

Институт за хемију, технологију и металургију Београд  
E-mail: mvlahovic@tmf.bg.ac.rs  
Др Милица Влаховић, виши научни сарадник  
Датум: 10.3.2020. године

Поштована,

На основу Вашег захтева од 4.12.2019. године за потврду оцене техничког решења под називом:

„Побољшање електро-механичких својстава Al/Cu електричних конектора смањењем интерметалног слоја, поступком редуковања времена заваривања трењем“ аутори : Вељко Милашиновић, Драгослав Милашиновић, Мијат Милашиновић Никола Милашиновић, Александар Јевремовић, Карло Раић, Ана Алил, Стефан Дикић, Милица Влаховић, Сања Мартиновић и Бојан Глигоријевић из 2018. године,

Обавештавам Вас следеће:

Након прибављених мишљења о наведеном техничком решењу чланови МНО за материјале и хемијске технологије су их, на седници одржаној 15.7.2019. године, разматрали и сачинили предлог да техничко решење:

„Побољшање електро-механичких својстава Al/Cu електричних конектора смањењем интерметалног слоја, поступком редуковања времена заваривања трењем“ аутори : Вељко Милашиновић, Драгослав Милашиновић, Мијат Милашиновић Никола Милашиновић, Александар Јевремовић, Карло Раић, Ана Алил, Стефан Дикић, Милица Влаховић, Сања Мартиновић и Бојан Глигоријевић из 2018. године, **ИСПУЊАВА** све услове предвиђене *Правилником о поступку и начину вредновања и квантитативном исказивању научноистраживачких резултата истраживача* („Службени гласник РС“, број 24/2016, 21/2017, 38/2017) за доделу категорије **M85 - Ново техничко решење (није комерцијализовано)**.

Предлог се доставља МПНТР РС ради процене и прихватања истог.

Председник МНО  
за материјале и хемијске технологије



Проф. др Влада Вељковић



## ТЕХНИЧКО РЕШЕЊЕ

**Projekat:** New forged-quality Al/Cu bimetallic electrical connectors

**Evidencioni broj:** Fond za inovacionu delatnost RS ID 920, VEMID d.o.o.,

Izvršilac: Tehnološko-metalurški fakultet u Beogradu, Univerzitet u Beogradu

**Rukovodioc projekta:** Bojan Gligorijević

**Ostvareni rezultat:** M85 - novo tehničko rešenje u fazi realizacije

### **POBOLJŠANJE ELEKTRO-MEHANIČKIH SVOJSTAVA Al/Cu ELEKTRIČNIH KONEKTORA SMANJENJEM INTERMETALNOG SLOJA, POSTUPKOM REDUKOVANJA VREMENA ZAVARIVANJA TRENJEM**

#### **Autori:**

Veljko Milašinović

Dragoslav Milašinović

Mijat Milašinović

Nikola Milašinović

Aleksandar Jevremović

Karlo Raić

Ana Alil

Stefan Dikić

Milica Vlahović

Sanja Martinović

Bojan Gligorijević

## **1. Autori tehničkog rešenja**

Veljko Milašinović, Dragoslav Milašinović, Mijat Milašinović, Nikola Milašinović, Aleksandar Jevremović, Karlo Raić, Ana Alil, Stefan Dikić, Milica Vlahović, Sanja Martinović, Bojan Gligorijević

## **2. Naziv tehničkog rešenja**

Poboljšanje elektro-mehaničkih svojstava Al/Cu konektora smanjenjem intermetalnog sloja, redukovanjem vremena zavarivanja trenjem

## **3. Ključne reči**

Zavarivanje trenjem, Intermetal, Aluminijum, Bakar, Električni konektor

## **4. Za koga je rešenje rađeno**

VEMID d.o.o., Vinorača, Jagodina

## **5. Godina kada je rešenje kompletirano**

2019.

## **6. Godina kada je rešenje počelo da se primenjuje i kod koga**

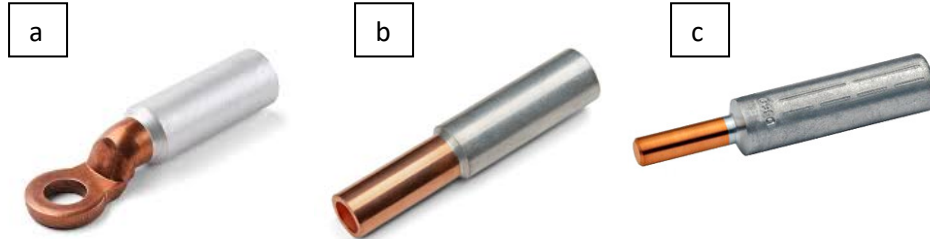
2017. VEMID d.o.o.

