for the rotating tool (figure 6 and figure 7).

Different combinations for the welding parameters like rotating speed and welding speed were used, according to table 2.

Figure 5 presents the rotating direction and tool movement direction. The diameter of tool shoulder was $\phi=22$ mm, and pin diameter $\phi=6$ mm, the threaded length was $l=3,85$ mm.

Using these experimental welding condition (rotating direction and welding direction), proved that if the



Slika 6: Alat za zavarivanje sa konusnim trnom
Figure 6: Conic threaded welding tool



Slika 7: Alat za zavarivanje sa cilindričnim trnom
Figure 7: Cylindrical threaded welding tool



Tabela 2: Kombinacije korišćenih parametara zavarivanja

Table 2: The welding parameters combinations

Nr. crt. / R. br.	Materials position / Pozicija materijala	Welding speed / Brzina zavarivanja [mm/min]	Rotating speed / Broj obrtaja [rot/min]	Mechanical strength / Zatezna čvrstoća [N/mm ²]	Fracture elongation/ Izduženje [%]	Obs. / Napomena
1	AZ31B advancing side / leva strana	190	1180	73	0,3	
2		118	750	59	0,18	
3	AZ31B retreating side / desna strana	190	1180	-	-	not welded / nije zavareno

rotacije alata suprotan uzdužnom pravcu kretanja, pokazalo se da ne dolazi do formiranja zavarenog spoja, slika 8.

Primećeno je da, ako je osa alata pomerenjena 1 mm ka Mg-ploči, dolazi do poboljšanja mehaničkih osobina (tabela 2, pozicija 1). Odnos između čvrstoće zavarenog spoja i čvrstoće legure Al 1050 je:

$$R_{mIS\ Al-Mg}/R_{mMB\ Al} = 0,6 \div 0,8 [3].$$

Na slici 9 prikazan je dobijeni zavareni spoj.

Spojevi su analizirani optičkom mikroskopijom, na uzorcima sečenim normalno na pravac zavarivanja, nagriženim u rastvoru koji sadrži 5ml sirćetne kiseline, 5g pikrinske kiseline, 10ml vode i 100ml etanola.

Na slici 10 prikazan je poprečni presek normalno na pravac zavarivanja.

Zona intenzivnog mešanja (grumen) i kružna struktura, karakteristična za FSW spojeve homogenih legura, ne uočavaju se pri zavarivanju raznorodnih Al-Mg materijala. Tečenje i mešanje materijala su vidljivi nakon nagrizanja, uz različito delovanje sredstva za nagrizanje na ispitivane materijale.

U zavarenom spoju nisu uočene velike greške tipa prsina ili tunela, ali u grumenu postoji zona nepravilnosti [4, 5]. Linija spajanja pomerenjena je ka

magnesium plate is placed on the retreating direction of the welding tool, can not produce a welded joint (figure 8).

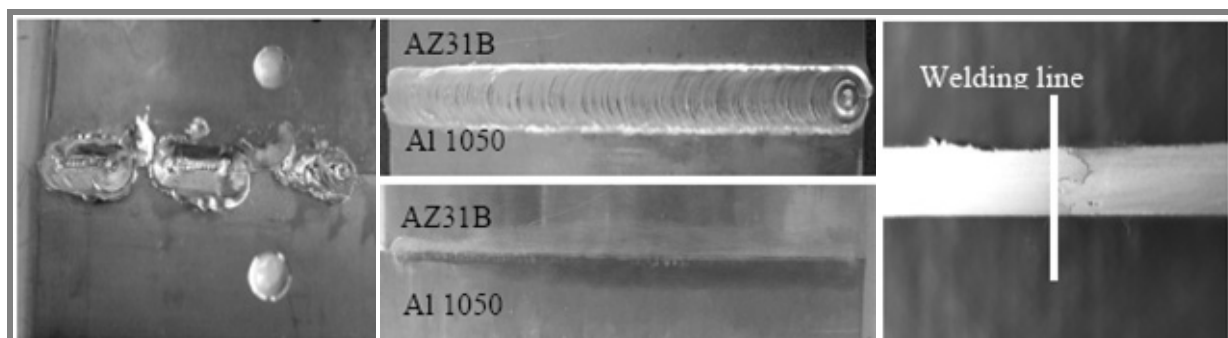
It was observed that if the tool axis is placed at 1mm inside in the magnesium plate, the mechanical characteristics of the welds are improved (table 2, pos. 1). Ratio between the fracture strength of the welded joint and fracture strength of the aluminum Al 1050 was:

