Ispitivanje svojstava bakrene i aluminijske legure i njihova spoja za primjenu u elektrotehnici

Mašinović, Dario

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Metallurgy / Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:115:843908

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU METALURŠKI FAKULTET
UNIVERSITY OF ZAGREB FACULTY OF METALLURGY
SISAK

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb - Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

Dario Mašinović

ZAVRŠNI RAD

Sisak, rujan 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

Dario Mašinović

ISPITIVANJE SVOJSTAVA BAKRENE I ALUMINIJSKE LEGURE I NJIHOVA SPOJA ZA PRIMJENU U ELEKTROTEHNICI

ZAVRŠNI RAD

Voditelj: izv. prof. dr. sc. Zdenka Zovko Brodarac
Suvoditelj: doc. dr. sc. Anita Begić Hadžipašić
Stručni voditelj: Marijan Bošnjak, ing.el.

Članovi ispitnog povjerenstva:

Doc. dr. sc. Ljerka Slokar - predsjednik
Izv. prof. dr. sc. Zdenka Zovko Brodarac - član
Doc. dr. sc. Anita Begić Hadžipašić - član
Izv. prof. dr. sc. Stjepan Kožuh - član
Doc. dr. sc. Natalija Dolić - član
Doc. dr. sc. Martina Lovrenić - Jugović - zamjenski član

Sisak, rujan 2016.

Zahvala

Posebno se zahvaljujem voditeljici završnog rada izv. prof. dr. sc. Zdenki Zovko Brodarac na nesebičnom trudu, velikoj pomoći pri izradi rada i savjetima.

Velike zahvale ing. el. Marijanu Bošnjaku na upoznavanju s tehnologijom u firmi Metal product d.o.o. i dostavljanju materijala koji su uvelike olakšale izradu ovog rada.

Također zahvaljujem suvoditeljici doc.dr.sc. Aniti Begić Hadžipašić i tehničkoj suradnici Ljiljani Srečec radi obavljenih korozijskih ispitivanja te mr. sc. Katarini Terzić na pripremi uzoraka i obavljenih ispitivanja na svjetlosnom mikroskopu.

Najveću zahvalu dugujem svojoj majci, P. i prijateljima.

Sažetak

Za izradu elektrotehničkih proizvoda na raspolaganju su brojni materijali koji se razlikuju po sastavu i podrijetlu: osnovni kemijski elementi, kemijski spojevi, legure te umjetni spojevi i složeni materijali. U elektrotehničkim spojevima najčešće se upotrebljavaju meke bakrene i gnječive aluminijske legure visoke čistoće. Dobra svojstva aluminija i njegovih legura kao vodljivog materijala su: visoka električna i toplinska vodljivost, mala specifična masa, dobra tehnološka i mehanička svojstva, kemijska postojanost i otpornost na električni luk. Električna provodljivost ovisi o postotku primjesa i nečistoća te o stupnju plastične deformacije i rekristalizacije tijekom proizvodnje. Specifičnost spojeva visokovodljivih legura poput legura aluminija i bakra je potencijalna opasnost od nastajanja galvanskih članaka. Stoga spajanje aluminija i bakra uobičajenim metodama zavarivanja nije dopušteno jer se u prisustvu vlage stvara galvanski članak koji uzrokuje elektrokemijsku koroziju, pri kojoj aluminij kao anoda nestaje. U ovom je radu ispitana Cu/Al spojnica za primjenu u dalekovodima. Proizvod čini spoj legure mekog bakra Cu-ETP (CW004A) i gnječive aluminijske legure EN AW-1050A. Slijedom navedenog je za spajanje primijenjena metoda zavarivanja trenjem. Cilj ovog istraživanja bio je utvrditi mikrostrukturna svojstva materijala bakrene i aluminijske legure te njihova spoja i korelirati ih s utjecajem simuliranih tehnoklimatskih uvjeta u mediju umjetne kiše i 3,5% otopine NaCl.

Ključne riječi: bakar, aluminij, zavarivanje trenjem, mikrostruktura, korozijska otpornost

Abstract

Numerous materials which are available for manufacturing electro technical products differ in contexture and origin: basic chemical elements, chemical compounds, alloys, artificial compounds and complex materials. High purity soft copper and compressible aluminium are mostly used materials in electro technical compounds. Good properties of aluminium and its alloys as a conductible material are: high electrical and thermal conductivity, small specific mass, good technological and mechanical properties, chemical stability and resistance to arc discharge. Copper has the best electrical and thermal conductivity. Electrical conductivity depends on the percentage of admixtures and impurities as well as the rate of plastic deformation and recrystallization during the process of manufacturing. The feature of high conductive compound alloys like aluminium and copper is the possibility of galvanic cells formation. Therefore, the merging aluminium and copper by usual welding methods is not allowed due to electrochemical corrosion which causes the deterioration of aluminium as an anode in galvanic cell and humid conditions. The Cu/Al joint usage in power lines is tested in this paper. Product makes a compound of soft copper alloy Cu-ETP (CW004A) and compressible aluminium alloy EN AW-1050A. For merging of the aforementioned, friction welding (FRW) method was used. The aim of this research was to determine microstructural properties of copper and aluminium alloys and their joint, and to correlate them with the effect of simulated techno chemical conditions in the ambient of artificial rain and 3,5% NaCl solution.

***Keywords**: copper, aluminium, friction welding, microstructure, corrosion resistance*

SADRŽAJ:

1. UVOD 1
2. TEORIJSKI DIO 2
2. 1. BAKAR 2
2. 1. 1. Općenito o bakru 2
2. 1. 2. Svojstva bakra 2
2. 1. 3. Primjena bakra i njegovih legura 3
2. 2. ALUMINIJ 3
2. 2. 1. Općenito o aluminiju 3
2. 2. 2. Podjela aluminija i njegovih legura 4
2. 2. 3. Svojstva aluminija i njegovih legura 4
2. 2. 4. Primjena aluminija i njegovih legura 5
2. 2. 4. 1. Primjena u elektro sektoru 6
2. 3. ELEKTROTEHNIČKI MATERIJALI 7
2. 3. 1. Općenito o elektrotehničkim materijalima 7
2. 3. 2. Proizvodnja elektrotehničkih proizvoda 9
2. 3. 3. Sistematizacija elektrotehničkih materijala 10
2. 3. 3. 1. Tehnološka svojstva elektrotehničkih materijala 10
2. 3. 4. Vodljivi materijali 11
2. 3. 4. 1. Podjela prema namjeni i svojstvima 11
2. 3. 4. 2. Svojstva vodljivih materijala 11
2. 3. 5. Vodiči i oblici vodiča 11
2. 3. 5. 1. Vodiči 11
2. 3. 5. 2. Kriterij odabira materijala za vodiče 12
2. 4. ZAVARIVANJE TRENJEM 13
2. 4. 1. Općenito o zavarivanju trenjem 13
2. 4. 2. Osnovni koraci u zavarivanju trenjem 13
2. 4. 3. Vrste relativnih gibanja 14
2. 4. 4. Karakteristike procesa 15
2. 4. 4. 1. Faza trenja 15
2. 4. 4. 2. Faza sabijanja 16
2. 4. 5. Prednosti i nedostatci zavarivanja trenjem 16
2. 4. 5. 1. Prednosti zavarivanja trenjem 16
2. 4. 5. 2. Nedostatci zavarivanja trenjem 16
2. 4. 6. Varijable kod zavarivanja trenjem 16
2. 4. 7. Kvaliteta zavara 18

2. 4. 7. 1. Diskontinuiteti zavarenog spoja 18
2. 4. 7. 2. Kontroliranje procesa i primjena zavarivanja trenjem 19
3. EKSPERIMENTALNI DIO 20
3. 1. Kemijski sastav i mehanička svojstva 20
3. 2. Metalografska ispitivanja 20
3. 3. Elektrokemijska ispitivanja 22
4. REZULTATI I DISKUSIJA REZULTATA 23
5. ZAKLJUČCI 38
6. LITERATURA 39

1. UVOD

Za izradu elektrotehničkih proizvoda na raspolaganju su brojni materijali koji se razlikuju po sastavu i podrijetlu: osnovni kemijski elementi, kemijski spojevi, legure te umjetni spojevi i složeni materijali. Vodljivi materijali se mogu podijeliti prema više kriterija: veličini električne provodljivosti, sastavu (čiste metale i legure), položaju u periodnom sustavu elemenata (alkalni i zemnoalkalni), strukturi elektronskog omotača, boji (crni i obojani), temperaturi taljenja (teško i lako taljivi), primjeni (vodiči, električni kontakti, elektrode) [1]. Prema vrsti nositelja naboja vodljivi materijali se dijele na:

- vodiče prvog reda (metali i legure)
- vodiče drugog reda (elektroliti).

Kod vodiča prvog reda slobodni elektroni su nositelji naboja. Kod elektrolita ioni su nositelji naboja. Vodiči prvog reda se uglavnom koriste u polikristalnom stanju. Mehanička svojstva ovih materijala su bitno određena mehaničkom i toplinskom obradom. Vodiči prvog reda dijele se na metale velike električne provodljivosti, metale male električne provodljivosti, specijalne vodljive materijale i otporne legure [1].

Metali velike električne provodljivosti (bakar, aluminij) imaju najmanju električnu otpornost ($\rho \sim 10^{-8} \Omega m$) i zato se koriste za izradu vodiča.

U elektrotehničkim spojevima najčešće se upotrebljavaju meke bakrene i gnječive aluminijske legure visoke čistoće.