## **7. Oblast i naučna disciplina na koju se ovo tehničko rešenje odnosi**

Materijali i hemijske tehnologije

## **8. Opis tehnološkog procesa**

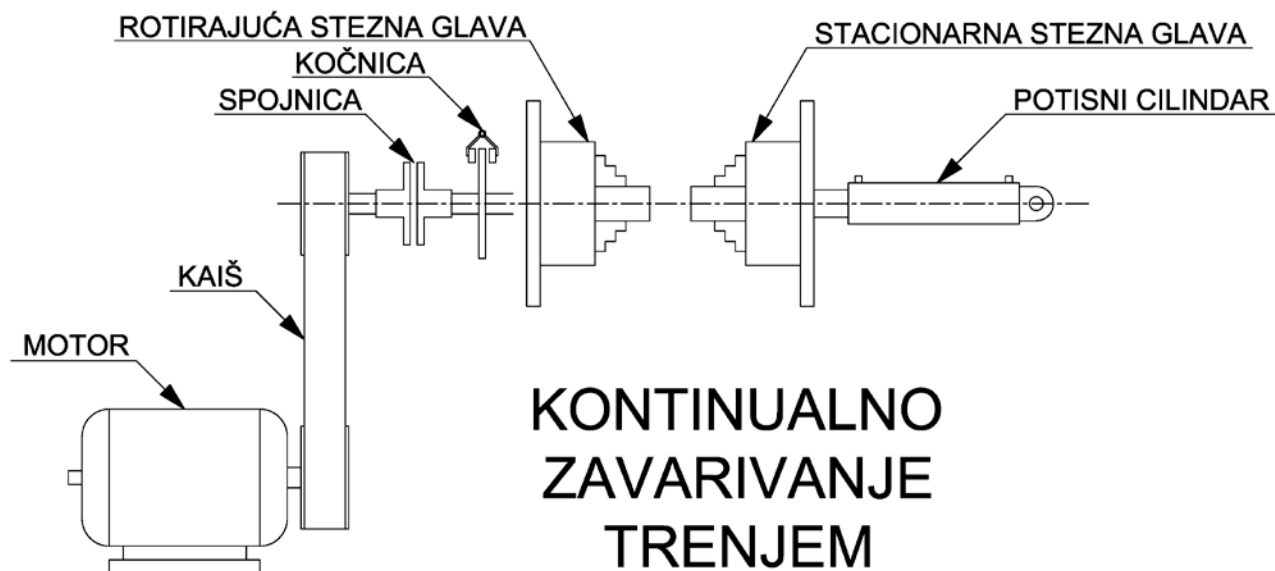
Al/Cu konektori [ **a**) Al/Cu bimetalne papučice, **b**) Al/Cu bimetalne čaure, **c**) Al/Cu bimetalne završnice] (**slika 1.**) nastaju kontinualnim zavarivanjem trenjem Al šipke i Cu šipke. Postupak se odvija tako što se aluminijumska šipka prethodno odsečena na potrebnu dužinu stavlja u steznu glavu koja je preko elektromagnetne spojnice i kaišnog prenosnika povezana sa pogonskim elektromotorom koji obezbeđuje rotaciju. Broj obrtaja je određen kombinacijom odgovarajućih kaišnika. Bakarna šipka, prethodno isečena na odgovarajuću dužinu se stavlja u steznu glavu koja je povezana sa hidrauličnim cilindrom koji obezbeđuje potrebni pritisak. Proces se odvija u dve faze: 1. faza trenja i 2. faza utiskivanja.



**(slika 1) a) Al/Cu papučica, b) Al/Cu čaura, c) Al/Cu završetak**

1. faza, faza trenja počinje kretanjem Al komada ka Cu komadu. Odmah po kontaktu Al i Cu komada, senzor detektuje povećanje pritiska i uključuje elektromotor a Al komad počinje rotaciju. U trenutku uključanja elektromotora kreće vreme  $T_1$  koje traje do trenutka kada elektromagnetna spojnica isključuje tj. odvaja steznu glavu od pogonskog elektromotora a pneumatska kočnica trenutno zaustavlja rotaciju Al komada. Hidraulični cilindar u toku ovog procesa obezbeđuje potrebni pritisak (  $P_1$  - radni pritisak ) između Al i Cu komada dok Al komad vrši rotaciju. Ovo kao posledicu ima stvaranje trenja na interfejsu koje je izvor energije potrebne za ostvarivanje metalurške veze između Al i Cu komada.

Faza 2, faza utiskivanja, počinje odmah po završetku faze 1 tj. u trenutku zaustavljanja rotacije Al komada. U tom trenutku hidraulični cilindar počinje dejstvo pritiskom  $P_2$  (pritiskom utiskivanja) koji je jednak ili veći od radnog pritiska  $P_1$  i traje  $T_2$ . Faza 2 obezbeđuje dodatno ojačavanje spoja stvaranjem jače veze [1]. Nakon toga zavareni komad se oslobađa iz steznih čeljusti stezne glave i mašina se vraća u početni položaj.



(slika 2) Crtež mašine za kontinualno zavarivanje trenjem

#### KARAKTERISTIKE MAŠINE

P1 - pritisak trenja (10-150 bar)

P2 - pritisak utiskivanja (10-150 bar)

T1 - vreme trenja (0,1-1800s)

