



Bojan Gligorijević <sup>1,a</sup>, Vencislav Grabulov <sup>2,b</sup>, Endre Romhanji <sup>3,c</sup>

# MIKROSTRUKTURA, SPECIFIČNA ELEKTRIČNA PROVODLJIVOST I INTERKRISTALNA KOROZIJA ZAVARENIH SPOJEVA LEGURA AA6026/AA5183/AA6026 NAKON PULSNOG ZAVARIVANJA I NAKNADNE TERMIČKE OBRADNE

## MICROSTRUCTURE, ELECTRICAL CONDUCTIVITY AND INTERGRANULAR CORROSION OF AA6026/AA5183/AA6026 ALLOY WELDED JOINTS AFTER PULSED WELDING AND POST-WELD HEAT TREATMENT

**Originalni naučni rad / Original scientific paper**

**Rad primljen / Paper received:**

Maj 2025.

**Rad prihvaćen / Paper accepted:**

Avgust 2025.

**Adresa autora / Author's address:**

<sup>1</sup> Univerzitet u Beogradu, Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog fakulteta, Kamegijeva 4, 11120 Beograd, Srbija

<sup>2</sup> Društvo za unapređivanje zavarivanja u Srbiji (DUZS), Grčića Milenka 67, 11000 Beograd, Srbija

<sup>3</sup> Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Kamegijeva 4, 11120, Beograd, Srbija

**email / ORCID ID:**

<sup>a</sup> [bgligorijevic@tmf.bg.ac.rs](mailto:bgligorijevic@tmf.bg.ac.rs) / 0000-0001-6308-3366

<sup>b</sup> [vencigrabulov@gmail.com](mailto:vencigrabulov@gmail.com) / 0000-0003-2020-5452

<sup>c</sup> [endre@tmf.bg.ac.rs](mailto:endre@tmf.bg.ac.rs) /

**Ključne reči:** AA6026, pulsni MIG; pulsni TIG; zavareno stanje, T6 stanje, specifična električna provodljivost, interkristalna korozija

**Keywords:** AA6026, pulsed MIG; pulsed TIG; welding condition, T6 condition, electrical conductivity, intergranular corrosion

### Rezime

U radu je ispitan uticaj unosa toplote i naknadne termičke obrade (rastvarajuće žarenje, kaljenje u vodi i veštačko starenje – T6 stanje) na mikrostrukturu, električnu provodljivost i interkristalnu koroziju zavarenih spojeva AA6026/AA5183/AA6026. Uzorci su bili zavareni pulsni MIG, pulsni TIG i kombinovanim pulsni TIG&MIG postupkom, dok je deo ispitivanih uzoraka bio preveden u T6 stanje. Niži unos toplote pulsni MIG postupkom uticao je na smanjeno izdvajanje intermetala po granicama zrna zavarenih uzoraka, što je uzrokovalo njihovu povećanu otpornost prema interkristalnoj koroziji u odnosu na uzorke zavarene pulsni TIG postupkom kod kojih je viši unos toplote podstakao intenzivnije izdvajanje intermetalnih faza i smanjio otpornost prema interkristalnoj koroziji. T6 tretman je delimično homogenizovao mikrostrukturu, ali je istovremeno doveo do taloženja Mg<sub>2</sub>Si duž granica zrna u zoni uticaja toplote AA6026, kao i formiranje β-Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub> filmova po granicama zrna u metalu šava AA5183, što je kolektivno povećalo sklonost ka

### Abstract

The present study examined the effect of heat input and post-weld heat treatment (solution annealing, water quenching and artificial aging – T6 condition) on the microstructure, electrical conductivity, and intergranular corrosion of AA6026/AA5183/AA6026 welded joints. The samples were welded using pulsed MIG, pulsed TIG, and combined TIG&MIG procedures, while a portion of the examined samples was subjected to the T6 condition. The lower heat input of the pulsed MIG process reduced intermetallic precipitation along grain boundaries in the welded samples, which resulted in higher resistance to intergranular corrosion compared to the pulsed TIG process, where higher heat input promoted more intensive precipitation of intermetallic phases and decreased resistance to intergranular corrosion. The T6 treatment partially homogenized the microstructure but also likely promoted the precipitation of Mg<sub>2</sub>Si along grain boundaries in the heat-affected zone of AA6026 and the formation of continuous β-Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub> films along grain boundaries in the weld metal of



interkristalnoj koroziji. Najbolju otpornost su pokazali spojevi dobijeni primenom pulsnog MIG postupka sa niskim unosom toplote, dok su TIG&MIG spojevi, zahvaljujući još nižem unosu toplote, zadržali stabilnu korozionu postojanost čak i nakon T6 tretmana. Nasuprot tome, spojevi dobijeni pulsnim TIG postupkom sa većim unosom toplote su u T6 stanju pretrpeli najveću degradaciju otpornosti prema interkristalnoj koroziji. Ovi rezultati su potvrdili da je kontrola unete toplote bila presudan faktor koji je oblikovao mikrostrukturne promene, električnu provodljivost i sklonost ispitanih zavarenih spojeva prema interkristalnoj koroziji.

AA5183, which together increased susceptibility to intergranular corrosion of welded joints. The best resistance to intergranular corrosion was observed in joints produced by pulsed MIG welding with low heat input, while TIG&MIG joints, owing to even lower heat input, maintained stable intergranular corrosion resistance even after T6 treatment. In contrast, joints obtained by pulsed TIG welding with higher heat input suffered the most severe degradation of intergranular corrosion resistance in the T6 condition. These findings confirmed that controlling heat input was the decisive factor governing microstructural evolution, electrical conductivity, and the susceptibility of the welded joints to intergranular corrosion.

## 1. Uvod

Aluminijumska legura AA6026 pripada sistemu Al–Mg–Si razvijenom za dobru mašinsku obradivost i anodizaciju [1,2]. Danas postoje niskoolovne i bezolovne varijante ove legure (npr. 6026 LF), usklađene sa ELV/RoHS propisima [1]. U literaturi, svojstva ovih legura u zavarenom i naknadno termički obrađenom T6 stanju su dokumentovana na zanemarljivom nivou. Legure poput AA6082 se neretko koriste kao referentni materijali pri ispitivanju svojstava AA6026 legura [3]. Najverovatniji razlog za to je bliskost njihovog hemijskog sastava, kao i ponašanja tokom izlaganja uticaju povišenih i visokih temperatura.

Za zavarivanje Al legura se često primenjuju MIG (*Metal Inert Gas*) i TIG (*Tungsten Inert Gas*) postupci zavarivanja. Međutim, podaci vezani za svojstva zavarenih spojeva AA6026 legura dobijenih ovim postupcima zavarivanja nisu pronađeni u dostupnoj literaturi, a takođe i podaci vezani za T6 stanje zavarenih spojeva ovih legura.