U ovom je radu ispitana Cu/Al spojnica za primjenu u dalekovodima. Proizvod čini spoj legure mekog bakra Cu-ETP (CW004A) i gnječive aluminijske legure EN AW-1050A. Specifičnost spojeva visokovodljivih legura je potencijalna opasnost od nastajanja galvanskih članaka. Slijedom navedenog je za spajanje primijenjena metoda zavarivanja trenjem (*engl. Friction welding, FRW*). Proces FRW je tehnika zavarivanja u čvrstom stanju u kojemu zavar nastaje pod utjecajem tlačne sile na kontaktu između radnih komada, koji se rotiraju ili gibaju relativno u odnosu jedan prema drugome i tako stvaraju potrebnu toplinu za nastajanje zavarenog spoja. Također, tlačnom silom i rotacijom, odnosno, relativnim gibanjem radnih komada miješa se materijal radnih komada na dodirnim površinama.

Cilj ovog istraživanja bio je utvrditi mikrostrukturna svojstva materijala bakrene i aluminijske legure te njihova spoja i korelirati ih s utjecajem simuliranih tehnoklimatskih uvjeta u mediju umjetne kiše i 3,5% otopine NaCl. Navedeni mediji odabrani su radi uvida u primjenjivost ispitanih materijala i njihova spoja u kontinentalnim i primorskim krajevima.

2. TEORIJSKI DIO

2. 1. BAKAR

2. 1. 1. Općenito o bakru

Bakar je kemijski element koji u periodnom sustavu elemenata nosi simbol Cu. Atomski (redni) broj bakra je 29. Atomska masa bakra iznosi 63 g mol^{-1} talište 1083°C, a gustoća 8,92 g cm^{-3}[2]. Na slici 1 prikazan je elementarni bakar.



Slika 1. Elementarni bakar [3]

2. 1. 2. Svojstva bakra

Elementarni bakar je metal kubične plošno centrirane kristalne rešetke. Boja mu je sjajno svijetlo crvena do crvenkastosmeđa, odnosno specifična „bakrena“ boja. Jedan je od najpoznatijih obojenih metala, a u čistom stanju relativno je mekan, no vrlo žilav i rastezljiv/savitljiv. Bakar je prijelazni metal i nije polimorfan. Kuje se, valja (na hladno i vruće) i izvlači u vrlo tanke žice jer je lako obradljiv i kovak. Može se meko i tvrdo lemiti i zavarivati, a nakon srebra je najbolji vodič topline i elektriciteta (električne energije). Najvažnija komercijalna upotreba bakra je pri električnim instalacijama i u elektronici, upravo zbog visoke električne vodljivosti i veće zastupljenosti u Zemljinoj kori od srebra. Bakar se ne otapa u razrijeđenim kiselinama i u kiselinama koje nemaju oksidacijsko djelovanje zbog pozitivnog redoks potencijala, već ga samo HNO_3 nagriza. Bakar reagira samo s kiselinama koje imaju oksidacijsko djelovanje, tj. s kiselinama koje uz vodik sadrže i element koji bakar može reducirati jer je redukcijski elektrodni potencijal bakra pozitivniji od vodika [4].
Iz prethodno navedenog može se zaključiti da je bakar najbolji vodič električne struje i topline, a sama električna provodljivost je u ovisnosti o količini nečistoća i primjesa te o stupnju plastične deformacije i rekristalizacije tijekom proizvodnje [5-6].
Kisik koji je vezan u okside Cu_2O ima dobar utjecaj na vodljivost bakra jer na sebe veže primjese, no u većim količinama je štetan. Najčešće primjenjivani bakar je elektrolitski bakar, a vodljivost od 58 Sm mm^{-2} je normom definirana kao 100%-tna vodljivost [5]. Primjese poput Cd, Zn i Ag imaju mali utjecaj, srednji utjecaj imaju Ni, Sn i Al, a Be, Cr, As, Si, P imaju najveći utjecaj na električnu otpornost bakra [5]. Karakteristična svojstva bakra prikazana su tablicom 1.

Tablica 1. Karakteristična svojstva bakra [5]

Svojstvo / Materijal	Cu
Specifična masa, kg dm^{-3}	8,9
Atomska težina	63,57
Redni broj	29
Električna provodljivost, Sm mm^{-2}	56-59
Temperaturni koeficijent istezanja, K^{-1}	$17x10^{-6}$
Talište, K	1356
Vrelište, K	2573
Toplinska vodljivost, W Km^{-1}	401
Latentna toplina taljenja, kWs kg^{-1}	211,5
Temperaturni koeficijent otpora, K^{-1}	$43x10^{-3}$

2. 1. 3. Primjena bakra i njegovih legura

Bakar ima vrlo široku primjenu zahvaljujući svojim svojstvima: prije svega otpornosti prema koroziji i dobrim mehaničkim svojstvima. U nizu tehničkih metala, bakar zauzima jedno od prvih mjesta po raznovrsnosti uporabe dok razvojem novih tehnologija potrebe za bakrom i danas rastu. Naročito u elektrotehnici (elektronici), bakar ima vrlo široku primjenu zahvaljujući izuzetnoj električnoj i toplinskoj vodljivosti. Više od 50% danas proizvedenog bakra iz tog se razloga upotrebljava u industriji kabela za električne vodiče te u gradnji generatora, motora i transformatora. Većina električnih vodova izrađuje se od bakra, izuzevši dalekovode gdje se koriste aluminij i čelik. Bakar je u tome slučaju preskup i ne odgovara namjeni jer kod njih struja teče samo površinom radi „skin-efekta“ do kojega dolazi pri djelovanju visokih napona [4]. Čisti bakar koristi se za izradu cijevi i kotlova u prehrambenoj i kemijskoj industriji (za vodu i plin) i kućanstvu te za izradu spremnika, grijača, uparivača, hladnjaka i drugih uređaja. Visoka toplinska provodljivost osigurava mu široku primjenu i u uporabi izmjenjivača topline [2]. U prošlom i pretprošlom stoljeću su se bakar i njegove legure rabili za izradu velikih pokrova u građevinarstvu. Prvenstveno kao krovni materijal za javne ustanove i zgrade, koji ujedno imaju veliku trajnost i specifičan lijep izgled zbog svojstava bakrene patine, tj. koristili su se u dekorativne svrhe. Bakar se u građevinarstvu (isto zbog dekorativne svrhe) koristio u izradi opšiva i žljebova. Takva uporaba je sada rijetkost zbog cijene, drugačijeg stila građenja, privlačenja munja, prelaska patine na fasadu i mnogih drugih nedostataka. Bakar u metalurgiji ima veliku primjenu kao legirajući metal zbog svojih izuzetnih mehaničkih svojstava te se još uvijek koristi za pravljenje novca. Proizvodi se u obliku praha, poluga, žice omotane PVC-om i folije [4].

2. 2. ALUMINIJ

2. 2. 1. Općenito o aluminiju

Aluminij u periodnom sustavu elemenata nosi simbol Al, atomski (redni) broj mu je 13, atomska masa mu iznosi 26 g mol^{-1} a elektronska konfiguracija 3s2 $3s^2$ $3p^1$. Aluminij je srebrnasto – bijel, paramagnetičan metal koji kristalizira u obliku plošno centrirane kubične strukture - FCC rešetke, duljine bridova $4{,}04 \cdot 10^{-10}$ m. Poznat je po svojoj visokoj refleksiji svjetlosti te izrazitoj električnoj i toplinskoj vodljivosti. Aluminij se u prirodi zbog velikog afiniteta prema kisiku nikad ne pojavljuje u elementarnom obliku, nego u obliku spojeva sa sumporom, silicijem i kisikom [7, 8].

2. 2. 2. Podjela aluminija i njegovih legura

Postoji mnogo klasifikacija aluminija koje se provode prema različitim kriterijima (najvažnija je njegova čistoća). Jedan primjer neslužbene klasifikacije aluminija je:

- < 99,5 % Al - slabo čist aluminij,
- 99,5 - 99,9 % Al - komercijalno čist aluminij (dobiva se taljevinskom elektrolizom),
- 99,9 - 99,95 % Al - jako čist aluminij,
- 99,99 % Al - „rafinal“,
- 99,95 - 99,999 % Al - aluminij visoke čistoće,
- > 99,999 % Al - aluminij ultra visoke čistoće.

S aspekta primjene u elektrotehnici i prema vrsti glavnih dodatnih elemenata razlikuju se [1]:

- legure s manganom (Al-Mn) (otporne na koroziju, loše čvrstoće),
- legure s magnezijem (Al-Mg),
- legure sa silicijem (Al-Si),
- legure s manganom i silicijem (Al-Mn-Si),
- legure s bakrom (Al-Cu) (dobra električna svojstva),
- legure s bakrom i magnezijem (Al-Cu-Mg),
- legure s bakrom i silicijem (Al-Cu-Si),
- legure s cinkom i magnezijem (Al-Zn-Mg).

Najveću važnost ima *aldrey* sa sadržajem 0,3 – 0,5 % Mg, 0,4 – 0,7 % Si i 0,2 – 0,3 % Fe (oznaka E-AlMgSi). U odnosu na čisti aluminij ima povećanu mehaničku čvrstoću (prekidna čvrstoća 350 N/mm^2 i istezanje od 6,5 %) čime se približava vrijednostima za tvrdo vučeni bakar.
Dobra mehanička svojstva ove legure postižu se posebnom termičkom obradom. Koristi se za gradnju distribucijskih vodova s velikim rasponom i za izradu jakostrujnih sabirnica. Vodljivost *aldreya* je oko 31 Sm/mm^2.
Silumin je legura sa silicijem (2-12,5 % Si) koja se koristi za izradu kaveza rotora asinkronih motora i kućišta manjih izmjeničnih motora. Za izradu složenih oblika koristi se tlačno lijevanje. *Duraluminij* legura (3,5-5 % Cu, 0,5-0,8 % Mg, 0,5-0,8 % Mn), primjena u strojarstvu.