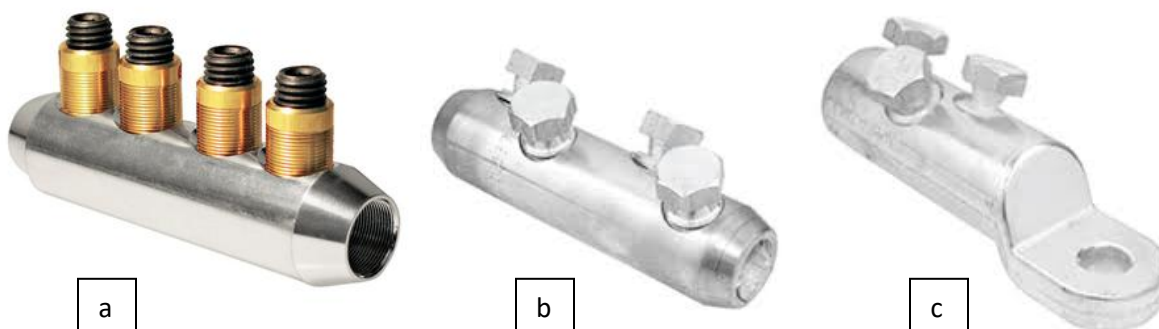
T2 - vreme utiskivanja (0,1-1800s)

n - broj obrtaja (500-2100 o/min)

### 9. Tehnički problem i stanje rešenosti u svetu

Nakon više decenija upotrebe Al/Cu konektora došlo se do određenih zaključaka i utvrđene su određene mane karakteristične za ovu vrstu proizvoda. Jedan od najvećih i najčešće spominjanih nedostataka Al/Cu konektora je neizvesnost Al/Cu spoja tj. sklonost ka pucanju Al/Cu spoja kod jednog broja komada u toku montaže. Većina proizvođača je sebe zaštitila tako što su u pratećoj dokumentaciji proizvoda naveli da Al/Cu konektori nisu predviđeni za mehaničko opterećenje. Na ovaj način je otvoren put proizvodima sa slabijim električnim performansama kao što su AlMgSi konektori sa zavrtnjima sa kidajućom glavom (**slika 3**) koji ostvaruju lošiji kontakt konektora i kabla jer se veza ostvaruje tako što AlMgSi ili mesingani šraf pritisne Al kabl koji se ubaci u AlMgSi čauru (**slika 4**), dok se kod Al/Cu konektora veza između Al kabla i Al/Cu konektora ostvaruje presovanjem Al kabla u Al čauri (**slika 5**). Al/Cu konektori se izrađuju od Aluminiјuma čistoće 99,5-99,7 % Al i Bakra čistoće 99.95 % Cu. Isti Aluminiјum koji se koristi za Al/Cu konektore se koristi i za izradu Al užadi za kablove i isti Bakar koji se koristi za izradu Al/Cu

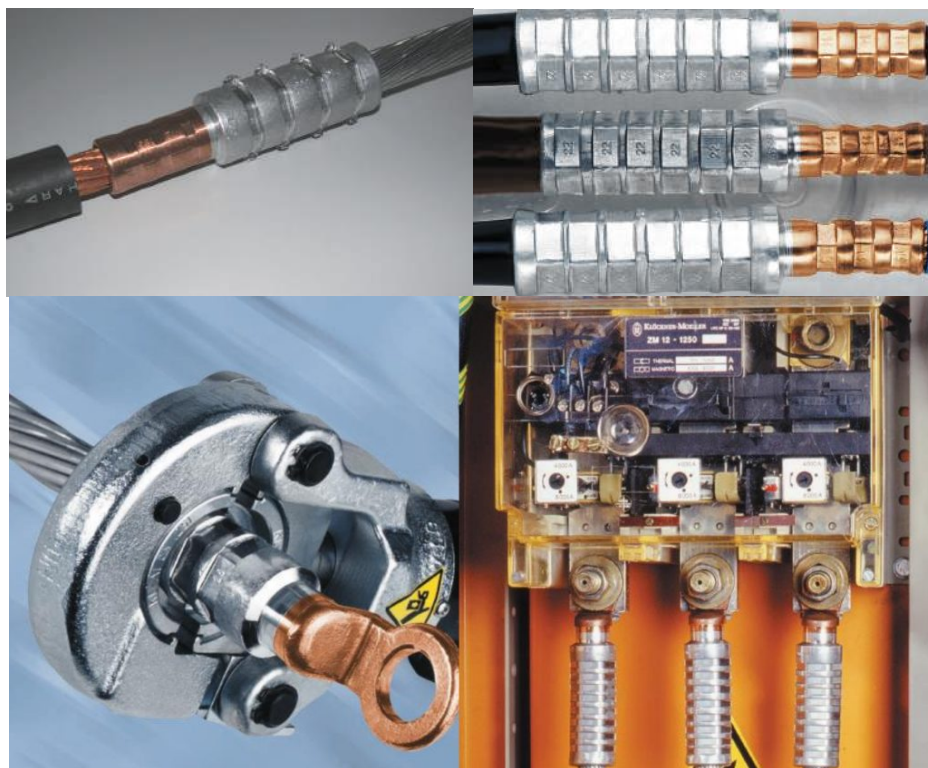
konektora se koristi za izradu užadi za Cu kablove i Cu sabirnice. Na ovaj način se ostvaruje spoj istorodnih materijala koji ima bolje električne performanse od spoja Al i Cu užadi sa AlMgSi konektorom pomoću AlMgSi ili mesinganih šrafova. Kao prednost AlMgSi konektora se navodi jedino manji škart AlMgSi konektora pri montaži od Al/Cu konektora što sa finansijske strane opravdava njihovu upotrebu. S druge strane njihovi nedostaci su osim lošijeg kontakta i sklonost zavojne veze da popusti i oslabi vezu između kabla i konektora što može dovesti do daljih komplikacija.