Na osnovu prethodnog, cilj ovog rada je bio da se izvrši procena uticaja različitih postupaka zavarivanja (pulsni MIG, pulsni TIG, i kombinovani TIG&MIG), kao i uticaja naknadne termičke obrade ovih zavarenih spojeva (T6 stanje), na njihovu mikrostrukturu, specifičnu električnu provodljivost i otpornost prema interkristalnoj koroziji. U ovom radu su vršena poređenja pomenutih svojstava u karakterističnim zonama zavarenih spojeva, kao što su OM – osnovni material, ZUT – zona uticaja toplote, LS – linija stapanja i MŠ – metal šava.

## 2. Eksperimentalni deo

2.1. OM, dodatni materijal (DM), postupci i parametri zavarivanja, naknadna termička obrada

### 2.1.1. Hemijski sastav OM

OM je uzorkovan iz ekstrudovanih šipki legure AA 6026. Širina uzoraka OM za zavarivanje je iznosila oko 60 mm, a debljina oko 6 mm. Srednji hemijski sastav OM je dat u Tabeli 1.

**Tabela 1.** Srednji hemijski sastav ekstrudovanih šipki legure AA 6026 (mas. %).

**Table 1.** Average chemical composition of extruded AA 6026 alloy bars (wt. %).

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Pb	Sn	Bi	V	Zr	Al
1.015	0.078	0.262	0.329	0.965	0.13	0.005	0.011	0.012	0.212	0.018	0.61	0.010	0.002	ost.



### 2.1.2. DM i primenjeni postupci zavarivanja

DM u svim slučajevima zavarivanja je bio AA5183 (Union AlMg4.5Mn Bohler) čiji su hemijski sastav i mehanička svojstva bili u skladu sa standardom EN ISO 18273. Za eksperimentalno zavarivanje ekstrudovanih uzoraka legure AA 6026 su korišćeni pulsni MIG i TIG postupci, kao i njihova kombinacija (TIG&MIG).

Sledeći opšti parametri zavarivanja pulsним MIG postupkom su primenjeni:

- Aparat za zavarivanje: Trans Puls Synergic 4000
- Struja zavarivanja: AC, pulsni režim rada
- Zaštitni gas: mešavina Argon- Helijum, Ar/He, 70/30
- Protok gasa: 18 l/min
- Tehnika zavarivanja: "unapred"
- Temperatura međuprolaza: 45-70°C
- Brzina dodavanja žice: 10-11 m/min
- Brzina zavarivanja: 45-70 cm/min

Sledeći opšti parametri zavarivanja pulsним TIG postupkom su primenjeni:

- Aparat za zavarivanje: Magic Wave 4000 Job G/F Fronius
- Prečnik volframove netopive elektrode: 3,2 mm
- Struja zavarivanja: AC, pulsni režim rada
- Zaštitni gas: Argon (Ar 5.0)
- Protok gasa: 12 l/min
- Tehnika zavarivanja: "unapred"
- Temperatura međuprolaza: 80-95°C
- Brzina zavarivanja: 10-16 cm/min

Tokom zavarivanja, korišćene su Al podloške sa korene strane zavarenih spojeva. Pre ispitivanja, podloške su bile uklonjene, a uzorci nisu bili predgrevani pre zavarivanja.

### 2.1.3. Parametri zavarivanja

U Tabeli 2 su dati prosečni parametri zavarivanja po jednom prolazu zavarivanja pet tipova uzoraka legure AA 6026. Iako nisu prikazane zbog preglednosti, standardne devijacije parametara zavarivanja u slučaju TIG&MIG uzoraka su bile vrlo slične prikazanim standardnim devijacijama uzoraka dobijenih pulsним TIG (TIG-1R i TIG-2) i pulsним MIG (MIG-1R i MIG-2) postupcima.

**Tabela 2.** Srednji parametri zavarivanja (sa standardnim devijacijama) pet ekstrudovanih uzoraka legure AA 6026 po jednom prolazu zavarivanja.

**Table 2.** Average welding parameters (with standard deviations) of five extruded AA 6026 alloy samples per single welding pass.

Uzorak	Postupak zavarivanja EN ISO 4063	Struja [A]	Napon [V]	Vreme [s]	Dužina prolaza [cm]	Brzina žice [m/min]	Brzina zavarivanja [cm/min]	Temperatura međuprolaza [°C]	Uneta toplota [kJ/cm]
MIG-1R	131	170 ± 0	22.8 ± 0	26.7 ± 6.1	30.0	11.0 ± 0	70.0 ± 17.0	82.5 ± 2.5	2.8 ± 0.6
MIG-2	131	166 ± 5	22.6 ± 0.4	34.6 ± 7.4	30.0	10.7 ± 0.5	53.0 ± 11.0	75.0 ± 5.0	3.5 ± 0.9
TIG-1R	141	202.5 ± 15.0	11.9 ± 0.3	100.2 ± 10.4	30.0	--	18.2 ± 1.7	87.3 ± 6.7	4.8 ± 0.6
TIG-2	141	210 ± 10	12.1 ± 0.4	112.7 ± 32.6	30.0	--	16.7 ± 4.2	85.0 ± 5.0	5.7 ± 1.5
TIG&MIG	141 + 131	TIG: 220.0; MIG: 173.0	TIG: 11.6; MIG: 22.8	TIG: 122.0; MIG: 15.5	TIG: 30.0; MIG: 30.0	TIG: /; MIG: 11.0	TIG: 15.0; MIG: 120	TIG: 60.0; MIG: 88.0	TIG: 6.12; MIG: 1.22



Uzorci MIG-1R, MIG-2, TIG-2 su zavareni u tri sloja sa tri prolaza, dok su uzorci TIG-1R zavareni u tri sloja sa četiri prolaza (dva prolaza su primenjena u poslednjem sloju). Za razliku od uzoraka zavarenih u tri sloja pojedinačnim pulsним postupcima, uzorci TIG&MIG su zavareni u 4 sloja sa 7 prolaza, pri čemu je koreni prolaz zavaren primenom pulsog TIG postupka, dok su svi ostali prolazi popune izvedeni pulsним MIG postupkom.