Aluminij zadovoljava kompleksne ekološke i tehnološke zahtjeve pa ga se može opisati kao „zeleni metal“ uz 100%-tnu mogućnost recikliranja. Ponovno pretaljivanje zahtijeva samo oko 5 % energije potrebne za proizvodnju primarnog metala [6]. Stoga se može nazvati saveznikom u borbi protiv otpada, ekološke štete i potrošnje energije [9].

2. 2. 3. Svojstva aluminija i njegovih legura

Iza kisika i silicija, aluminij je treći element u Zemljinoj kori (8,1 mas.%) te pripada grupi 3 (prije IIIB) periodnog sustava elemenata. Usprkos tome, nije bio izoliran u elementarnom stanju sve do 1825. godine (H. C. Ørsted). Talište aluminija iznosi 660 °C, a vrelište 2519 °C. Aluminij je jako reaktivan zbog visokog afiniteta prema kisiku te se na zraku brzo prevlači slojem oksida. Aluminij i njegov oksid su amfoterni [10].

Zbog svoje male gustoće i slijedom toga mase, zatim izdržljivosti i duktilnosti aluminij je izuzetno svestran i vrijedan materijal. Aluminij je vrlo lagan metal s gustoćom od 2,7 g cm^{-3}, što je otprilike trećina u gustoće čelika (7,85 g cm^{-3}). Primjena aluminija kao strukturnih i sigurnosno opterećenih dijelova u vozilima smanjuje im masu i potrošnju goriva.

Osim otpornosti na koroziju i visoke čvrstoće koju postiže legiranjem i naknadnom toplinskom obradom, također je dobar vodič topline i elektriciteta.

Aluminij ima prirodnu sposobnost da se odupre utjecajima degradacije bolje od mnogih materijala te se trajnost aluminijskih aplikacija jasno vidi na građevinskim objektima. Izvanredan dekorativan izgled površine aluminija postiže se posebnim postupcima (anodizacijom, lakiranjem i sl.) dok se aluminij prirodno zaštićuje slojem oksida, čime postiže samozaštitu u atmosferi.

Aluminij je zbog male mase te svojstva reflektiranja vidljivog svjetla i topline idealan materijal za izradu rasvjetnih sredstava. Čisti aluminij reflektira 90% svjetlosti ultraljubičastog i infracrvenog zračenja. Bez posebne pripreme površine, Al - lim trgovačke kvalitete reflektira 75 - 80 % sunčevih zraka i otpusti oko 10 % primljene topline.

Dobra svojstva aluminija kao vodljivog materijala su visoka električna provodljivost, visoka toplinska provodljivost, mala specifična masa, dobra tehnološka i mehanička svojstva, dobra kemijska postojanost te otpornost na električni luk [1].

Upotreba aluminija i njegovih legura i dalje raste, a fizikalna, kemijska i mehanička svojstva aluminija dostižu vrijednosti poput čelika, mesinga, bakra, cinka, olova ili titana. Aluminij se može oblikovati lijevanjem, plastičnom deformacijom i lako je strojno obradljiv [6].

Sama vodljivost elektriciteta ovisi o njegovoj čistoći, a standardizirani aluminij u elektrotehnici je čistoće 99,5% dok ostatak ispunjavaju primjese koje mogu imati mali (Ni, Si, Fe i Zn), srednji (Cu, Ag i Mg) i veliki (Ti, V, Mn i Cr) utjecaj na električnu vodljivost, zato se ograničavaju na ukupni sadržaj od 0,03% [11, 12]. Karakteristična svojstva aluminija prikazana su tablicom 2.

Tablica 2. Karakteristična svojstva aluminija [5]

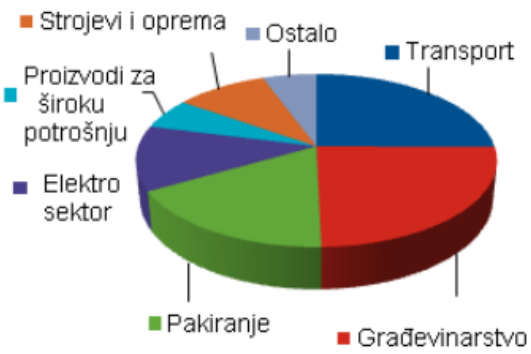
Svojstvo / Materijal	Al
Specifična masa, kg dm^{-3}	2,7
Atomska težina	26,98
Redni broj	13
Električna provodljivost, Sm mm^{-2}	34,8-38
Temperaturni koeficijent istezanja, K^{-1}	$24x10^{-6}$
Talište, K	930
Vrelište, K	2543
Toplinska vodljivost, W Km^{-1}	209,3
Latentna toplina taljenja, kWs kg^{-1}	396
Temperaturni koeficijent otpora, K^{-1}	$4,2x10^{-3}$

2. 2. 4. Primjena aluminija i njegovih legura

Primjeri primjene aluminija i aluminijskih legura dostupni su sve širem broju korisnika proizvoda od tradicionalnih materijala, koji se, uvidjevši prednosti korištenja aluminijskih

legura, unatoč povećanim troškovima, sve češće odlučuju za korištenje aluminijskih izvedbi istog proizvoda. Razvoj novih tehnologija iz drugih grana industrije, uz manje modifikacije i prilagodbe, omogućuje raznovrsniju proizvodnju predmeta od aluminija i aluminijskih legura. Predmeti od aluminija i aluminijskih legura, na taj se način još više komercijaliziraju i približavaju čovjeku u njegovom svakodnevnom životu [13].

Najveća čistoća aluminija koja se postiže u praksi je 99,99 % (rafinal) koja se koristi za obloge kondenzatora [9]. Aluminij je otporan prema koroziji jer se prekriva tankom opnom oksida na početku oksidacije (Al_2O_3). Ovaj sloj predstavlja zaštitni sloj koji može stvarati poteškoće pri spajanju vodova u elektrotehnici. Otporan je na kiseline, ali ne i na morsku vodu. Elektrotehnički poluproizvodi od aluminija su žice, profili, cijevi, trake, limovi i folija. Ovi poluproizvodi se proizvode valjanjem ili prešanjem, odnosno dubokim izvlačenjem. Primjena aluminija u elektrotehnici je velika. Aluminij i njegove legure primjenjuju se na onim mjestima gdje je kritični zahtjev na masu vodiča (npr. instalacije u zrakoplovima). Aluminij zauzima prvo mjesto u primjeni za zračne vodove. Potrošnja aluminija prikazana je slikom 2.



tržišni sektor	[%]
građevinarstvo	25
transport	25
pakiranje (ambalaža)	17
elektro sektor	12
strojevi i oprema	10
proizvodi za široku potrošnju	6
ostalo	6

Slika 2. Potrošnja aluminija po sektorima u 2011. godini [14]

2. 2. 4. 1. Primjena u elektro sektoru

U elektro primjeni glavni su proizvodi aluminijske žice i kablovi. U podzemnim električnim kablovima sadržane su velike količine aluminija. Aluminijske žice se također koriste u rezidentnim, komercijalnim i industrijskim građevinama te u automobilskoj industriji [1, 6]. Primjena aluminija u elektrotehnici je velika. Aluminij zauzima više prostora od bakra za istu vrijednost vodljivosti stoga se ne koristi za namotaje električnih strojeva. Međutim, primjenjuje se tamo gdje je kritična težina vodiča (npr. instalacije u zrakoplovima). Primjenu bakra, također, pomalo ograničava prognoza da će svjetske zalihe postojećih bakrenih ruda uz današnji tempo iskorištenja trajati još samo 20 - 25 godina, dok su zalihe aluminijskih ruda, računajući i glinu, u usporedbi s bakrenim vrlo velike. Aluminij zauzima prvo mjesto u primjeni za zračne vodove. U tu se svrhu koristi aluminijska užad od tvrdo vučene aluminijske žice (E-Al F17). Zbog nedovoljne vlačne čvrstoće aluminija izrađuju se vodovi u obliku užadi od aluminijskih i pocinčanih čeličnih žica (tzv. alu-če vodiči) [1].

2. 3. ELEKTROTEHNIČKI MATERIJALI

2. 3. 1. Općenito o elektrotehničkim materijalima

Svi oni materijali koji se koriste u električnim proizvodima su elektrotehnički materijali. Oni svojim svojstvima omogućuju optimalno djelovanje na elektromagnetske i električne procese i pojave. Nadalje, elektrotehnički proizvodi svoj rad baziraju na iskorištavanju električnih i elektromagnetskih pojava (pretvaranje električne energije u toplinsku, mehaničke u električnu i obrnuto, prijenos signala i sl.) [15].

Pri izradi elektrotehničkih proizvoda se koriste različiti materijali koji su različiti po građi i svojstvima. S polazišta elektrotehnike u elektrotehničkom proizvodu razlikuju se tri osnovna dijela: električki, koji provodi struju (na različite načine, raznih veličina i frekvencija), magnetski, koji provodi magnetski tok te izolacijski. Osnovni kriteriji kod izbora materijala za izradu u elektrotehnički proizvod su:

- funkcionalni (električki, magnetski, izolacijski) zahtjevi,
- mogućnosti obrade materijala,
- kako se materijal ponaša u zadanim tehnoklimatskim uvjetima.

Kod same izrade elektrotehničkih proizvoda na raspolaganju su mnogobrojni materijali koji su različiti po svom sastavu i podrijetlu: osnovni kemijski elementi, kemijski spojevi, legure te umjetni spojevi i složeni materijali. Vodljivi materijali dijele se prema više kriterija: veličini električne provodljivosti, sastavu (čiste metale i legure), položaju u periodnom sustavu elemenata (alkalni i zemnoalkalni), strukturi elektronskog omotača, boji (crni i obojani), temperaturi taljenja (teško i lako taljivi), primjeni (vodiči, električni kontakti, elektrode). Prema vrsti nositelja naboja vodljivi materijali se dijele na:

- vodiče prvog reda (metali i legure) i
- vodiče drugog reda (elektroliti).