**(slika 3)** a) AlMgSi čaura sa mesinganim šrafovim, b) AlMgSi čaura sa AlMgSi šrafovim sa kidajućom glavom , c) AlMgSi papučica sa AlMgSi šrafovim sa kidajućom glavom



**(slika 4)** Ostvarivanje veze između konektora sa navojnom vezom i kabla



(slika 5) Ostvarivanje veze između Al/Cu konektora i kabla

Nakon dugog perioda eksploatacije i velikog broja različitih studija i ispitivanja utvrđeno je da je uzrok pucanja Al/Cu spojeva pojava intermetalnih jedinjenja na interfejsu Al/Cu konektora. Postojanje ovih jedinjenja na interfejsu za posledicu ima veliki broj negativnih svojstava od kojih su najbitnija krtoost spoja koja je glavni razlog za pucanje konektora na interfejsu i slabija provodljivost.

## 10. Opis tehničko tehnološkog rešenja

Nakon identifikacije glavnog problema tj. nastanka intermetalnih jedinjenja na interfejsu:  $Al_2Cu$ ,  $AlCu$ ,  $Al_3Cu_4$ ,  $Al_2Cu_3$  i  $Al_4Cu_9$  [2] i na osnovu iskustva i podataka iz literature pristupilo se testiranju 3 grupe uzoraka. Sve 3 grupe uzoraka su izrađene kontinualnim zavarivanjem trenjem Al i Cu šipki prečnika **d=14mm** i dužine **L=90mm** za Cu i **L=100mm** za Al (aluminijum se skraćuje aksijalno u procesu zavarivanja i nastaje takozvana "pečurka" (slika 6) pa se iz tog razloga Al pripremci izrađuju 5-20mm duži od tražene dužine) sa režimima zavarivanja koji su izabrani iskustveno jer su dali najbolje rezultate u eksploataciji za izabrani prečnik. Izabrani parametri zavarivanja: **n=1800 o/min**, **P1=82 MPa**, **P2=294 Mpa**, **T2=4,5s**. Ranije urađeni testovi pokazali su da kraća vremena trenja **T1** u kombinaciji sa pritiscima utiskivanja **P2** koji su **2.5** i više puta veći od **P1** daju bolje rezultate na mehaničkim testovima pa je jedini parametar procesa koji se razlikuje za 3 grupe uzoraka vreme **T1** (vreme trenja) zbog najvećeg uticaja na stvaranje intermetala na Al/Cu interfejsu. 3 grupe uzoraka su urađene u cilju potvrde pretpostavke da se sa kraćim vremenima trenja **T1** dobijaju spojevi sa boljim mehaničkim svojstvima. Izabrana vremena **T1** su 0,75s za prvu grupu uzoraka koja i predstavlja kombinaciju optimalno izabranih parametara za ostvarivanje kvalitetnog spoja Al i Cu. Druge dve grupe su urađene sa većim vremenima trenja T1 (2s i 4s) i predstavljaju kombinaciju parametara

koji su u standardnoj upotrebi u procesima zavarivanja trenjem i iskorišćeni su u cilju upoređivanja svojstava sa novim rešenjem.



(slika 6) Izgled tipične takozvane "pečurke"

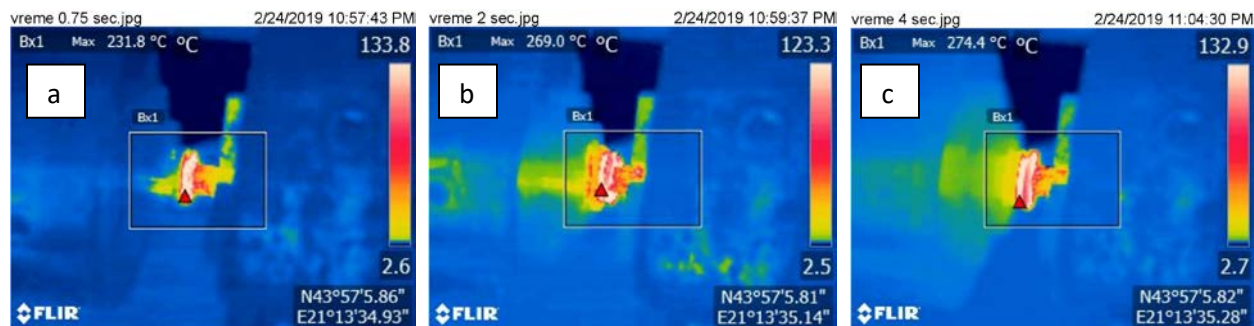
Za potrebe ispitivanja izrađeno je 27 uzoraka: za 3 režima zavarivanja po 3 za aksijalno zatezanje, 3 za merenje električne otpornosti i 3 za mikroskopiju.

Za sve grupe uzoraka izvršena su sledeća ispitivanja: jednosno zatezanje, SEM i termovizija.