#### 2.1.4. Naknadna termička obrada

S obzirom da je plan korozivnih ispitivanja uključivao analize uzoraka u zavarenom i termički obrađenom stanju, uzorci u zavarenom stanju su bili podvrgnuti naknadnoj termičkoj obradi koja je uključivala rastvarajuće žarenje na 525°C u toku 1 h, nakon čega je izvršeno kaljenje uzoraka u vodi. Potom su uzorci veštački stareni na 175°C tokom 6 h. Brzina zagrevanja peći do 525 i 175°C je iznosila 200°C/h u oba slučaja. Termičko stanje koje je postignuto ovakvom naknadnom termičkom obradom je poznato kao T6 stanje. Nakon zavarivanja, uzorci MIG-2, TIG-2 i TIG&MIG su prevedeni u T6 stanje.

#### 2.2. Ispitivanje uzoraka

Na mestima početka procesa zavarivanja izvršeno je sečenje zavarenih ploča na oko 15 mm od ivica. Radi procene uticaja postupka zavarivanja na specifičnu električnu provodljivost, otpornost prema interkristalnoj koroziji i mikrostrukturu, uzorci sa oznakama MIG-1R i TIG-1R su ispitivani zavarenom stanju. Da bi se ocenio uticaj naknadne termičke obrade na pomenuta svojstva, uzorci MIG-2 i TIG-2 su, prema ranije opisanom postupku, bili podvrgnuti naknadnoj termičkoj obradi i zatim su bili ispitivani, a dobijeni rezultati su bili upoređeni sa onima za MIG-1R i TIG-1R uzorke u zavarenom stanju. Uticaj kombinovane primene postupaka zavarivanja procenjen je poređenjem rezultata uzoraka TIG&MIG u T6 stanju sa rezultatima uzoraka MIG-2 i TIG-2 u T6 stanju.

#### 2.5.2. Merenja specifične električne provodljivosti

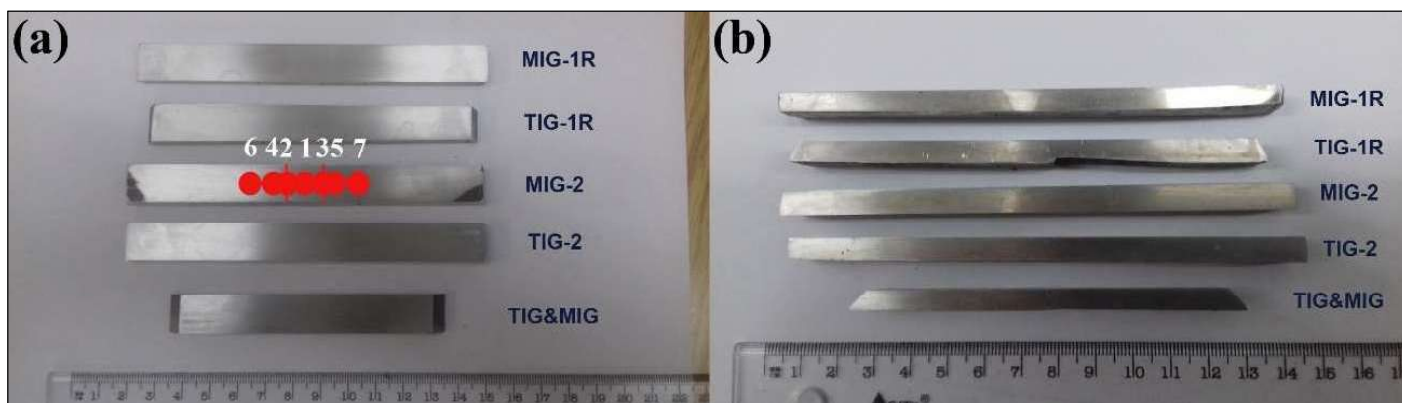
Specifična električna provodljivost uzoraka merena je SIGMATEST uređajem FOERSTER 2.069 pomoću sonde prečnika 8 mm (Slika 1). Nakon povezivanja priključaka za napajanje i sonde za merenje provodljivosti, uređaj je uključen i ostavljen oko 60 min da se temperira u uslovima okoline (sobna temperatura, normalni uslovi, ambijentalni vazduh). Potom je izvršena kalibracija u odnosu na vazduh (air-point), kao i Al i Cu standarde. Merenja su sprovedena na frekvenciji od 120 kHz u režimu CONTINUOUS merenja.



**Slika 1.** SIGMATEST uređaj sa mernom sondom ( $\varnothing$  8 mm) i kalibracionim standardima  
**Figure 1.** SIGMATEST device with measuring probe ( $\varnothing$  8 mm) and calibration standards

S obzirom na to da merenje specifične provodljivosti zahteva ravnu površinu, lica i koreni zavara uzoraka dovedeni su mašinskom obradom

približno u ravan sa debljinom OM, što je prikazano na slikama 2a i 2b.



**Slika 2.** Uzorci i lokacije na kojima su vršena merenja specifične električne provodljivosti.

**Figure 2.** Samples and locations where specific electrical conductivity measurements were performed.

Na slici 2a je prikazan primer merenja sondom SIGMATEST uređaja na uzorku MIG-2. Vertikalne linije označavaju približne lokacije LS sa obe strane MŠ. Merenja su vršena u MŠ (merenja 1), na LS sa jednom polovinom sonde unutar MŠ, a drugom unutar ZUT (merenja 2 i 3), na lokacijama gde sonda tangira LS (merenja 4 i 5), kao i u OM, dalje od MŠ (merenja 6 i 7). Rastojanje između krajnjih tačaka merenja (6 i 7) sa obe strane MŠ iznosilo je oko 4 cm. Na svakoj lokaciji sprovedeno je najmanje pet merenja. Pre početka, površine uzoraka brušene su SiC voodotpornim abrazivnim papirima granulacije P-340, P-600, P-800 i P-1200.

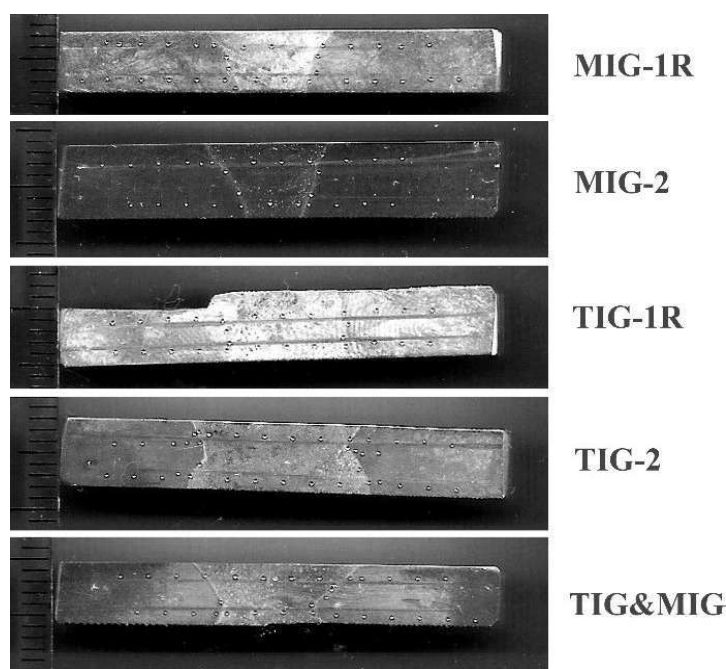
### 2.5.1. Mikrostrukturna ispitivanja

Nakon merenja specifične električne provodljivosti, površine uzoraka (Slika 2b) su bile