$$R_{mIS\ Al-Mg}/R_{mMB\ Al} = 0,6 \div 0,8 [3].$$

Figure 9 presents the obtained welded joint. The welds were analysed using optical microscope, samples being cut perpendicular on the welding direction and etched using a solution of 5ml acetic acid + 5g picric acid + 10ml water + 100ml ethanol. Vickers hardness was measured in the transversal section, perpendicular on the welding direction [3].

Figure 10 presents a transversal section perpendicular to the welding direction.

Welded nugget and the annular structure, typical to FSW of homogenous alloys could not be revealed in Al-Mg dissimilar welding. The flow and degree of mixture of the material is visible due to the different reaction of the materials to the reactive for etching.



Slika 8: Neuspešno zavarivanje
Figure 8: Not welded

Slika 9: Zavareni spoj
Figure 9: Welded joint [3]

Slika 10: Mikroskopska analiza
Figure 10: Microscopic analysis [3]



levoj strani, na kojoj se smer rotacije alata poklapa sa uzdužnim pravcem kretanja.

Na slici 11 prikazana je mikrostruktura zone nepravilnosti

U zoni nepravilnosti je prisutna poroznost, poligonalna γ -zrna $Al_{12}Mg_{17}$ (svetle boje), kao i eutektička mešavina $\alpha+\gamma$, pri čemu je α čvrsti rastvor bogat sa Mg (tamna boja). Eutektička mešavina je formirana zbog temperature dostignute u pojedinim tačkama, koja je prevazišla temperaturu eutektičkog preobražaja. Drugo objašnjenje nastanka ovih faza je posledica difuzije u čvrstom stanju (Mg difunduje ka Al 1050, a Al ka AZ 31B).

Zona termomehaničkog uticaja (TMAZ) razvija deformaciono ojačanu strukturu (mogu se videti slabe linije, posebno u Al), slika 12.

U ZUT je primetan rast faza (kao rezultat porasta temperature i nedostatka mehaničkog naprežanja), bez zona tečenja, slika 13.

Na slici 14 prikazana je promena tvrdoće kroz spoj. Osnovni materijali Al 1050 i AZ 31B imaju vrednosti tvrdoće oko 37 HV i 55 HV respektivno, a zona nepravilnosti ima znatno više vrednosti tvrdoće, od 65 do 75 HV, usled pojave intermetalnog jedinjenja $Al_{12}Mg_{17}$.

Kvalitet FSW spoja je praćen pomoću IC termografije.

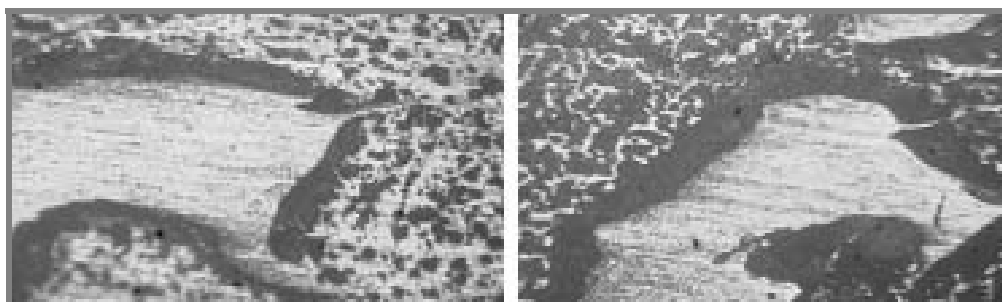
In the weld there are not large defects like cracks or "tunnel" type defects, but in the nugget there is an irregular zone [4, 5]. The weld interface from the superior surface shifts to the advancing side from the axis of the joint (figure 10). Figure 11 presents the microstructure of the irregular zone.

Zone presents some porosities, polygonal grains γ of $Al_{12}Mg_{17}$ (bright color) and a eutectic mixture $\alpha+\gamma$, where α is a solid solution rich in Mg (dark color). Eutectic mixture formed because temperature reached in some points values over the eutectic values [5]. Other explanation is that these phases formed as a result of solid state diffusion (Mg will diffuse towards Al 1050 and Al 1050 towards AZ31B).