Kod vodiča prvog reda nosioci naboja su slobodni elektroni. Kod elektrolita ioni su nosioci naboja. Vodiči prvog reda se uglavnom koriste u polikristalnom stanju. Mehanička svojstva ovih materijala definirana su prethodnom mehaničkom i toplinskom obradom. Vodiči prvog reda mogu se podijeliti na metale velike električne provodljivosti, metale male električne provodljivosti, specijalne vodljive materijale i otporne legure.

Metali velike električne provodnosti (bakar, aluminij, srebro i zlato) posjeduju najmanju električnu otpornost ($\rho \sim 10^{-8}$ Ωm) te se zato koriste pri izradi vodiča.

U elektrotehničkim spojevima najčešće se upotrebljavaju spojevi meke bakrene i gnječive aluminijske legure visoke čistoće (slika 3) [15].



Slika 3. Spoj meke bakrene i gnječive aluminijske legure [16]

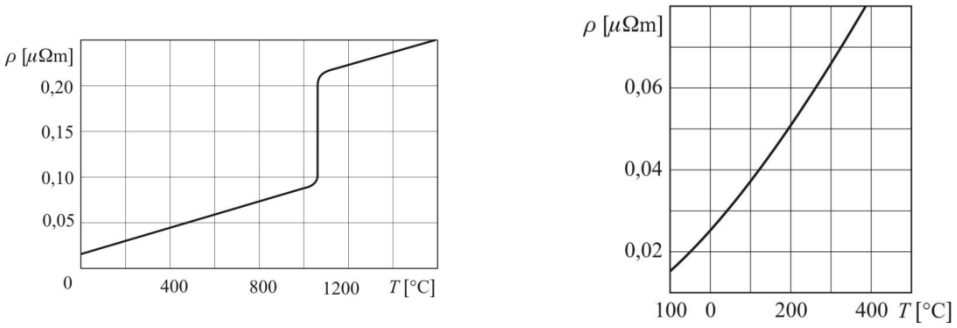
Usporedba Al – Cu [1]:

- Aluminij je 3,5 puta lakši od bakra.
- Vodljivost aluminija je 1,6 puta manja od vodljivosti bakra (aluminijski vod iste dužine i ukupnog otpora ima 1,6 puta veći presjek nego bakar).
- Aluminij je znatno manje čvrstoće od bakra. Za razliku od bakra, električna provodljivost aluminija manje ovisi o stupnju tvrdoće.
- Iako je temperatura taljenja aluminija niža od temperature taljenja bakra, kod aluminija je potrebno više energije jer ima veću specifičnu toplinu i toplinu taljenja.
- Linearni koeficijent istezanja je veći nego kod bakra.
- Aluminij je približno dva puta jeftiniji od bakra.

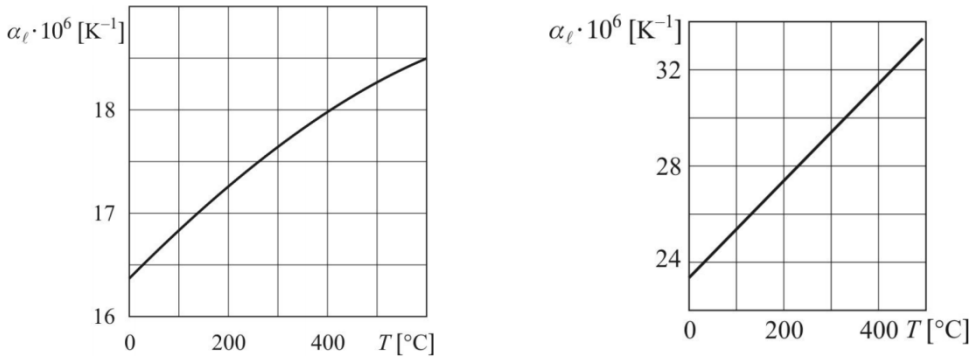
Usporedni prikaz ovisnosti električne otpornosti i koeficijenta linearnog širenja bakra i aluminija od temperature prikazan je na slici 4 [17].

Materijal Cu Al

a)



b)



Slika 4. Utjecaj temperature na svojstva bakra i aluminija [17]:
a) električna otpornost
b) koeficijent linearnog širenja

2. 3. 2. Proizvodnja elektrotehničkih proizvoda

Za izradu nekog proizvoda neophodni su određeni materijali odnosno sirovina. Pri tome je pojam proizvoda odnosno sirovine relativan, a ovisi o dijelovima odnosno načinu proizvodnje. Na primjer proizvodni niz za bakar:

bakrena ruda→ bakar → žica → izolirana žica → namot → električni stroj.

Električni proizvodi su često iznimno složeni i izrađeni od mnogo različitih materijala, kako po samoj građi tako i po samim svojim svojstvima. Promatrano sa stanovišta elektrotehnike u elektrotehničkom proizvodu razlikuju se dva osnovna dijela:

- električki, koji provodi struju (na različite načine, raznih veličina i frekvencija) i
- magnetski, koji provodi magnetski tok te mora biti dobar magnetski vodič [15].

Osim tih dijelova postoje i konstrukcijski dijelovi koji imaju zadatak da aktivne dijelove povežu u kompaktnu cjelinu, a pri tome i izvršavaju neku ulogu (osovina, hlađenje, zaštita) vrlo bitnu za rad proizvoda. Elektrotehnički proizvod ne mora imati nužno i električki i magnetski krug, može imati samo električki (magnetski krug ne može postojati bez električkog). Električki i magnetski krug se mora izrađivati od materijala koji optimalno zadovoljavaju sve moguće kriterije, pri čemu je osnovni kriterij za pojedine proizvode različit.

S praktičkog stanovišta postoje sljedeće grupe kriterija:

1. Konstrukcijski kriteriji, za određeni proizvod to su:

   - svrsishodnost,
   - električki i magnetski zahtjevi,
   - mogućnost prerade.

2. Kriteriji koji se manifestiraju iz vanjskih utjecaja ili utjecaja okoline. To su tehnoklimatski kriteriji. Tehnoklima je klima koja djeluje na tehničke proizvode.

Materijal se mora birati u skladu s navedenim uvjetima, ali mogu se raditi i kompromisi, što je u praksi i češće rješenje radi ekonomičnosti i praktičnosti. Ako materijal zadovoljava sve

ostale kriterije, a ne zadovoljava tehnoklimatski, onda se nužno mora zaštititi od utjecaja klime (slika 5). Na primjer, kućištem uređaja [15].



Slika 5. Prikaz zaštite elektrotehničkog proizvoda [18]

2. 3. 3. Sistematizacija elektrotehničkih materijala

Elektrotehnički materijali se mogu podijeliti u tri osnovne skupine [19]:

- materijali za vodiče, vodičke i poluvodičke elemente,
- materijali za izradu magnetskih krugova,
- materijali za električku izolaciju.

2. 3. 3. 1. Tehnološka svojstva elektrotehničkih materijala

Tehnološka svojstva materijala govore o obradljivosti materijala, a najvažnija svojstva su [20]:

- ***Sposobnost deformiranja u hladnom i toplom stanju*** (bez skidanja strugotine) je sposobnost materijala da se može valjati, kovati, izvlačiti, savijati, duboko izvlačiti, previjati itd. U ugrijanom stanju je potrebna manja energija za obradu. Kovanjem se mijenjaju električna i mehanička svojstva materijala. Kod metala se smanjuje električna provodljivost, a povećava čvrstoća i tvrdoća. Obično se provodi strojno kovanje.

- ***Sposobnost struganja*** je mjerilo za obradljivost materijala ručnim alatom i strojevima koji rade na principu skidanja strugotine s površine materijala koji se ispituje.

- ***Zavarljivost i lemljivost*** je sposobnost spajanja materijala zavarivanjem i lemljenjem. Zavarivanjem se spajaju metalne konstrukcije. Lemljivost je sposobnost spajanja dva materijala taljenjem trećeg materijala.

- ***Sposobnost lijevanja*** je sposobnost ispunjavanja kalupa složenih oblika rastaljenim materijalom. Kao mjera ove sposobnosti služi, među ostalim, skupljanje kod otvrdnjavanja. Lijevanjem se obrađuju metali, staklo, guma, plastika itd.

- ***Rezljivost*** je sposobnost materijala da se može obrađivati rezanjem. Primjenjuje se kod obrade metala, plastika, drva, itd.

2. 3. 4. Vodljivi materijali

2. 3. 4. 1. Podjela prema namjeni i svojstvima

Vodič je elementarni dio strujnog kruga, on povezuje sve ostale elemente u tom krugu i zadatak mu je da što bolje vodi struju. Može ih se vidjeti svuda gdje se prenosi električna energija kao i u svakom električkom proizvodu. Najveća prisutna raznolikost elemenata za prijenos energije je [19]:

- po vrsti struje (istosmjerna, izmjenična niskih i visokih frekvencija),
- po jakosti struje (od vrlo malih do vrlo velikih),
- po visini napona (od vrlo malih napona do vrlo velikih napona),
- po smještaju (unutar ili van električnog proizvoda),
- po ambijentu (različiti klimatski uvjeti),
- po dinamici rada (stalni ili povremeni rad).

2. 3. 4. 2. Svojstva vodljivih materijala

Osnovna svojstva koja karakteriziraju vodiče prvog reda za primjenu vođenja električne struje su [15]:

- specifična električna vodljivost (otpornost),
- temperaturni koeficijent električne otpornosti,
- toplinska provodnost,
- mehanička i tehnološka svojstva (obradivost).