dodatno brušene SiC voodotpornim abrazivnim papirom granulacije P-2500, zatim polirane dijamantskim suspenzijama srednje veličine čestica od 6, 3 i 1  $\mu\text{m}$  i finalno polirane nekristalizujućom silikatnom suspenzijom (OP-U, Buehler) sa veličinom čestica od 0.05  $\mu\text{m}$ . Finalno polirane površine ispitane su svetlosnim mikroskopom u svetlom polju radi kvalitativne procene prisustva poroznosti, prslina i/ili intermetalnih faza.

### 2.5.2. Ispitivanja interkristalne korozije

Uzorci sa Slike 2 su isečeni na oko 1 cm sa obe strane MŠ i imali su dimenzije prikazane na Slici 3. Pored mikrostrukturnih ispitivanja, na ovim uzorcima su sprovedena i merenja tvrdoće HV5, koja nisu bila predmet istraživanja ovog rada.



**Slika 3.** Uzorci za ispitivanje otpornosti na interkristalnu koroziju.

**Figure 3.** Samples for intergranular corrosion resistance testing

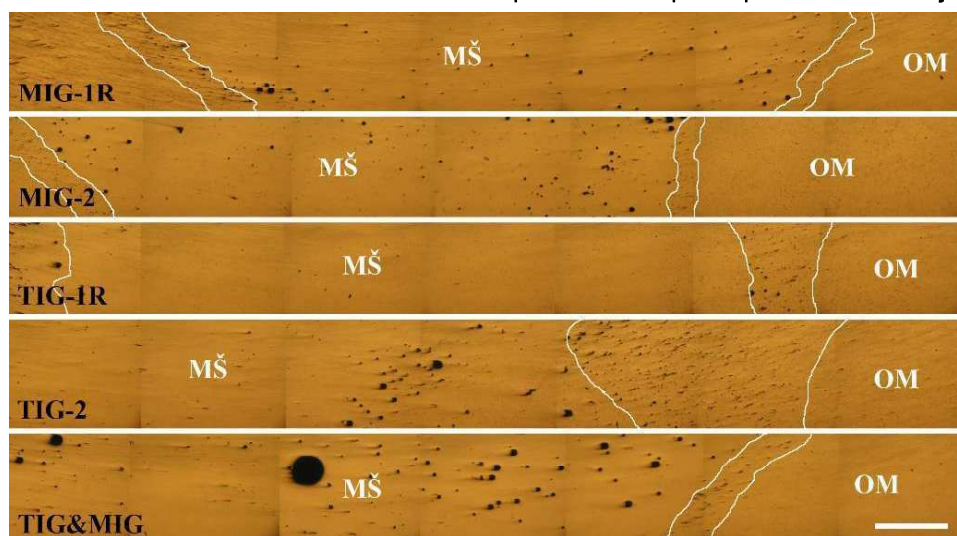


Ispitivanja korozionog ponašanja su izvedena prema standardu EN ISO 11846: *Korozija metala i legura – Određivanje otpornosti na interkristalnu koroziju legura aluminijuma za termičku obradu*. Uzorci su najpre očišćeni u acetonu, zatim osušeni i potopljeni u 7.5 mas.% vodenom rastvoru NaOH na oko 55°C. Nakon toga su isprani tehničkom vodom, dok su površinski produkti bili uklonjeni u koncentrovanoj azotnoj kiselini na sobnoj temperaturi, zatim ponovo isprani tehničkom i destilovanom vodom i na kraju osušeni. Svaki uzorak je potom potopljen u 500 ml vodenog rastvora NaCl (3 mas.%) i koncentrovane HCl (1 vol.%) na sobnoj temperaturi tokom 24 h. Prividna površina uzoraka u kontaktu sa rastvorom iznosila je oko 20 cm<sup>2</sup>.

## 2. Rezultati

### 2.1. Makrostruktura zavarenih spojeva

Na Slici 4 belim linijama su označene oblasti MŠ i OM, između kojih se nalazi ZUT. Tačnu širinu ZUT nije bilo moguće precizno odrediti, pa je usvojen kriterijum na osnovu koga su ove oblasti razgraničene. Naime, u smeru OM ka MŠ, veličina Pb/Bi čestica je počinjala primetno da raste, što je uzeto kao početak ZUT (prva bela linija). LS se jasno prepoznavala po morfologiji intermetalnih faza raspoređenih između dendritnih grana na početku MŠ. Vredno je istaći da su širine pretpostavljenih ZUT bile u korelaciji sa količinom unete toplote po jedinici dužine zavarenih spojeva (Tabela 1). Manji unos toplote kod MIG-1R, MIG-2 i TIG&MIG uzoraka rezultovao je užim ZUT oblastima u poređenju sa TIG-1R i TIG-2 uzorcima (Slika 4). U MŠ je primećeno prisustvo mikroporoznosti, koja se uglavnom koncentrisala u blizini LS. Mikropore su bile zatvorenog tipa i sfernog oblika. Nije bila utvrđena korelacija između prisustva mikroporoznosti i primenjenih parametara/postupaka zavarivanja.