Thermo-mechanical influenced zone (TMAZ) revealed a structure work hardened (can be seen low lines, especially in Al), figure 12. In HAZ can be observed phase grow (as a result of temperature increase and lack of mechanical stresses), without flow zones (figure 13).

Figure 14 presents hardness evolution. Base materials Al 1050 and AZ31B have hardness values around 37HV, respectively 55HV and the irregular zone has harness much higher like 65HV and 75HV due to the intermetallic compound $Al_{12}Mg_{17}$.

The quality of the FSW joints was monitored with infrared thermography method.

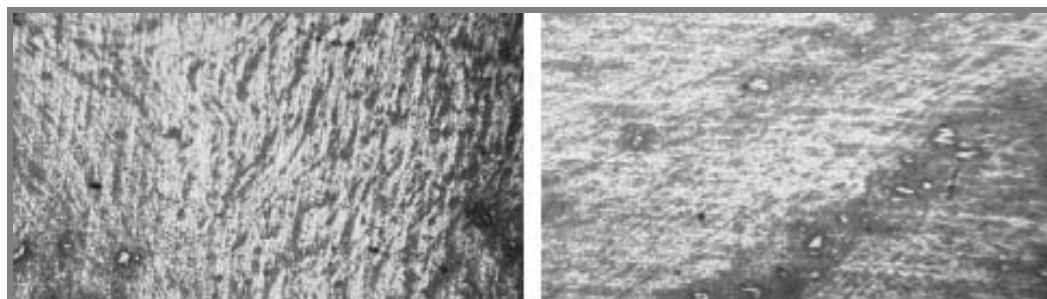


a)

b)

Slika 11: Mikrostruktura linije spajanja između Al i Mg, 100x

Figure 11: Al-Mg interface microstructure (MO, 100x)

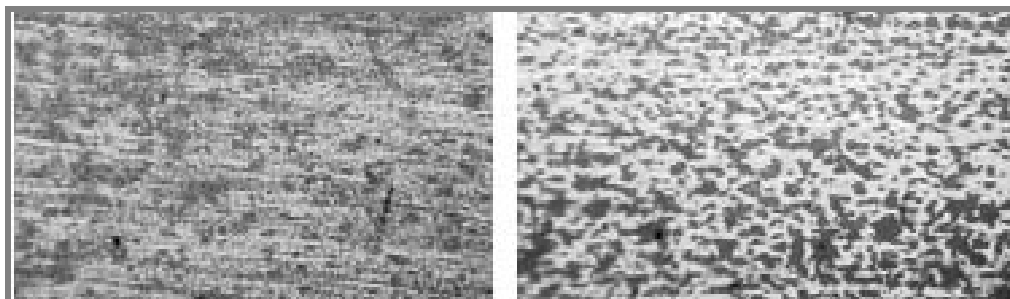


a)

b)

Slika 12: Mikrostruktura zone termomehaničkog uticaja (TMAZ): a) Al, b) Mg, uvećanje 100x [3]

Figure 12: TMAZ microstructure: a) Al, b) Mg (MO, 100x) [3]

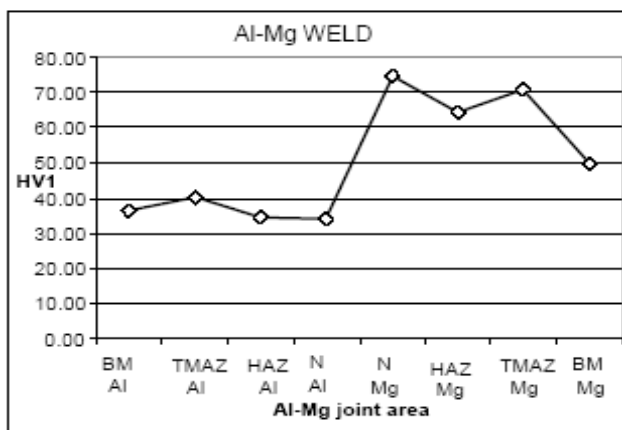


a)

b)