Specifična električna vodljivost metalnih materijala ovisi o sljedećim parametrima [15]:

- vrsti metala (svaki metal ima svoju vodljivost),
- čistoći (vrsti i količini primjesa),
- stanju strukture (monokristal kao kristal s najmanje deformacija ima najveću vodljivost, a metal sitnozrnate strukture ima najmanju vodljivost),
- temperaturi (porastom temperature vodljivost pada).

2. 3. 5. Vodiči i oblici vodiča

2. 3. 5. 1. Vodiči

Vodljivim materijalima nazivamo tvari s labavo vezanim elektronima u vanjskim (obično nepotpunim) elektronskim ljuskama (putanjama). To su tzv. slobodni elektroni koji se mogu slobodno kretati kroz kristalnu rešetku. Električni vodiči dobro vode električnu struju jer u njima postoje slobodni nositelji električnog naboja [19]. Vodič je dakle, dio strujnog kruga

koji povezuje sve ostale komponente u tom krugu sa zadaćom da što efikasnije i bolje vodi struju (vodiči za vodove, namote električnih strojeva i transformatora, spojne vodove, kabele te instalacijski vodiči). O vodičkoj komponenti u širem smislu govori se ako ima i neku drugu funkciju ili ako se prilikom vođenja struje javljaju još neki specifični iskoristivi efekti (kontakti, otpornici, poluvodičke aktivne komponente, itd.). Vodiči se razlikuju po presjeku, obliku, načinu izoliranja, namjeni, i sl. [20].

2. 3. 5. 2. Kriterij odabira materijala za vodiče

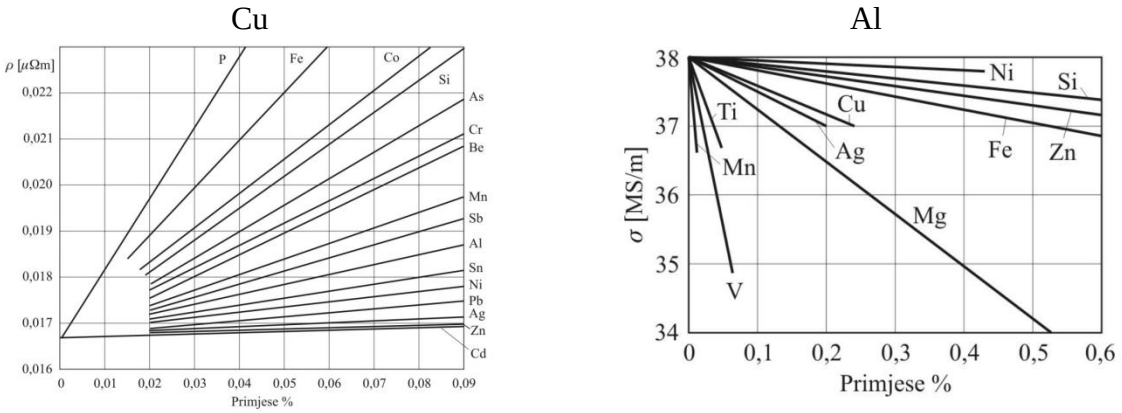
Osnovna svojstva materijala za izradu dobrog vodiča su:

- dobro vođenje struje,
- odolijevanje unutarnjim i vanjskim naprezanjima,
- dobra tehnološka svojstva (sposobnost oblikovanja, podatnost u primjeni, dobro spajanje u električnom smislu).

Materijali za vodiče biraju se obzirom na nekoliko kriterija. Najvažniji su:

- vrsta struje (istosmjerna, izmjenična niskih ili visokih frekvencija),
- jakost struje,
- visina napona,
- mjesto ugradnje (unutar ili izvan električnog proizvoda),
- klimatski uvjeti,
- dinamika rada (stalni ili povremeni rad),
- ekonomičnost.

Mogućnosti obrade, ponašanje materijala u zadanim tehnoklimatskim uvjetima te funkcionalni (električki, magnetski, izolacijski) zahtjevi osnovni su kriteriji pri izboru materijala za ugradnju u elektrotehnički proizvod. Utjecaj na svojstva materijala u zadanim uvjetima ima čistoća materijala, tj. kemijski sastav. Usporedan utjecaj primjesa na električna svojstva bakra i aluminija prikazan je na slici 6.



Slika 6. Utjecaj primjesa na:
a) električnu otpornost bakra [17]
b) električnu vodljivost aluminija [11]

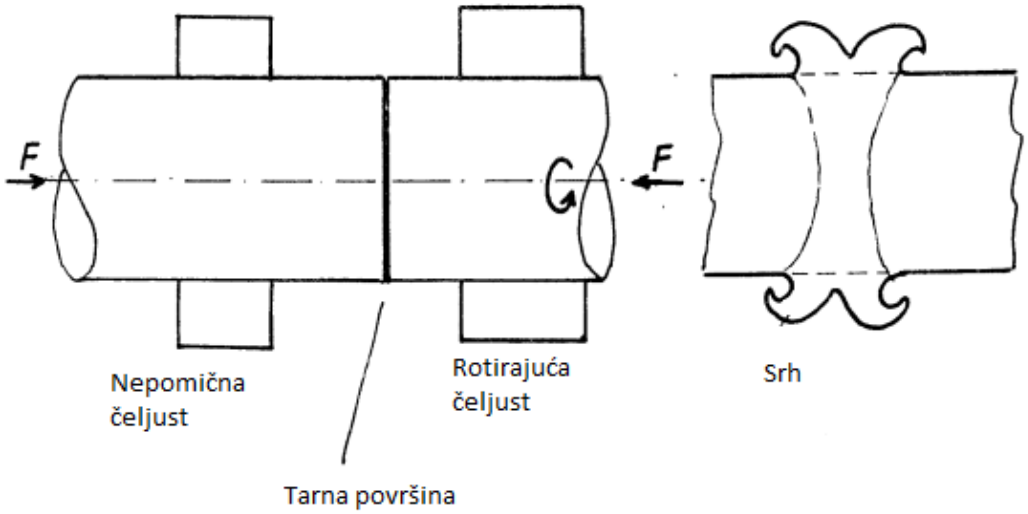
Aluminij kao anoda nestaje u prisustvu vlage, kada se stvara galvanski članak te uzrokuje elektrokemijsku koroziju. Iz tog razloga spajanje aluminija i bakra uobičajenim metodama zavarivanja nije dopušteno.

2. 4. ZAVARIVANJE TRENJEM

2. 4. 1. Općenito o zavarivanju trenjem

Ovaj način zavarivanja je vrsta varenja pritiskom, u kojem se dijelovi među dodirnim površinama zagrijavaju toplinom trenja koja nastaje rotacijom jednog ili oba dijela koji se zavaruju, nakon čega slijedi varenje većim pritiskom na dijelove, a da pritom rotacija prestaje. Zavari su rotacijski simetrični, a kod ovakvog tipa spajanja postoji više načina zavarivanja. Prvenstveno se zavaruju metali i njihove legure, ali također se mogu zavarivati i tvrdi polimeri. Ovaj tip varenja je pogodan u mnogim industrijskim granama kao što su automobilska u kojoj se vare ventili, čepovi, svrdla, vratila, itd. Jedna od najistaknutijih prednosti ovog postupka je ta da je zona utjecaja topline vrlo uska [20].

Kod ovog postupka korišteni strojevi su veoma slični tokarskim strojevima s posebnim napravama za stezanje i pritiskanje komada koji se vare, a nakon zavarivanja ostane karakterističan srh (kojeg se može mehanički ukloniti) [21]. Zavarivanje trenjem prikazano je slikom 7.

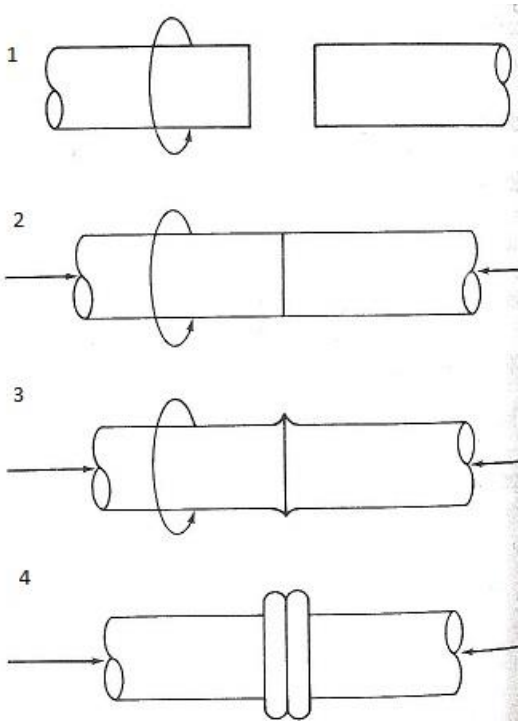


Slika 7. Prikaz zavarivanja trenjem [22]

2. 4. 2. Osnovni koraci u zavarivanju trenjem

Zavarivanje trenjem se odvija kroz 4 koraka (slika 8):