**Slika 4.** Makrostruktura zavarenih spojeva (polirano stanje). Dužina merne skale u donjem desnom uglu iznosi 1 mm.

**Figure 4.** Macrostructure of the welded joints (polished condition). The scale bar in the lower right corner represents 1 mm

### 2.2. Mikrostruktura zavarenih spojeva

Slike mikrostruktura zavarenih spojeva u poliranom stanju (Slika 1) pokazuju tipične raspodele intermetala koje su detektovane u OM, ZUT, na LS i u MŠ ovih spojeva. U ovom delu prvo će biti objašnjene mikrostrukture uzoraka u zavarenom stanju (MIG-1R i TIG-1R), nakon čega će biti objašnjene razlike u mikrostrukтури kod uzoraka u T6 stanju (MIG-2, TIG-2 i TIG&MIG)

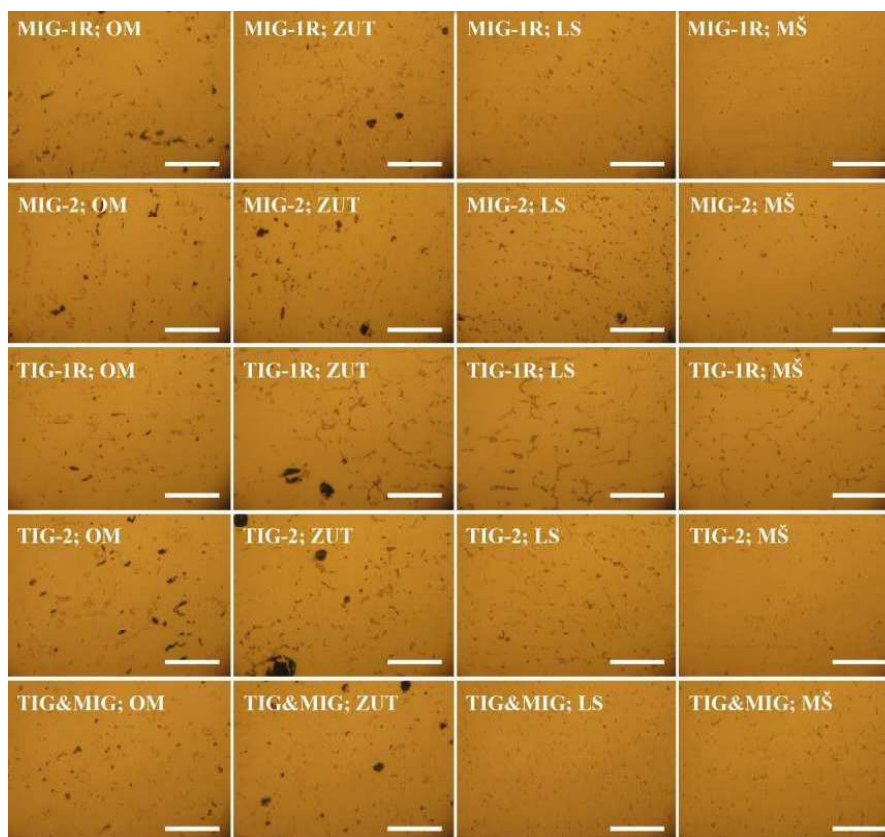
#### 2.2.1. Mikrostruktura uzoraka u zavarenom stanju

U OM i ZUT MIG-1R uzoraka, čiji hemijski sastav odgovara leguri AA6026, koja sadrži Bi i Pb (Tabela 1), je primećeno prisustvo intermetala morfologije kineskih slova sive boje (verovatno  $\alpha$ -AlFeSi), kao i sporadično prisustvo pločastih intermetala sive boje (verovatno  $\beta$ -AlFeSi). Tamnije igličaste faze, koje su sporadično detektovane su verovatno bile Mg<sub>2</sub>Si čestice, dok su krupnije, tamnije faze nepravilnog oblika bile najverovatnije Pb i Bi čestice i/ili intermetalne čestice na bazi ovih



elemenata. U ZUT MIG-1R uzoraka, koji je bio izložen toplotnom dejstvu električnog luka, primećeno je manje prisustvo morfologije kineskih slova sive boje (verovatno  $\alpha$ -AlFeSi), kao i pločastih intermetala slične nijanse (verovatno  $\beta$ -AlFeSi), pri čemu su pomenute čestice ove dve faze više težile sfernom obliku u poređenju sa odgovarajućim česticama u OM. Ovo je ukazivalo na pojavu delimične sferoidizacije i rastvaranja ovih čestica, što se posebno ogleda u skoro potpunom odsustvu tamnijih igličastih faza ( $Mg_2Si$ ) i skoro potpunoj sferoidizaciji i ukрупnjavanju tamnijih čestica na bazi Pb i Bi. Ono što je važno napomenuti je da su se intermetali retko raspoređivali po granicama zrna u ovoj oblasti. Drugim rečima, samo na pojedinim lokacijama su formirali morfologije nalik delimično kontinualnim filmovima po granicama zrna. U MŠ MIG-1R uzoraka, čiji sastav odgovara leguri AA5183, intermetalne čestice su bile sferičnog oblika i bile su ravnomerno raspoređene po celoj zapremini ove oblasti. Na LS, veličina intermetala je bila izraženija u odnosu na MŠ, ali su ovi intermetali i dalje bili dominantno sferičnog oblika sa ravnomernom raspodelom u ovoj oblasti.

TIG-1R uzorci su ispoljavali veoma sličnu mikrostrukturu u OM u poređenju sa MIG-1R uzorcima. Međutim, u ZUT, TIG-1R uzorci su jasno pokazivali izraženije prisustvo  $\alpha$ -AlFeSi,  $\beta$ -AlFeSi, i  $Mg_2Si$  faza u odnosu na ZUT MIG-1R uzoraka. Ove faze su bile izraženo prisutne po granicama zrna, što se povezivalo sa značajno većim unosom toplote po jedinici dužine zavarara pri pulsnom TIG zavarivanju u poređenju sa pulsним MIG zavarivanjem (Tabela 2). Naime, zbog većeg unosa toplote, ZUT TIG-1R uzoraka se sporije hladila, što je omogućavalo efikasniju difuziju elemenata iz čvrstog rastvora, a time i efikasnije formiranje intermetala po granicama zrna. U MŠ TIG-1R uzoraka je bila prisutna morfologija kineskih slova sive boje, a bile su detektovane i kompaktne čestice iste boje, što je ukazivalo na postojanje intermetala tipa  $Al_6(Fe,Mn)$ ,  $\alpha-Al_{12}(Fe,Mn)_3Si$  i/ili  $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$ . Takođe je bilo moguće i prisustvo  $Al_3Mg_2$  intermetalne faze. Međutim, zbog svoje veličine, detekcija ovog intermetala svetlosnom mikroskopijom je bile upitna. LS TIG-1R uzoraka je karakterisala mešovita struktura uočena u ZUT i MŠ ovih uzoraka.



**Slika 5.** Tipična mikrostruktura finalno poliranih uzoraka zavarenih spojeva u OM, ZUT, na LS i u MŠ. Dužina svih mernih skala u donjim uglovima slika iznosi 50  $\mu m$ .

**Figure 5.** Typical microstructure of welded joints after final polishing, shown in the base metal (OM), heat-affected zone (HAZ), fusion line (FL), and fusion zone (WM). The length of the scale bar in the lower left corner of each image is 50  $\mu m$ .