U daljem tekstu: **1. grupa** ( $T_1=0,75s$ ), **2. grupa** ( $T_1=2s$ ), **3. grupa** ( $T_1=4s$ )

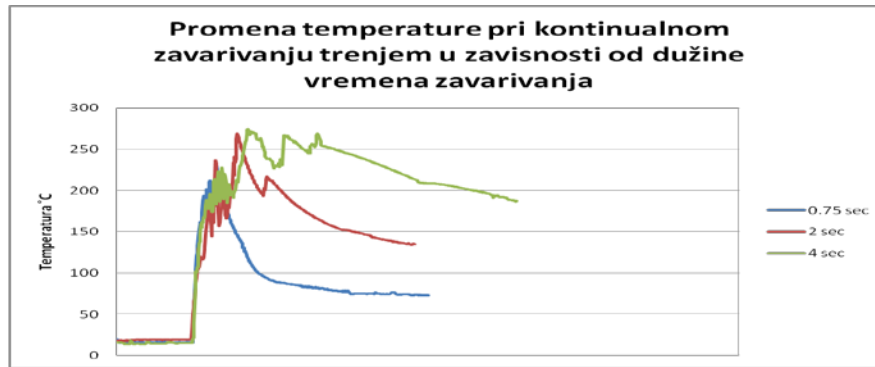
### 10.1 Termovizija

Termovizijsko snimanje je izvršeno pri pravljenju uzoraka za ispitivanje sa kamerom FLIR E53 u temperaturnom opsegu od 0-650°C sa 30 fps. Snimljen je ceo ciklus zavarivanja, izvučeni su frejmovi sa najvišom izmerenom temperaturom (slika 7) i napravljen je dijagram izmerene temperature u toku ciklusa zavarivanja (slika 8). Temperature koje su izmerene ne predstavljaju prave temperature koje se javljaju na spoju jer pojava stvaranja Al pečurke koja je karakteristična za proces zavarivanja trenjem skriva Al/Cu interfejs i onemogućava merenje temperature na kontaktu Al i Cu. Izvršena merenja prikazuju temperaturu Al pečurke i pokazalo se da je količina energije koja je izašla preko pečurke i koja je prenešena na osnovni materijal iz zone zavarivanja znatno veća sa povećanjem vremena zavarivanja.



(slika 7) Najveće izmerene temperature pri kontinualnom zavarivanju trenjem Al-Cu sa vremenima a) 0,75s, b) 2s, c) 4s





(slika 8) Grafik promene temperature

## 10.2 Merenje električne otpornosti

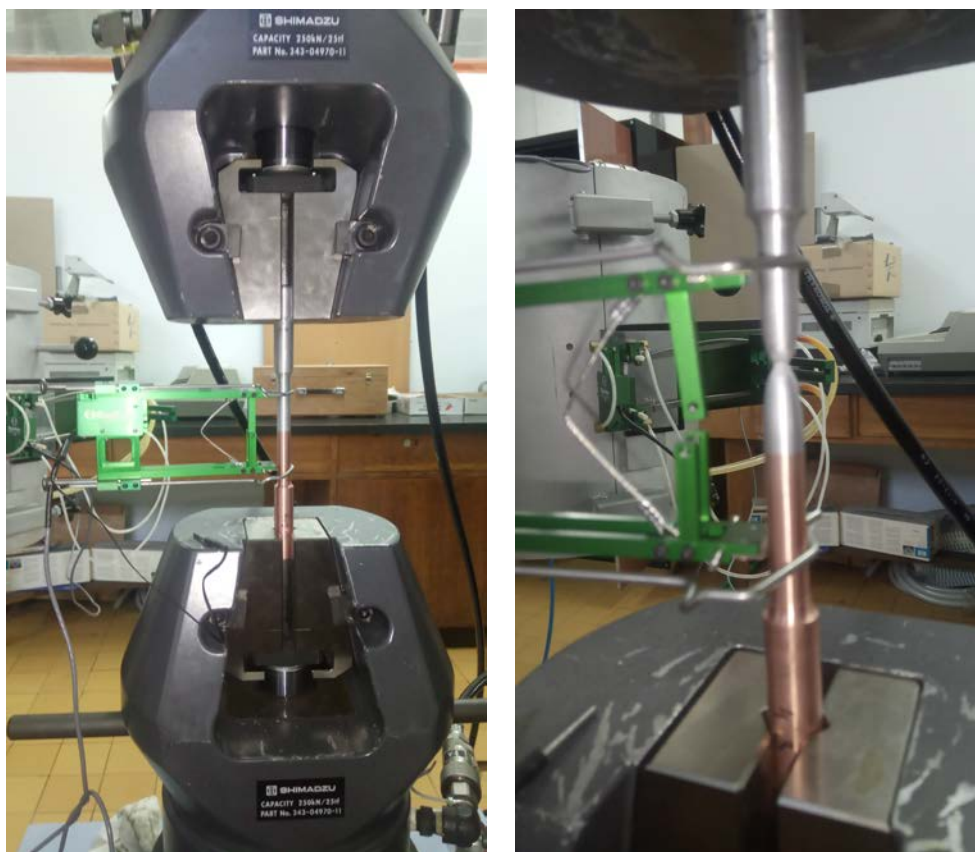
Merenje električne otpornosti je izvršeno na uzorcima specijalno pripremljnim za merenje električne otpornosti (slika 9). Svi uzorci su dužine približno 180mm (dužina uzoraka nije ista zbog pojave aksijalnog skraćivanja aluminijuma koja je karakteristična za proces zavarivanja trenjem) i prečnika 13.2mm  $\pm 0.06$ mm (nakon strugarske obrade), s tim što je za pretvaranje izmerene električne otpornosti u specifičnu električnu provodljivost uzimana tačna izmerena vrednost. Uređaj kojim je merena električna otpornost je RMO200D proizvođača DV Power sa ugrađenim modulom za visoku tačnost merenja i rezolucijom od 0.01 $\mu\Omega$ . Sva merenja su izvršena na sobnoj temperaturi od  $22 \pm 1$  °C. Sva merenja su ponovljena po 10 puta sa strujom od 50A i 100A. Kao rezultat merenja uzeta je srednja vrednost. Za 1.grupu uzoraka dobijena specifična provodljivost je  $\sigma=48.18$  Ms/m, za 2.grupu uzoraka  $\sigma=47.16$  Ms/m i za 3.grupu uzoraka  $\sigma=45.64$  Ms/m. Merenje je pokazalo da je dobijena specifična električna provodljivost uzoraka 1. grupe u odnosu na 2.grupu veća za 2.12% a uzoraka 1. u odnosu na 3. grupu veća za 5.27%.