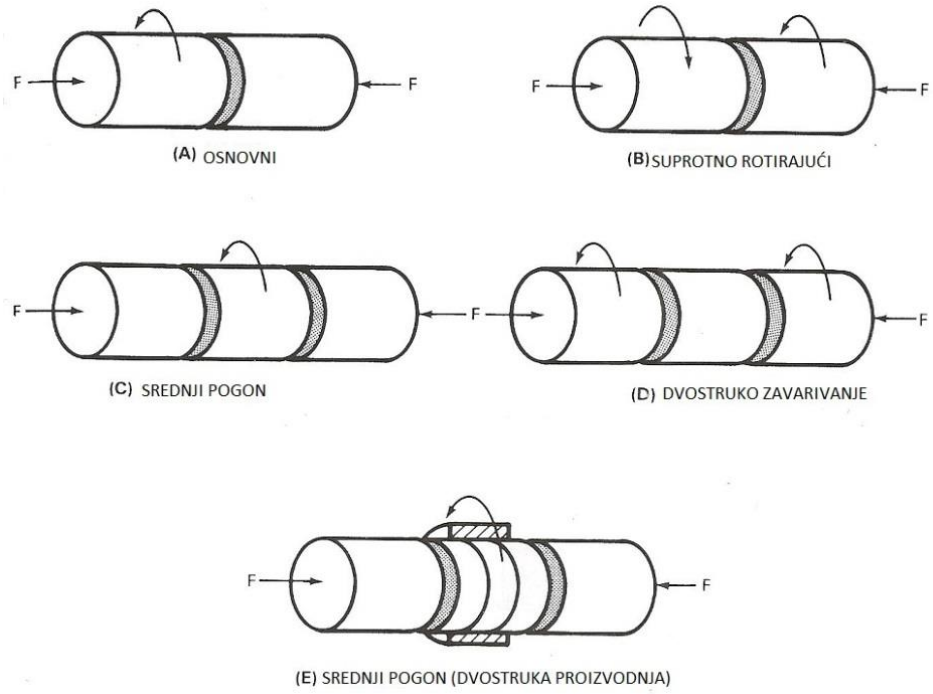
- 1. korak : Radni komad se rotira, a drugi miruje.
- 2. korak : Kada se dostigne prikladna rotacijska brzina, komadi se dovode u dodir i pritišću s aksijalnom silom.
- 3. korak : Trenjem između komada lokalno dolazi do zagrijavanja i počinje miješanje materijala.
- 4. korak : Rotacija prestaje i miješanje materijala je završeno [23].



Slika 8. Osnovni koraci pri zavarivanju trenjem [20]

2. 4. 3. Vrste relativnih gibanja

U većini slučajeva kod zavarivanja trenjem jedan od radnih komada se rotira oko osi simetrije preko puta koje je okomita tarna površina, što znači da presjek jednog od radnih komada mora biti okruglog poprečnog presjeka. Na slici 9 prikazani su tipični načini za jednostruko ili višestruko zavarivanje [20].



Slika 9. Načini jednostrukog i višestrukog zavarivanja [20]

A. Standardan i najčešće se koristi. Jedan komad se rotira, a drugi ne.
B. Oba komada se rotiraju, ali u suprotnim smjerovima. Prikladan za zavarivanje gdje su zahtjevi za velikom brzinom rotacije.
C. Dva komada koja se ne rotiraju pritišću se u suprotnim smjerovima, a među njima je rotirajući komad.
D. Vrlo sličan predhodnom načinu (C), samo u ovom slučaju dva komada rotiraju, a jedan ostaje stacionaran.
E. Prikaz istodobne proizvodnje 2 zavara [23].

2. 4. 4. Karakteristike procesa

Iako nisu još svi detalji naljepljivanja razjašnjeni, proces zavarivanja se dijeli na dvije faze: fazu trenja i fazu sabijanja [20].

2. 4. 4. 1. Faza trenja

Pri sagledavanju postupka spajanja smatrat će se da su oba komada istih dimenzija. Samo spajanje se odvija u nekoliko koraka. Kada komadi dođu u kontakt, u tom trenutku započinje trljanje dodirnih površina i među njima se pojavljuje snažno adhezijsko djelovanje, dok na površine djeluje jak pritisak. Na nekim mjestima adhezijske sile su jače od metalnih veza, pa na taj način dolazi do miješanja materijala između dvije dodirne površine. Obzirom da se trljanje i dalje odvija, temperatura i potrebni okretni moment i dalje rastu. Količina materijala koja prelazi s površine na površinu raste te se stvara sloj plastično deformiranog materijala. Tijekom ovog perioda okretni moment dostiže vrhunac i opada na minimalnu vrijednost. Materijal se tlači i dolazi do aksijalnog skraćivanja [23].

2. 4. 4. 2. Faza sabijanja

Pri procesu zagrijavanja dolazi do sile sabijanja, time se komad skraćuje, a to rezultira pojavom srha po obodu zavarenog spoja. Kako je brzina manja okretni moment dostiže svoj drugi vrhunac kada se površine slijepe, a nakon toga se zavar hladi. Mehanizam spajanja raznorodnih materijala je mnogo kompleksniji nego kod istovrsnih materijala. Iznimno veliki broj faktora ima ulogu u procesu spajanja (fizikalna i mehanička svojstva, površinska energija, itd.). Među površinama 2 materijala stvara se legura, a njena svojstva mogu imati značajan utjecaj na sveukupna svojstva spoja [23].

2. 4. 5. Prednosti i nedostatci zavarivanja trenjem

Zavarivanje trenjem, kao i ostali postupci zavarivanja ima svoje prednosti i nedostatke [24].

2. 4. 5. 1. Prednosti zavarivanja trenjem

- Nije potreban dodatni materijal,
- Prašak, odnosno talilo i zaštitni plin nisu potrebni,
- Proces ne zagađuje okoliš, nema električnog luka, iskri, dima ili para,
- Čistoća površine nije toliko bitna u usporedbi s drugim procesima zavarivanja,
- Uska zona utjecaja topline,
- Zavarivanje trenjem je prikladno za zavarivanje većine konstrukcijskih materijala i pogodno je za spajanje raznorodnih materijala,
- U većini slučajeva, čvrstoća zavara je veća od čvrstoće manje čvrstog materijala u spoju,
- Operateri ne moraju biti obučeni za ručno zavarivanje,
- Postupak se lako automatizira za serijsku proizvodnju,
- U usporedbi s ostalim postupcima zavarivanja, zavarivanje trenjem je izuzetno brzo,
- Potrebna oprema tvornice (prostor, električna struja, itd.) je minimalna.

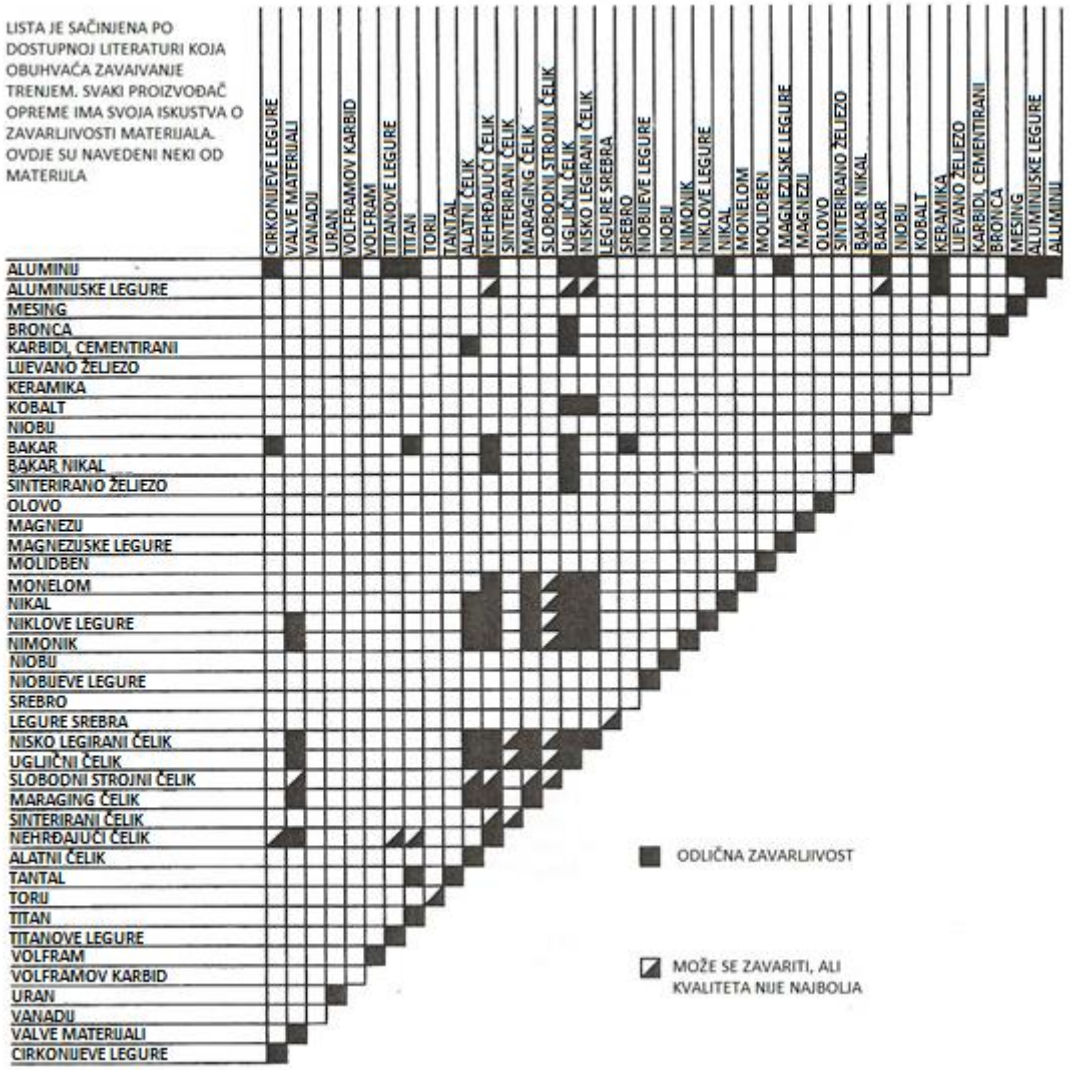
2. 4. 5. 2. Nedostatci zavarivanja trenjem

- Jedan od radnih komada mora biti osno simetričan i mora biti sposoban se rotacijski gibati oko te osi simetrije,
- Priprema i poravnavanje tarne površine imaju značajan utjecaj kod obradaka s promjerom većim od 50 mm,
- Osnovna oprema i alati su skupi,
- Ako su oba obratka duža od jednog metra potrebna je posebna oprema,
- Strojno neobrađene površine je teško zavarivati.