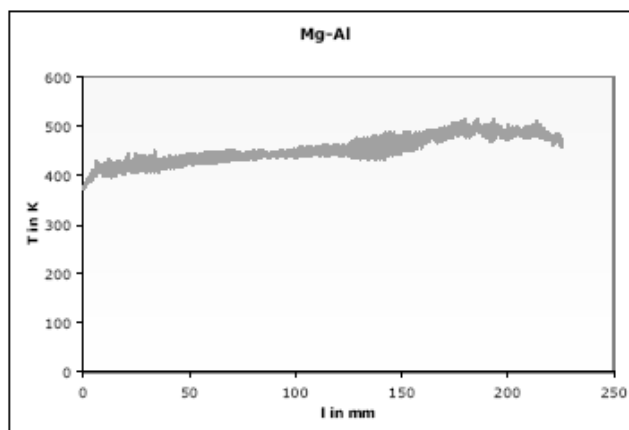
Slika 13: Mikrostruktura ZUT: a) Al, b) Mg, uvećanje 100x [3]

Figure 13: HAZ microstructure: a) Al, b) Mg (MO, 100x) [3]



Slika 14: Raspodela tvrdoće kroz Al-Mg spoj

Figure 14: Hardness evolution in Al-Mg welds



Slika 15: Raspodela temperature tokom zavarivanja

Figure 15: Temperature evolution during welding process

Za tu namenu korišćena je termografska foto-kamera, pričvršćena na uređaj za zavarivanje (slika 3), koja koristi softver za analizu u realnom vremenu. Kamera je usmerena ka zoni u kojoj cilindar alata preseca površinu zavarenog spoja.

Sva merenja promene temperature zabeležena na dijagramu, izvedena su na rastojanju 1 mm od cilindričnog dela alata na liniji spoja. Dimenzije mesta merenja bile su u potpunosti u skladu sa prečnikom cilindra alata.

Za stabilan proces zavarivanja, korišćeni parametri su morali biti optimizovani. Sa dijagrama temperature na slici 15, može se primetiti da su na početku zavarivanja temperature niže i da neprekidno rastu sa vremenom, sve dokle je proces zavarivanja stabilan.

Na slici 16 prikazana je raspodela temperature u okolini linije spoja. Više temperature na strani legure AZ 31B objašnjavaju se činjenicom da Mg ima manju termičku provodljivost.

Na slici 17 prikazane su izoterme koje ukazuju na zonu kontakta između ivica alata i zavarivanih materijala.

Na slici 18 prikazana je nastala greška pri zavarivanju. Postojanje grešaka, otkriveno radiografskom metodom, uzrokovalo je promenu toka dijagrama temperature. Uočen je pad temperature za

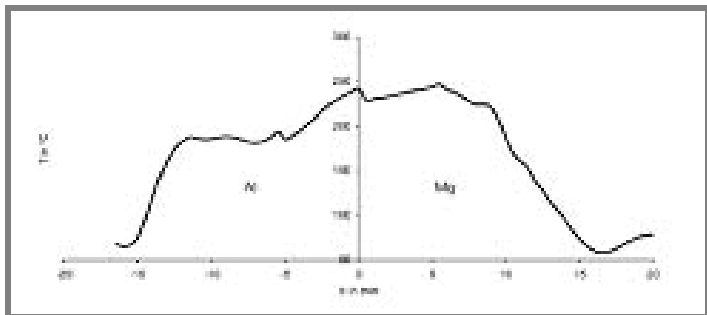
For the purpose we used a thermographic photo camera, mounted on the welding machine (figure 3), using a real time analyzing software. The camera was oriented to be focused on a zone where the tool shoulder intersects the surface of the weld [3].

All measurements of temperature evolution plotted on the diagrams were made at 1mm distance from the tool shoulder on the weld line. The spot dimension was strictly correlated with the tool shoulder diameter.

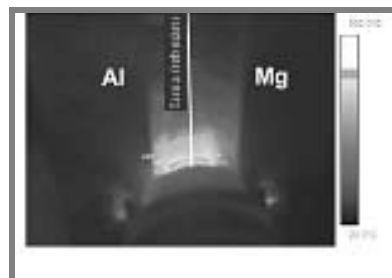
For a stable welding process, welding parameters used have to be optimized. From the temperature diagram from figure 15 can be observed that at the beginning of the welding process temperatures are lower and they increase constant in time, until the welding process is stable [3].