### 2.2.1. Mikrostruktura uzoraka zavarenih spojeva u T6 stanju

U OM, ZUT i MŠ, mikrostruktura MIG-2, TIG-2 i TIG&MIG uzoraka se karakterisala primetno smanjenim prisustvom intermetala morfologije kineskih slova, što je ukazivalo da su ovi intermetali bili delimično rastvoreni/sferoidisani tokom postupka rastvarajućeg žarenja. Intermetali su bili vidno manje zastupljeni po granicama zrna i nisu gradili kontinualne filmove po granicama zrna na način kako je to primećeno u slučaju uzoraka u zavarenom stanju. Međutim, u MŠ MIG-2, TIG-2 i

TIG&MIG uzoraka nije bilo uočljivo prisustvo  $Al_3Mg_2$  po granicama zrna nakon senzitivizacije na  $175^\circ C$  tokom 6 h, kao ni prisustvo  $Mg_2Si$  čestica u ZUT ovih uzoraka, što se pripisivalo malim dimenzijama ovih intermetala i nemogućnošću njihove detekcije svetlosnom mikroskopijom na finalno poliranim površinama uzoraka.

### 2.3. Specifična električna provodljivost različitih zona zavarenih spojeva

U Tabeli 3 su date srednje vrednosti specifične provodljivosti koje su izmerene u različitim zonama zavarenih spojeva.

**Tabela 3.** Srednje vrednosti specifične električne provodljivosti (MS/m) različitih zona zavarenih spojeva (za objašnjenje zona vidi Sliku 6).

**Table 3.** Mean values of electrical conductivity (MS/m) in different zones of welded joints (for explanation of zones see Figure 6).

Uzorak	Lokacija merenja						
	6	4	2	1	3	5	7
<b>MIG-1R</b>	24.9	25.9	21.8	12.7	23.44	25.6	24.3
<b>MIG-2</b>	25.4	25.5	19.8	14.5	19.1	25.3	25.4
<b>TIG-1R</b>	27.3	26.6	18.3	12.9	18.8	27.0	27.4
<b>TIG-2</b>	25.5	25.5	20.1	14.6	19.8	25.7	25.6
<b>TIG&amp;MIG</b>	25.7	25.8	19.5	14.3	19.7	25.7	25.8

Zbog lakšeg razumevanja merenja, na Slici 6 su prikazana tipična merna mesta koja su prethodno objašnjena u poglavlju 2.5.2.



**Slika 6.** Lokacije merenja specifične provodljivosti. Vertikalne linije su linije stapanja (LS), a brojevi pokazuju sledeće merne lokacije: 1 – MŠ, 2 i 3 – na LS, 4 i 5 – sonda tangira LS, 6 i 7 sonda u OM. Prečnik sonde je iznosio 8 mm.

**Figure 6.** Locations of electrical conductivity measurements. Vertical lines represent fusion lines (FL), and the numbers indicate the following measurement positions: 1 – fusion zone (WM), 2 and 3 – on the FL, 4 and 5 – probe tangential to the FL, 6 and 7 – probe in the base metal (BM). The probe diameter was 8 mm.

Nakon izvršenih merenja, rezultati su očigledno pokazali da specifična električna provodljivost merena sa ovom dimenzijom sonde (8 mm) ne može da se koristi za tumačenja razlika u ZUT (merne lokacije 2 i 3, Slika 6) jer je širina ZUT bila značajnije manja od prečnika sonde (Slika 4). Međutim, rezultati dobijeni na mernim lokacijama 4-

7 su mogli da se tumače u slučaju OM, kao i oni dobijeni na mernoj lokaciji 1 u slučaju MŠ. Drugim rečima, ova merenja su davala pouzdanije rezultate jer je širina merne sonde približno odgovarala širini MŠ (Slika 4), a posebno širini OM, koja je bila značajno veća.

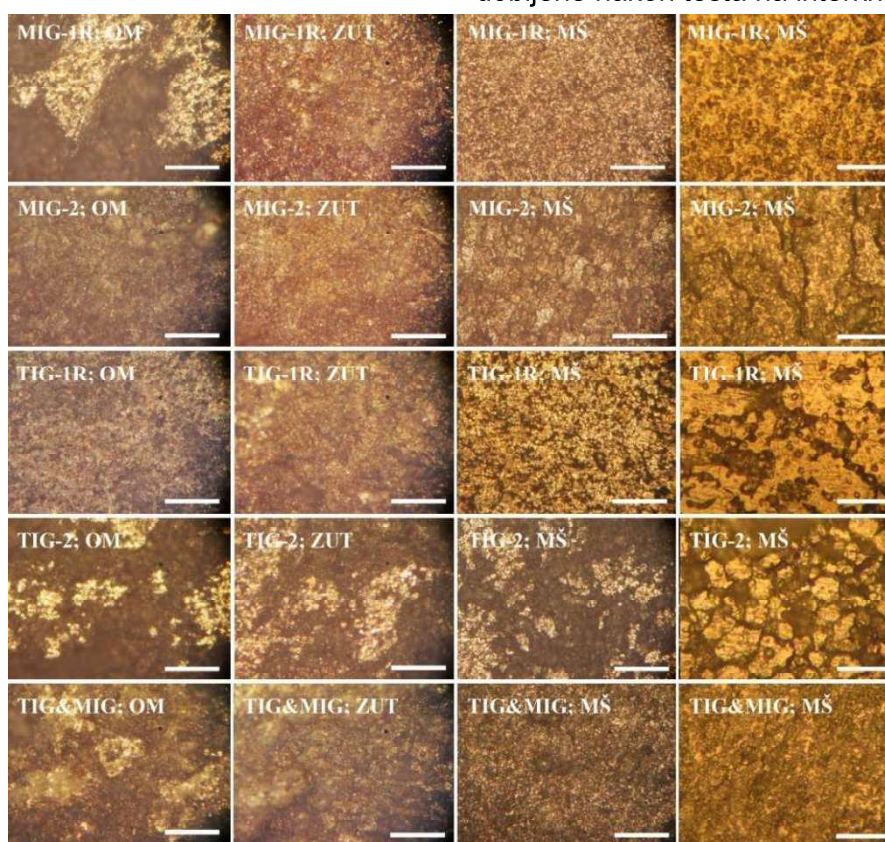


U OM svih uzoraka, razlike u vrednostima specifične električne provodljivosti nisu bile značajne, dok su nešto veće vrednosti zabeležene kod TIG-1R uzoraka (zavareno stanje). Ako se poredi vrednosti dobijene sa merne lokacije 1 (MŠ), vrednosti specifične električne provodljivosti kod svih zavarenih uzoraka u T6 stanju (MIG-2, TIG-2 i TIG&MIG) su ispoljavale konzistentno veće vrednosti u poređenju sa uzorcima u zavarenom stanju (MIG-1R i TIG-1R). S druge strane, specifična električna provodljivost uzoraka TIG-1R (zavareno stanje) je bila nešto veća u MŠ nego što je to bio slučaj kod uzoraka MIG-1R (zavareno stanje).