2. 4. 6. Varijable kod zavarivanja trenjem

Za spajanje velike količine materijala može se koristiti zavarivanje trenjem, uključujući kompozite s metalnom matricom, metale, keramiku i plastiku. Neke kombinacije materijala koji se mogu zavarivati prikazane su u slijedećoj tablici.

Tablica 3. Kombinacije materijala i njihova zavarljivost postupkom zavarivanja trenjem [20]



Tablica treba služiti samo kao smjernica za zavarivanje jer zavarljivost ovisi o velikome broju faktora. Stoga, ovim postupkom može biti zavarljiv gotovo svaki metal koji može biti toplo kovan. Kako bi se uklonila zaostala naprezanja ili mogućnost otvrdnjavanja na površini zavara, neki materijali mogu zahtjevati toplinsku obradu nakon zavarivanja.

Mnogo je mogućih kombinacija metala za zavarivanje čija je zavarljivost granična, tj. koji su teško zavarljivi. To može uključivati kombinacije koje imaju velike razlike u temperaturama zakivanja, visoku i nisku toplinsku vodljivost ili sklonosti stvaranja intermetalnih spojeva. Kao primjer možemo navesti kombinaciju aluminijskih legura ili bakrenih legura s čelikom ili kombinacija titana s nehrđajućim čelikom [22].

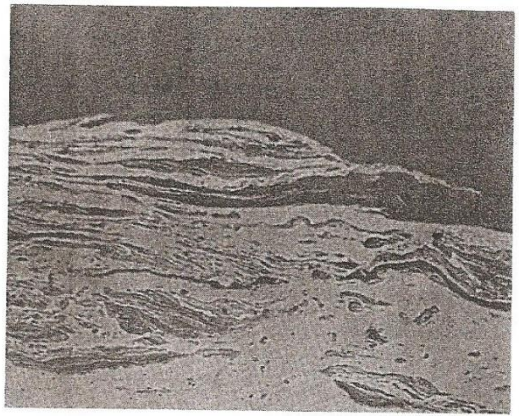
Dosegnuta temperatura većinom je ispod temperature tališta, dok je vrijeme koje materijal provodi na visokim temperaturama kratko. Promjene u svojstvima u području zavara kod nezakaljivih metala (meki čelik) su zanemarive. S druge strane, kod zakaljivih čelika može doći do strukturnih promjena u zoni utjecaja topline. Kako bi se kod takvih čelika postiglo sporije ohlađivanje te da ne bi došlo do zakaljenja, oni se trebaju zavarivati s relativno dugim vremenom zagrijavanja [22].

Značajno pod utjecajem parametara zavarivanja je i struktura sučeljene površine raznorodnih materijala. Time rečeno, što je vrijeme zavarivanja duže, difuzija materijala na dodirnoj površini bit će veća. Na slici 10, u primjeru spoja aluminija i čelika, vidi se minimalan utjecaj difuzije povodom prikladnih uvjeta zavarivanja [20].



Slika 10. Područje zavara trenjem između aluminija (gore) i ugljičnog čelika (dolje) [20]

U nekim slučajevima može doći do mehaničkog miješanja materijala na dodirnoj površini, kako je prikazano na slici 11.



Slika 11. Područje zavara između titana (gore) i nehrđajućeg čelika (dolje) [20]

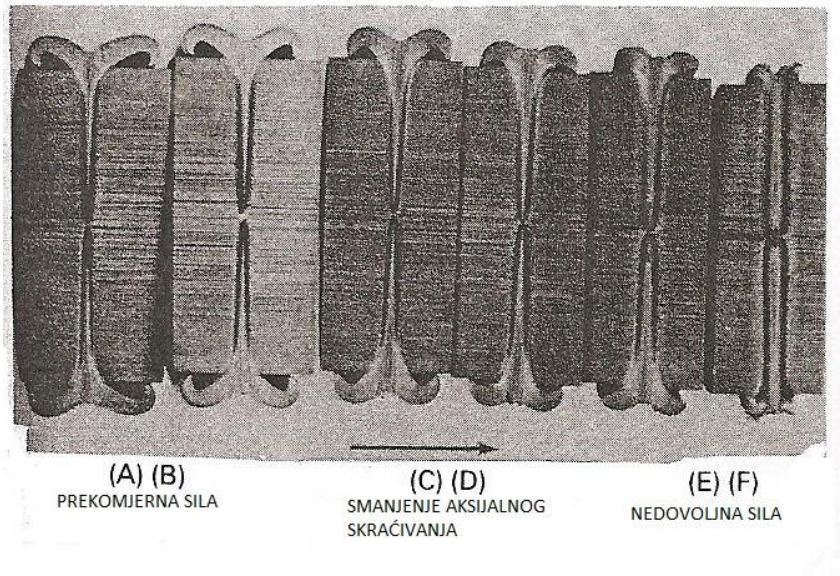
2. 4. 7. Kvaliteta zavara

Kvaliteta zavara ovisi o varijablama zavarivanja te o prikladnom izboru materijala (vrsta i kvaliteta). Dobar zavar može biti proizveden u širokom rasponu brzina, pritiska i vremena, no kod raznorodnih se materijala mora biti pažljiv pri odabiru parametara jer su oni puno kompleksniji [20].

2. 4. 7. 1. Diskontinuiteti zavarenog spoja

Kod zavarivanja trenjem nisu prisutni diskontinuiteti poput poroznosti i raznih uključaka, dok se ostali tipovi diskontinuiranosti mogu pojaviti. Oni su povezani s neprikladnim uvjetima zavarivanja, pripreme površine te neprikladnim materijalom i kombinacijom materijala [20].

Diskontinuiranosti u središtu zavara mogu biti uzrokovani s više čimbenika, kao što je nedovoljna sila zavarivanja, ali i nedovoljno zagrijavanje materijala u sredini. Na slici 12 su prikazani neki slučajevi diskontinuiranosti [20].



Slika 12. Greške nastale aksijalnim skraćivanjem [20]

2. 4. 7. 2. Kontroliranje procesa i primjena zavarivanja trenjem

Zavarivanje se kontrolira pomoću mikroprocesora. Strojevi koji kontroliraju mikroprocese su sposobni maksimalizirati kvalitetu procesa. Posebice su korisni pri prikupljanju podataka o svakom zavaru te za statističku obradu tih podataka. Podaci se prikupljaju o sili trenja i zakivanja, brzini, sabijanju i vremenu [20].

Zavarivanje trenjem upotrebljava se u svemirskoj industriji, poljoprivrednoj, automobilskoj, vojnoj, brodogradnji i industriji nafte. U autoindustriji ovaj postupak se koristi za zavarivanje zupčanika, ventila motora, osovina, pogonskih sklopova, sklopova za upravljanje i amortizera. Trenjem zavareni spojevi bakra i aluminija vrlo su česti u električnoj industriji. Zavarivanje trenjem koristi se kao zamjena za lijevanje i kovanje.

3. EKSPERIMENTALNI DIO

U ovom radu je ispitana Cu/Al spojnica koja se koristi u dalekovodima. Spojnica je sačinjena od legure mekog bakra Cu-ETP (CW004A) i gnječive aluminijske legure EN AW-1050A. Pri spajanju spojnice primijenjena je metoda zavarivanja trenjem (*engl. Friction welding, FRW*) u firmi Metal Product d.o.o. Eksperimentalni dio, odnosno ispitivanja su obavljena u Laboratoriju za željezo, čelik i ljevarstvo i Laboratoriju za kemiju u okviru Zavoda za procesnu metalurgiju te u Laboratoriju za fiziku i strukturna ispitivanja u okviru Zavoda za fizičku metalurgiju Metalurškog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Cilj ovog istraživanja bio je utvrditi mikrostrukturna svojstva materijala bakrene i aluminijske legure te njihova spoja i korelirati ih s utjecajem simuliranih tehnoklimatskih uvjeta u mediju umjetne kiše i 3,5% otopine NaCl. Navedeni mediji odabrani su radi uvida u primjenjivost ispitanih materijala i njihova spoja u kontinentalnim i primorskim krajevima.

3. 1. Kemijski sastav i mehanička svojstva

Ispitani su kemijski sastavi i mehanička svojstva meke bakrene legure Cu-ETP (CW004A) sukladno normi EN 13601 i gnječive aluminijske legure EN AW-1050A sukladno normi EN 573-3.

3. 2. Metalografska ispitivanja

Metalografska ispitivanja provedena su na uzorcima prije simulacije specifičnih tehnoklimatskih uvjeta. Uzorci su pripremljeni standardnim načinom brušenja, poliranja i nagrizanja.
Prije same pripreme uzoraka, spojnicu (slika 13) je trebalo izrezati i pripremiti komade koji će se ispitivati.



Slika 13. Spojnica Cu/Al

Spojnica je sastavljena od punog profila Cu i cijevi Al. Za pripremu uzoraka rezao se dio bakrenog dijela, spoj bakra i aluminija te aluminijski dio okomito i poprečno na smjer spojnice, kao što je prikazano na slici 14.