(slika 9) Izgled uzorka za merenje električne otpornosti

## 10.3 Aksijalno zatezanje

Za određivanje mehaničkih svojstava aluminijumskih i bakarnih otpresaka izvršeno je aksijalno zatezanje prema standardu SRPS EN ISO 6892-1:2012 metod B. Ispitano je 8 cilindričnih epruveta nominalnog prečnika 9.00 mm. Zatezna ispitivanja epruveta su izvedena na elektromehaničkoj kitalici Shimadzu AG-X Plus 250kN (slika 10). Za merenje jediničnog izduženja upotrebljavan je ekstenzometar početne merne dužine 50 mm "Epsilon Model 3542". Uvođenje opterećenja je obavljeno u kontroli hoda, brzinom od 5 mm/min na ambijentalnoj temperaturi.



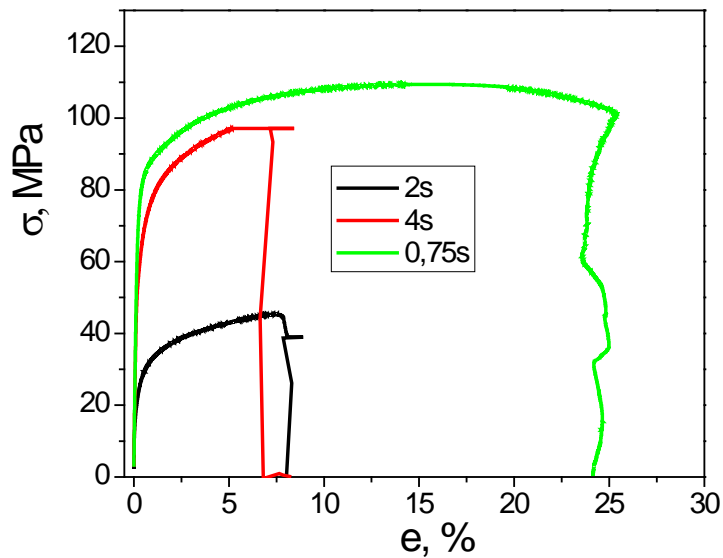
(slika 10) Elektromehanička kidalica Shimadzu AG-X Plus 250kN sa Ekstenzometrom početne merne dužine 50 mm "Epsilon Model 3542"

Rezultati ispitivanja cilindričnih epruveta su prikazani u tabeli 1. U tabeli su date izmerene vrednosti:  $d$  – prečnik epruvete,  $l_0$  – merna dužina,  $R_{p0.2}$  - konvencionalni napon tečenja,  $R_m$  - zatezna čvrstoća i  $e_{uk}$  - ukupno izduženje pri prekidu.

Za 1.grupu uzoraka (označenih akronimom 4) kod kojih je vreme zavarivanja najkraće dobijene su najveće vrednosti napona tečenja, zatezne čvrstoće i ukupnog izduženja pri prekidu i srednje vrednosti iznose 78.5MPa; 107.8MPa i 26% respektivno. U tabeli 1 evidentno je da za 2.grupu uzoraka (označenih akronimom 2 kod kojih je vreme zavarivanja 2s) i 3.grupu uzoraka (označenih akronimom 3 kod kojih je vreme zavarivanja 4s) vrednosti mehaničkih svojstava su znatno niže. Ispitivanje aksijalnim zatezanjem cilindričnih epruveta Al/Cu spojeva je pokazalo da mehanička svojstva se poboljšavaju sa smanjenjem vremena zavarivanja (slika 11). Izgled epruveta posle testa zatezanjem prikazan je na slici 12.