Poznato je da vrednost specifične električne provodljivosti značajno varira sa udelom rastvorenih atoma unutar čvrstog rastvora. Sa povećanjem ovog udela, specifična električna provodljivost opada. Drugim rečima, svi uslovi koji su tokom zavarivanja ili naknadne termičke obrade podsticali formiranje čestica intermetala, tj. smanjivali udeo rastvorenih atoma u čvrstom rastvoru, su uticali na povećanje specifične električne provodljivosti.

#### 2.4. Interkristalna korozija različitih zona zavarenih spojeva

Slika 7 prikazuje mikrostrukture različitih zona zavarenih spojeva u zavarenom i T6 stanju koje su dobijene nakon testa na interkristalnu koroziju.



**Slika 7.** Tipične mikrostrukture uzoraka zavarenih spojeva u OM, ZUT, i MŠ nakon ispitivanja otpornosti prema interkristalnoj koroziji. Dužina mernih skala na slikama u prve tri kolone je 50  $\mu\text{m}$ , dok je dužina mernih skala u poslednjoj koloni slike 200  $\mu\text{m}$ .

**Figure 7.** Typical microstructures of welded joint samples in BM, HAZ, and WM after intergranular corrosion resistance testing. The scale bar length in the first three columns is 50  $\mu\text{m}$ , while in the last column it is 200  $\mu\text{m}$ .

Ako se uporede uzorci u zavarenom stanju (MIG-1R i TIG-1R), tj. uticaj postupka zavarivanja, TIG-1R uzorci su u MŠ ispoljavali izraženiju interkristalnu koroziju u poređenju sa MŠ MIG-1R uzoraka gde pojava interkristalne korozije nije bila uočena. S druge strane, MŠ MIG-2 uzoraka (T6 stanje) u odnosu na MŠ MIG-1R uzoraka (zavareno stanje), kao i MŠ TIG-2 uzoraka (T6 stanje) u odnosu na MŠ TIG-1R uzoraka (zavareno stanje),

su pokazivali izraženiju interkristalnu koroziju, pri čemu je nivo degradacije korozivnih svojstava bio značajniji u slučaju uzoraka zavarenih pulsni TIG postupkom sa većim unosom toplote po jedinici dužine zavara. Slični nivoi degradacije su primećeni i u ZUT svih uzoraka. Ovi rezultati ukazuju da primena T6 naknadne termičke obrade nije poželjna sa stanovišta interkristalne korozione ispitanih zavarenih spojeva, posebno u slučaju



zavarivanja sa većom količinom toplote po jedinici dužine zavara.

TIG&MIG uzorci, zavareni kombinacijom pulsnih TIG i MIG postupaka sa najmanjom količinom unete toplote (Tabela 2), su ispoljili veoma sličnu korozionu postojanost kao uzorci MIG-1R (zavareno stanje), čak i u T6 stanju u kom su ispitani. Sa stanovišta interkristalne korozije, ovaj rezultat ukazuje na to da T6 naknadna termička obrada može da bude primenjena kod ispitanih zavarenih spojeva dobijenih sa manjim unosom toplote po jedinici dužine zavara u slučaju potrebe za poboljšanjem nekih drugih svojstava ovih zavarenih spojeva.

### 3. Diskusija rezultata

U zavarenom stanju se jasno pokazalo da je unos toplote ključni faktor koji određuje mikrostrukturu, električnu provodljivost i otpornost prema interkristalnoj koroziji. Kod MIG-1R uzoraka dobijenih pulsnih MIG postupkom, koji se karakterisao manjim unosom toplote i bržim hlađenjem, zabeleženo je manje prisustvo intermetalnih faza po granicama zrna u poređenju sa TIG-1R uzorcima. Ovakva mikrostrukturna konfiguracija je ograničavala nastanak galvanskih mikroćelija i smanjivala je sklonost prema interkristalnoj koroziji u MŠ ovih uzoraka. Nasuprot tome, u MŠ TIG-1R uzoraka dobijenih pulsnih TIG postupkom, koji se karakterisao većim unosom toplote i sporijim hlađenjem, zabeleženo je intenzivnije izdvajanje intermetalnih faza po granicama zrna nego u slučaju MIG-1R uzoraka, što je povećavalo mogućnost stvaranja kontinuiranih putanja interkristalnog korozionog napada, a time je i povećavalo sklonost prema interkristalnoj koroziji. Ove razlike su bile potvrđene i merenjem specifične električne provodljivosti. Naime, niže vrednosti u MŠ MIG-1R zavarenih spojeva su ukazivale na veći udeo rastvorenih atoma u čvrstom rastvoru i manje prisustvo intermetala, dok su više vrednosti u MŠ TIG-1R uzoraka potvrdile veću količinu istaloženih intermetala i manje prisustvo rastvorenih atoma u čvrstom rastvoru (Tabela 3). Merenja specifične električne provodljivosti nisu mogle da potvrde razlike u ZUT koje su bile prisutne kod MIG-1R i TIG-1R uzoraka. Međutim, izgled mikrostrukture nakon ispitivanja interkristalne korozije je to potvrdio na način da je degradacija materijala u ZUT TIG-1R uzoraka je bila nešto izraženija nego kod MIG-1R uzoraka (Slika 7).