Figure 16 presents temperature variation in the neighbor of the welding line. Higher temperatures on the side of AZ31B alloy are explained by the fact that Mg has a lower thermal conductivity.

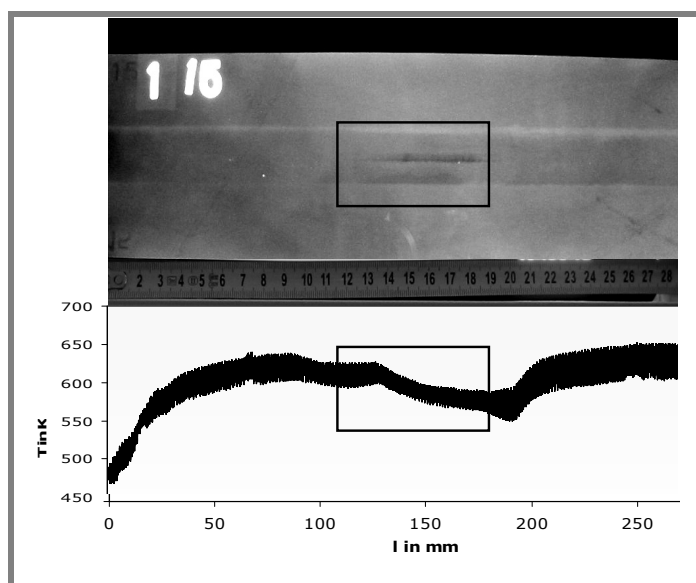
Figure 17 presents the isothermal indicating the contact zone between the tool edge and the welded material. Figure 18 presents the formation of a weld defect. The existence of the defect (revealed by X Ray control) determined a perturbation of the temperature diagram. We observed a decrease with 80°C of the temperature along the zone in which the defect was formed (lack of penetration), succeeded by a increase



Slika 16: Raspodela temperature
Figure 16: Temperature variation



Slika 17: IC snimak raspodele temperature
Figure 17: Infrared image of the temperature



Slika 18: Greške pri zavarivanju, detektovane primenom radiografskog ispitivanja i označene na dijagramu temperature

Figure 18: Welding defect detected through radiographic testing and marked on the temperature chart [3]

80 °C u okviru zone nastanka greške (nedovoljna penetracija alata), a zatim sledi rast do stabilnih vrednosti, nakon izlaska iz zone greške.

Ova činjenica dokazuje mogućnost korišćenja IC termografije za praćenje procesa FSW zavarivanja u realnom vremenu.

ZAKLJUČAK

Istraživanje postupka FSW i njemu srodnih postupaka, u središtu je aktuelnih istraživanja u oblasti zavarivanja, imajući na umu broj naučnih radova objavljenih uglavnom u periodu 2006-2007. godine.

Istraživanja pokazuju da postoje stvarne mogućnosti, kvalitativne i kvantitativne, za detekciju značajnih grešaka pri zavarivanju, korišćenjem IC termografije.

U slučaju zavarivanja raznorodnih materijala Al 1050 i AZ 31B, dolazi do nastanka zone nepravilnosti u centralnom delu spoja, sa strukturom i tvrdoćom različitom u odnosu na dva osnovna materijala.

at the stable values of temperature after the defect position was overcome [3].

This fact demonstrates the possibility to use infrared thermography to monitor in real time the FSW process.

CONCLUSIONS

Researches in FSW processes and connected processes is at the state of the art in welding research, having in mind the number of scientific papers published mainly during 2006-2007.

Researches revealed that real possibilities, qualitative and quantitative for detecting major defects in FSW joints, using infrared thermography method.

In case of dissimilar welding Al 1050 and AZ31B alloys, is formed an irregular zone in the center of the weld with a microstructure and hardness different from the two base metals. This zone is rich in $Al_{12}Mg_{17}$ intermetallic compound formed at reaching locally temperature over the fusion one, during FSW process,



Primenom optimizovanih parametara zavarivanja, omogućeno je dobijanje zavarenog spoja raznorodnih materijala Al 1050 i AZ 31B, bez grešaka.