Tabela 1. Zatezna svojstva ispitivanih cilindričnih epruveta

oznaka epruvete (vreme zavarivanja trenjem)	$d$ mm	$l_0$ mm	$R_{p02}$ MPa	$R_m$ MPa	$e_{uk}$ %
2-1 (2s)	8,99	50	29,4	40,9	12,6
2-2 (2s)	9,03	50	22,7	45,4	8,1
2-3 (2s)	9,04	50	26,1	46,4	4,9
sred. vred.			26,1	44,2	8,5
3-1 (4s)	8,99	50	62,4	97,1	5,2
3-2 (4s)	8,98	50	67,0	81,7	1,8
sred. vred.			64,7	89,4	3,5
4-1 (0,75s)	9,02	50	77,8	103,9	27,2
4-2 (0,75s)	8,99	50	77,9	110,1	25,4
4-3 (0,75s)	9,00	50	79,8	109,4	25,3
sred. vred.			78,5	107,8	26,0



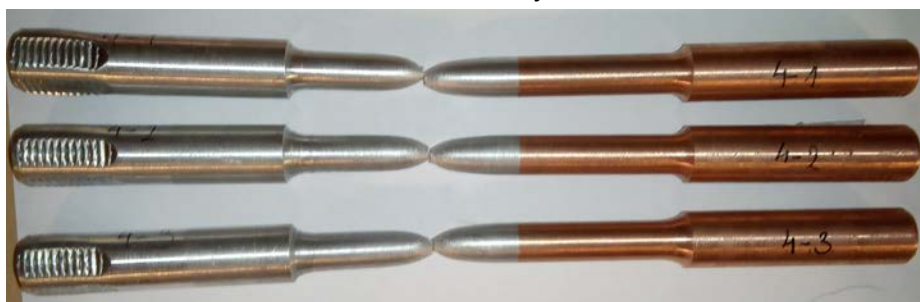
(slika 11) Uticaj vremena zavarivanja na mehanička svojstva Al/Cu spojeva



Vreme zavarivanja 2s



Vreme zavarivanja 4s

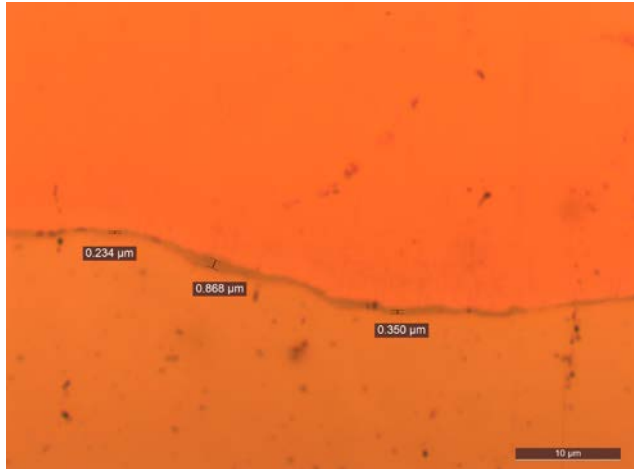


Vreme zavarivanja 0,75s

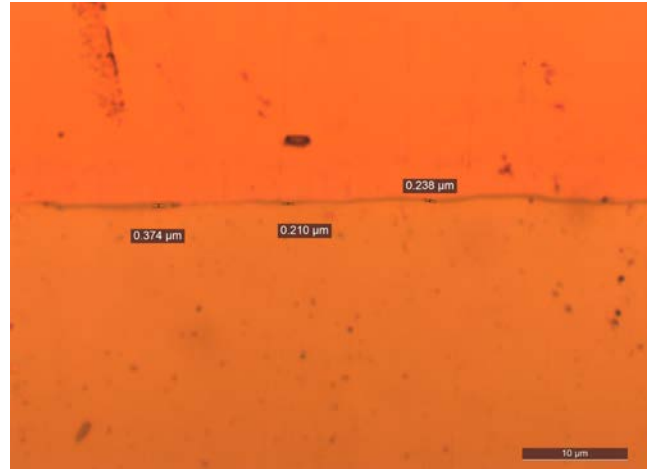
(slika 12) Izgled epruveta posle testa zatezanjem

#### 10.4 Optička mikroskopija

Uzorci za optičku mikroskopiju, predstavljaju zonu spoja Al-Cu dobijenu zavarivanjem trenjem, pri različitim vremenima. Uzorci su mehanički pripremljeni na brusnim papirima finoće P320 - P3000, nakon čega su polirani dijamantskim pastama granulacije 6, 3 i 1 $\mu$ m. Za završno poliranje korišćena je OPU suspenzija. Uzorci su posmatrani i fotografisani u poliranom stanju, na optičkom mikroskopu Reichert MeF3, pri uvećanju 500x. Na slikama 13, 14 i 15 date su odgovarajuće mikrofotografije zone zavarenog spoja Al-Cu za: a) periferiju i b) centralni deo reprezentativnih uzorka iz grupa 1, 2 i 3.

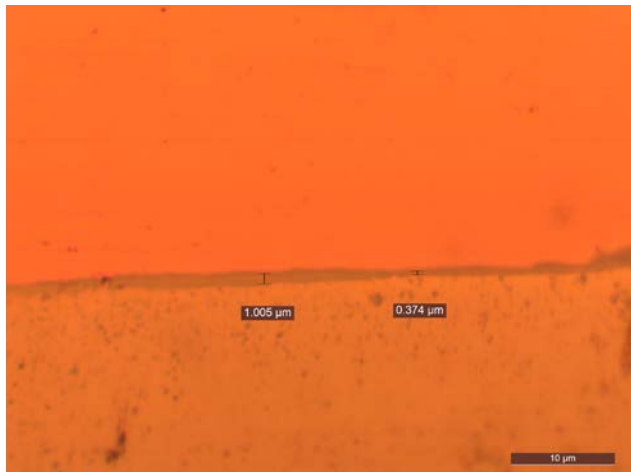


a)