Uopšteno, primena T6 režima (rastvarajuće žarenje, gašenje i veštačko starenje) dovodi do

homogenizacije mikrostrukture, ali takođe i do promena koje povećavaju sklonost prema interkristalnoj koroziji. U OM i ZUT, tokom rastvarajućeg žarenja,  $Mg_2Si$  čestice su se gotovo potpuno rastvorile, dok su se pločaste čestice  $\beta-AlFeSi$  delimično rastvorile i/ili transformisale u stabilniju fazu tipa  $\alpha-AlFeSi$ . U MŠ, veće čestice tipa  $Al_6(Fe,Mn)$  su opstale nakon rastvarajućeg žarenja, dok su prolazile kroz proces fragmentacije i sferoidizacije. Nakon kaljenja u vodi sa temperature rastvarajućeg žarenja, zavareni spoj je ostao u stanju prezasićenog čvrstog rastvora. Tokom starenja na  $175^\circ C/6h$ , došlo je do taloženja faza tipa  $Mg_2Si$  u OM i ZUT duž granica zrna, kao i do formiranja zona bez taloga. S druge strane,  $\beta-Al_3Mg_2$  faza se formirala duž granica zrna u MŠ. Sinergijski, procesi taloženja su značajno povećali sklonost prema interkristalnoj koroziji. Ove promene su se direktno odrazile i na specifičnu električnu provodljivost koja je u MŠ svih T6 uzoraka bila viša od one zabeležene u MŠ kod uzoraka zavarenom stanju. Razlog za to je taj što se tokom procesa taloženja na T6 uslovima smanjio sadržaj rastvorenih atoma u čvrstom rastvoru u većoj meri u odnosu na MŠ uzoraka u zavarenom stanju. U korozionim ispitivanjima svi T6 uzorci u MŠ su pokazali izraženiju degradaciju materijala u poređenju sa zavarenim stanjem. Ovo je u skladu sa većim vrednostima specifične električne provodljivosti izmerenim u MŠ T6 uzoraka. Veća vrednost je ukazivala na izraženije prisustvo lako rastvorljivih čestica taloga po granicama zrna. Ovi rezultati su potvrdili da je unos toplote tokom zavarivanja jedan od ključnih parametara koji je primetno uticao na ponašanje zavarenih spojeva u T6 stanju u uslovima interkristalne korozije. Kontrolisani režimi zavarivanja sa malim unosom toplote po jedinici dužine zavara su mogli da ublaže negativne efekte T6 termičkog tretmana na otpornost ispitanih uzoraka prema interkristalnoj koroziji.

### Zahvalnica / Acknowledgements

Rad je realizovan uz finansijsku podršku EUREKA projekta E!9992 EcoExtrusions (2016–2019) i Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije (451-03-136/2025-03/200287).

This work was carried out with the financial support of the EUREKA project E!9992 EcoExtrusions (2016–2019) and the Ministry of Science, Technological Development and Innovation of the Republic of Serbia (451-03-136/2025-03/200287).



#### 4. Zaključak

Ovaj rad je pokazao jasnu povezanost unosa toplote, mikrostrukture, električne provodljivosti i interkristalne korozije u AA6026/AA5183/AA6026 zavarenim spojevima. Rezultati su ukazivali na to da je najstabilnije stanje za otpornost prema interkristalnoj koroziji bilo upravo zavareno stanje uzoraka dobijenih sa niskim unosom toplote (MIG-1R uzorci). Međutim, dalja ispitivanja uzoraka zavarenih kombinacijom pulsni TIG (koreni prolaz) i MIG (popuna) postupaka (TIG&MIG) primenom još nižeg unosa toplote su pokazala da T6 naknadna termička obrada može biti uspešno primenjena kod zavarenih spojeva dobijenih sa nižim unosom toplote. Nasuprot tome, zavareni spojevi dobijeni primenom pulsni TIG postupka sa višim unosom toplote su pokazali da T6 naknadna termička obrada još više degradira otpornost ovakvih spojeva prema interkristalnoj koroziji.

#### Literatura / References

[1] Impol d.d., Aluminium alloy EN AW 6026, datasheet, v3/2022.

[2] Eural Gnutti, 6026 Lead Free (6026 LF) datasheet, 2018.

#### 4. Conclusion

This study demonstrated a clear correlation between heat input, microstructure, electrical conductivity, and intergranular corrosion in AA6026/AA5183/AA6026 welded joints. The results indicated that the most stable condition for intergranular corrosion resistance was the as-welded state of samples produced with low heat input (MIG-1R). However, further examination of samples welded using a combination of pulsed TIG (root pass) and pulsed MIG (filling passes) procedures (TIG&MIG), with even lower heat input, showed that the T6 post-weld heat treatment could be successfully applied to welded joints produced under reduced heat input. In contrast, welded joints obtained by pulsed TIG welding with higher heat input showed that the T6 post-weld heat treatment further degraded their resistance to intergranular corrosion.

[3] Kamarska, K. (2020): Corrosion Behaviour of Aluminium Alloys EN AW-6026 and EN AW-6082 in a Sulphuric Acid Medium. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 878 (1), 012067. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/878/1/012067>

VESTI



NEWS

### MEĐUNARODNA KONFERENCIJA O ZAVARIVANJU TRENJEM (IFWC)

19-21 May 2026 TWI Ltd, Granta Park, Great Abington, Cambridge CB21 6AL

Međunarodna konferencija o zavarivanju trenjem (IFWC) je veliki međunarodni događaj za istraživače, inženjere i stručnjake iz industrije zainteresovane za tehnike spajanja i obrade metala zasnovane na trenju. To je nova udružena konferencija koja spaja dva dugogodišnja, dobro uspostavljena simpozijuma: Međunarodni simpozijum o zavarivanju trenjem sa mešanjem (FSW) i Međunarodni simpozijum o zavarivanju linearnim trenjem (LFW).

Konferencija pokriva širok spektar tehnologija zasnovanih na trenju, uključujući, ali ne ograničavajući se na: rotaciono zavarivanje trenjem, linearno zavarivanje trenjem, zavarivanje trenjem sa mešanjem i obradu trenjem sa mešanjem. Takođe uključuje sesije o srodnim temama kao što su ispitivanje bez razaranja, numeričko modelovanje i industrijske primene. Događaj je osmišljen da podstakne značajnu, višedisciplinarnu razmenu mišljenja između stručnjaka iz različitih oblasti.

Konferencija 2026. godine održaće se u sedištu TWI Ltd (The Welding Institute) u blizini Kembridža, u Velikoj Britaniji. Ova lokacija je značajna jer je TWI mesto gde je 1991. godine izmišljen proces zavarivanja trenjem sa mešanjem (FSW).

Događaj privlači globalnu publiku akademika i stručnjaka iz industrije. To je ključna prilika za istraživače da predstave svoja najnovija otkrića i za stručnjake iz prakse da saznaju o novim primenama i saznanjima. Program uključuje tehničke prezentacije, poster sesije i događaje za umrežavanje.

Spajanjem ova dva simpozijuma, IFWC pruža sveobuhvatan forum za celokupnu zajednicu zavarivanja trenjem. Konferencija se nadovezuje na istoriju dugu decenijama u ovim oblastima, nudeći jedinstvenu priliku za povezivanje, saradnju i doprinos budućnosti zavarivanja trenjem i njegovih primena u industrijama kao što su vazduhoplovstvo, automobilska industrija i brodogradnja. Više informacija na internet adresi: <https://www.twi-global.com/media-and-events/events-diary/international-friction-welding-conference-2026>.

*Zoran Odanović*