Ovo je takođe potvrđeno korišćenjem uređaja za praćenje temperature, kojim nije ukazano na pojavu ovakvih grešaka.

which determines a higher hardness in the center.

Using optimized welding parameters allowed us to obtain dissimilar welds between Al 1050 and AZ31B, without defects. This was proved also by using the temperature monitoring device, which did not revealed the formation of defects.

LITERATURA / LITERATURE

- [1] Thomas, W.M., Nicholas, E.D., Needham, J.C., Murch, M.G., Temple-Smith, P., Dawes, C.J., Friction-stir butt welding, GB Patent No. 9125978.8, International Patent No. PCT/GB92/02203, 1991.
- [2] Božil, L., Cojocaru R., Dehelean, D., Research on friction stir welding processes reflected in the dynamic of publications and invention patents at world level, Proceedings of International Conference Innovative Technologies for Joining Advanced Materials 7-8.06.2007, Sudura Publishing House, ISBN 978-973-8359-9, pp. 87-91, Timisoara.
- [3] Dehelean, D., Innovative and ecological technologies to process advanced materials by friction stir welding, Project CEEX No. 66, ISIM Timisoara, 2006-2008.
- [4] McLean, A.A., Powell, G.L.F., Brown, I.H., Linton, V.M., Friction stir welding of magnesium alloy AZ31 B to aluminium alloy 5083, Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 8, No. 6, 2003.
- [5] Michiuchi, M., Park, S.H.C., Sato, Z.S., Kokawa, H., Microstructural evolution during dissimilar friction stir welding of Al and Mg alloy. Department of Materials Processing, Graduate School of Engineering, Tohoku University, Aoba-yama 02, Sendai 980-8579, 2004, Nagoya, Japan.

PRAKTIKUM REL I MAG/MIG ZAVARIVANJA

Autori: M., Jovanović, V., Lazić, pomoćni univerzitetski udžbenik, Mašinski fakultet u Kragujevcu, ISBN 978-86-86663-11-5, Kragujevac, 2008., format B5, tvrd povež, 406 stranica.

Obaveštavamo Vas i Vaše saradnike da smo posle našeg višedecenijskog iskustva stečenog pri školovanju studenata i zavarivača, kao i iskustva stečenog pri projektovanju i reparaturi specijalnih zavarenih konstrukcija, objavili "PRAKTIKUM REL I MAG/MIG ZAVARIVANJA".

U početnim poglavljima ove knjige najpre se obradjuju opšte napomene o najvažnijim tehničkim metalima i njihovim legurama, navode dominantni postupci zavarivanja topljenjem i ukazuje na zavarljivost osnovnih materijala za zavarene konstrukcije. Zatim se veoma detaljno, kao najobimnije i najsadržajnije glave ove knjige razmatraju, danas najviše primenjivani postupci REL i MAG/MIG zavarivanja. Dalje se ukazuje na zavarene spojeve i njihove osobine, sopstvene napone i deformacije, greške i kontrolu zavarenih spojeva. Posebno se navodi poglavlje vezano za sprovođenje mera higijensko-tehničke zaštite. U prilogima ove knjige čitaoci će se upoznati sa rečnikom zavarivačkih termina, brojnim praktičnim preporukama za izbor režima zavarivanja, širokim spektrom dodatnih materijala različitih proizvođača i termo-fizičkim osobinama pojedinih tehničkih metala i legura.

Očekujemo da će ovaj Praktikum biti od koristi svima onima koji imaju nameru da, prvenstveno iz profesionalnih razloga, saznaju više o najvažnijim postupcima zavarivanja topljenjem. Tu pre svega mislimo na zavarivače, studente tehnike kojima su znanja iz ove oblasti neophodna, kao i na inženjere, tehnologe i kontrolore angažovane u proizvodnji, kako u radioničkim uslovima tako i na terenu. Ne zaboravljamo ni mnoge delatnike u održavanju komunalija, transportnih sredstava gradjevske i poljoprivredne mehanizacije, kojima je zavarivanje pomoćni zanat.

Informacije:

Dr Vukić Lazić, vanredni profesor, vlazic@kg.ac.rs,

Tel. 034.335990 lok. 680 (Mob. tel. 064-8288737)

Mašinski fakultet u Kragujevcu, Sestre Janjić 6, 34000 Kragujevac