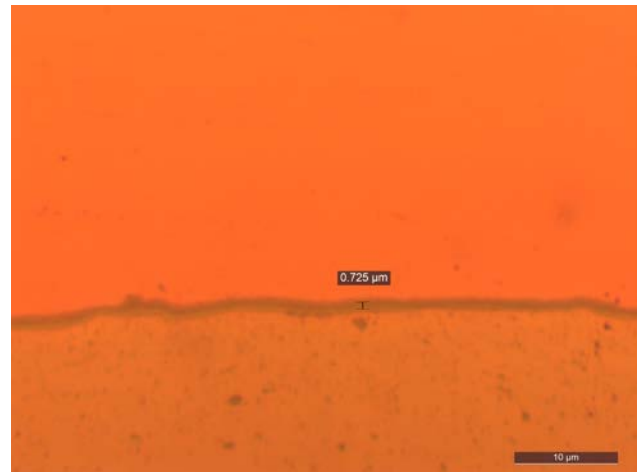


b)

(slika 13) Mikrofotografije zone zavarenog spoja Al-Cu: a) periferija b) centralni deo uzorka (grupa 1)

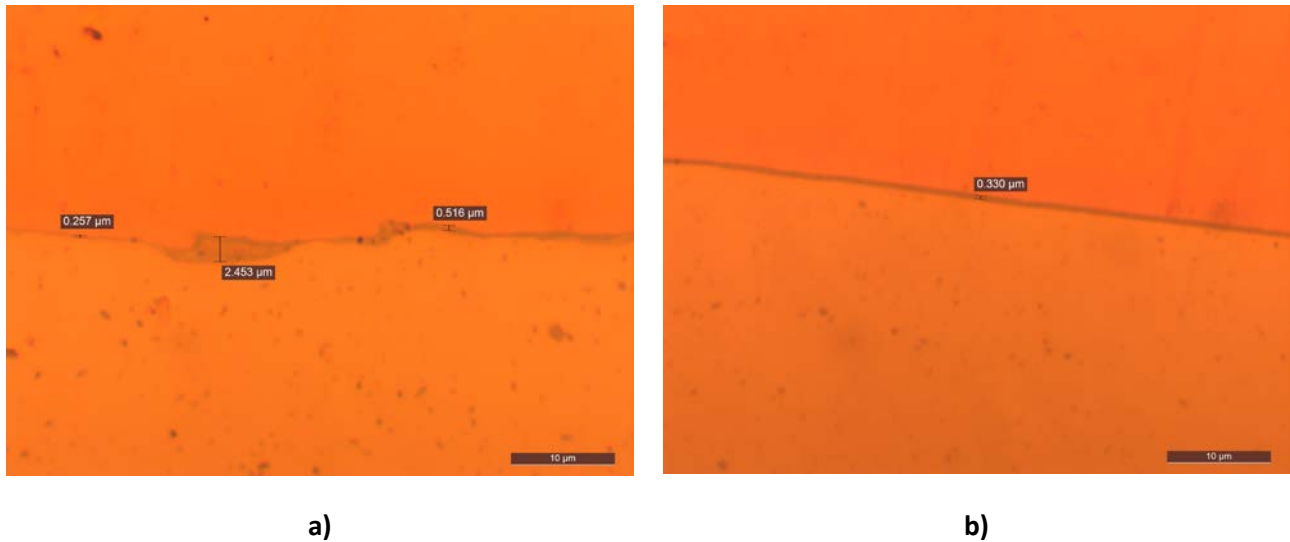


a)



b)

(slika 14) Mikrofotografije zone zavarenog spoja Al-Cu: a) periferija b) centralni deo uzorka (grupa 2)



(slika 15) Mikrofotografije zone zavarenog spoja Al-Cu: a) periferija b) centralni deo uzorka (grupa 3)

## 11. Zaključci i rezultati

1. Upotrebom kraćeg vremena **T1** (vreme trenja) ne dolazi do stvaranja intermetalnih jedinjenja ili je njihova količina nedovoljna da bi mogli da se detektuju.
2. Manja količina intermetala povećava provodljivost konektora.
3. Kraća vremena trenja u kombinaciji sa velikim pritiscima utiskivanja ( $P_2 > 2.5 \times P_1$ ) daju bolja mehanička svojstva Al/Cu spojeva.
4. Upotrebom kraćeg vremena zavarivanja povećava se ekonomičnost i produktivnost procesa.
5. Upotrebom kraćeg vremena zavarivanja se smanjuje potrošena količina električne energije pa ovo rešenje ima i pozitivan ekološki uticaj.

## LITERATURA

- [1] Veljko D. Milašinović, Radovan V. Radovanović, Mijat D. Milašinović, Bojan R. Gligorijević, *Effects of friction welding parameters on morphological appearance of Al/Cu bimetallic joint*, Materials and technology, Issue 50 (1) (2016) 89-94
- [2] YanniWei, Jinglong Li, Jiangtao Xiong, Fusheng Zhang, *Investigation of interdiffusion and intermetallic compounds in Al-Cu joint produced by continuous drive friction welding*, Engineering Science and Technology, an International Journal 19 (2016) 90-95
- [3] Mumin Sahin, *Joining of aluminium and copper materials with friction welding*, Int J Adv Manuf Technol (2010) 49:527-534
- [4] M. Maalekian, *Friction welding—critical assessment of literature*. Sci Technol Weld Join 12(8) (2007)738-759