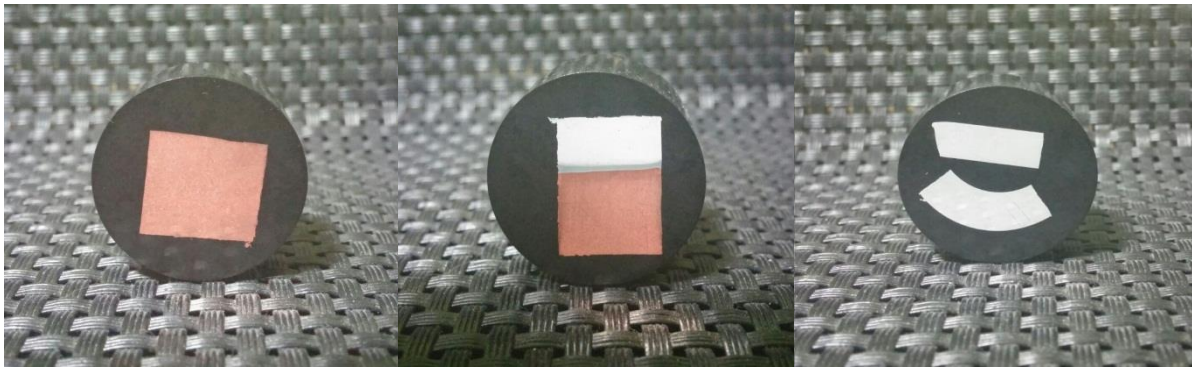


a) **b)** **c)**

Slika 14. Izrezani uzorci prije pripreme:
a) bakreni dio
b) spoj bakra i aluminija
c) aluminijski dio

Uzorci su potom pripremljeni standardnim načinom metalografske pripreme: brušenjem, poliranjem i nagrizanjem. Metalografska analiza provedena je na svjetlosnom mikroskopu Olympus GX51 opremljenom digitalnom kamerom Olympus DP70 i programskom podrškom za analizu slike Analysis® Materials ResearchLab. Mikrostrukturna ispitivanja provedena su na pretražnom elektronskom mikroskopu TescanVega TS 5136 MM. Pretražni elektronski mikroskop opremljen je Bruker energijskim disperzivnim spektrometrom koji omogućava uvid u distribuciju kemijskih elemenata na određenoj površini te analizu kemijskog sastava u određenoj točki.

Bakreni dio spojnice nagrizan je u otopini od 25 ml NH_4OH, 25 ml H_2O_2 (3%) i 25 ml vode u trajanju od 10 sekundi, dok je aluminijski dio spojnice nagrizan u 0,5% HF u trajanju od 20 sekundi. Uzorak spoja bakra i aluminija nije bio nagrizan. Pripremljeni uzorci su prikazani na slici 15.

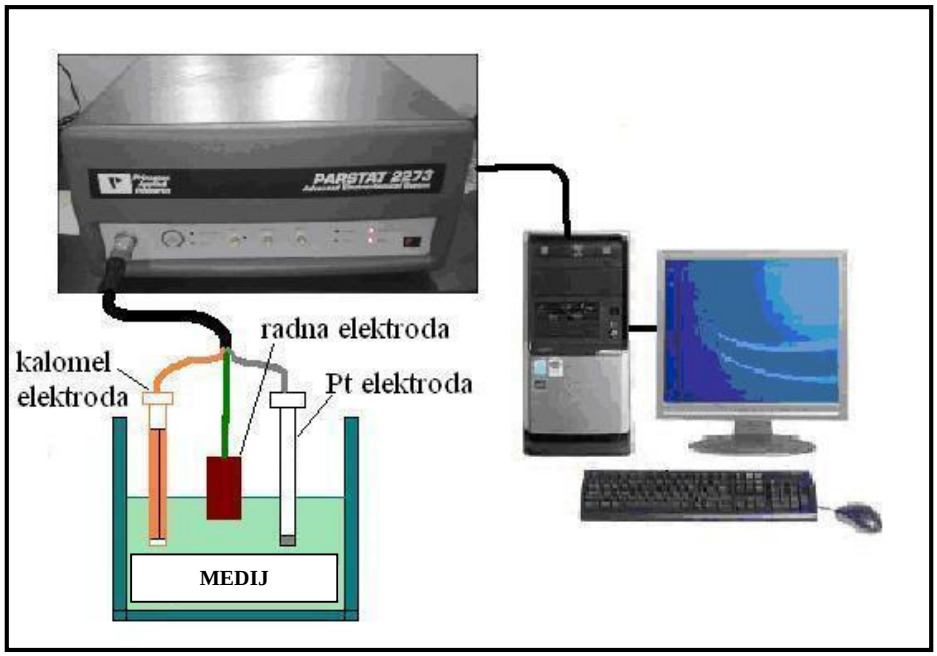


a) **b)** **c)**

Slika 15. Pripremljeni metalografski uzorci:
a) bakreni dio
b) spoj bakra i aluminija
c) aluminijski dio

3. 3. Elektrokemijska ispitivanja

Elektrokemijska priroda procesa korozije omogućuje primjenu različitih elektrokemijskih mjernih tehnika za određivanje intenziteta korozije. Razlikuju se tehnike s istosmjernom strujom (DC tehnike) i tehnike s izmjeničnom strujom (AC tehnike) [25, 26]. Pri elektrokemijskim ispitivanjima procesa korozije upotrebljavaju se polarizacijske metode mjerenja, potenciostatička i galvanostatička polarizacija. Cilj mjerenja je snimanje krivulja polarizacije struja-napon te na temelju anodnih i katodnih krivulja dobivanje slike o korozijskom ponašanju određenog materijala u određenom mediju. Na potenciostatičkoj polarizaciji zasniva se više metoda za određivanje brzine korozije, kao što su Tafelova ekstrapolacija i određivanje polarizacijskog otpora. U ovom radu izvedena je potenciodinamička polarizacija u području potencijala od -250 mV do +250 mV vs E_{corr}, uz brzinu promjene potencijala od 1 mV/s, a korozijski parametri su određeni pomoću softvera PowerCorr^{TM} primjenom Tafelove metode ekstrapolacije i Faradayevih zakona [27]. Prije svakog mjerenja potenciodinamičke polarizacije pokrenuta je stabilizacija potencijala kod otvorenog strujnog kruga E_{ocp}, pomoću računalom upravljanog potenciostata/galvanostata („Parstat 2273“) u trajanju od 30 minuta. Elektrokemijska ispitivanja izvedena su pomoću uzoraka očišćenih brusnim papirima gradacije No. 100, 220, 320, 400, 500 i 600, ispranih u destiliranoj vodi i odmašćenih u etanolu. Uzorak se kao radna elektroda postavljao u ispitivani medij u troelektrodnoj staklenoj ćeliji u kojoj su se nalazile zasićena kalomel elektroda (eng. *Saturated Calomel Electrode*, SCE), kao referentna elektroda i Pt-elektroda kao protuelektroda, slika 16 [27, 28]. Uzorci bakra, aluminija i Cu/Al spoja ispitani su pri sobnoj temperaturi u mediju 3,5 % NaCl i u mediju umjetne kiše (0,2 g L^{-1} Na_2SO_4 + 0,2 g L^{-1} $NaHCO_3$), kako bi se dobili podaci o korozijskoj otpornosti ispitanih materijala u slučaju primjene u primorskom i kontinentalnom području. Shema aparature za elektrokemijska mjerenja prikazana je slikom 16.



Slika 16. Shema aparature za elektrokemijska mjerenja

4. REZULTATI I DISKUSIJA REZULTATA

Kemijski sastavi i mehanička svojstva ispitani su kod dobavljača uložnih materijala Cu- i Al legure. Isti su usporedno prikazani tablicama 4 i 5.

Tablica 4. Kemijski sastav ispitanih legura

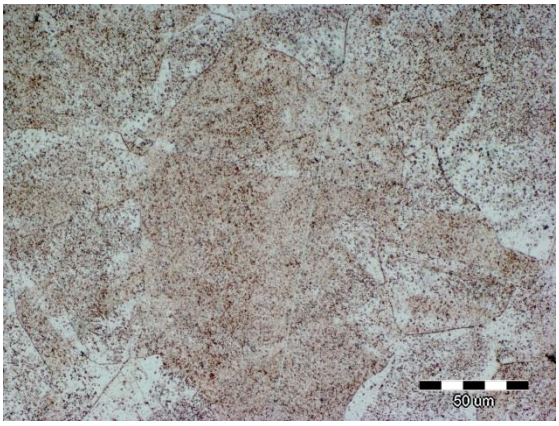
Kemijski element/%	Cu-legura	Al-legura
Si	-	0,11
Fe	-	0,28
Cu	99,900	0,030
Mn	-	0,022
Mg	-	0,003
Zn	-	0,003
Ti	-	0,021
Pb	-	0,001
Cd	-	0,0002
Hg	-	0,0003
Pb+Cd+Hg+Cr6+	-	0,0018
P	0,001	-
Al	-	99,51

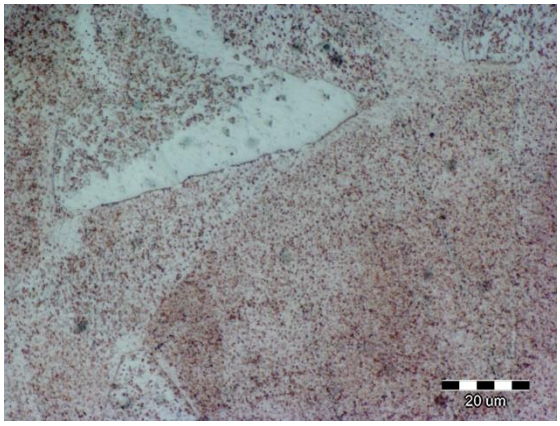
Tablica 5. Mehanička svojstva ispitanih legura

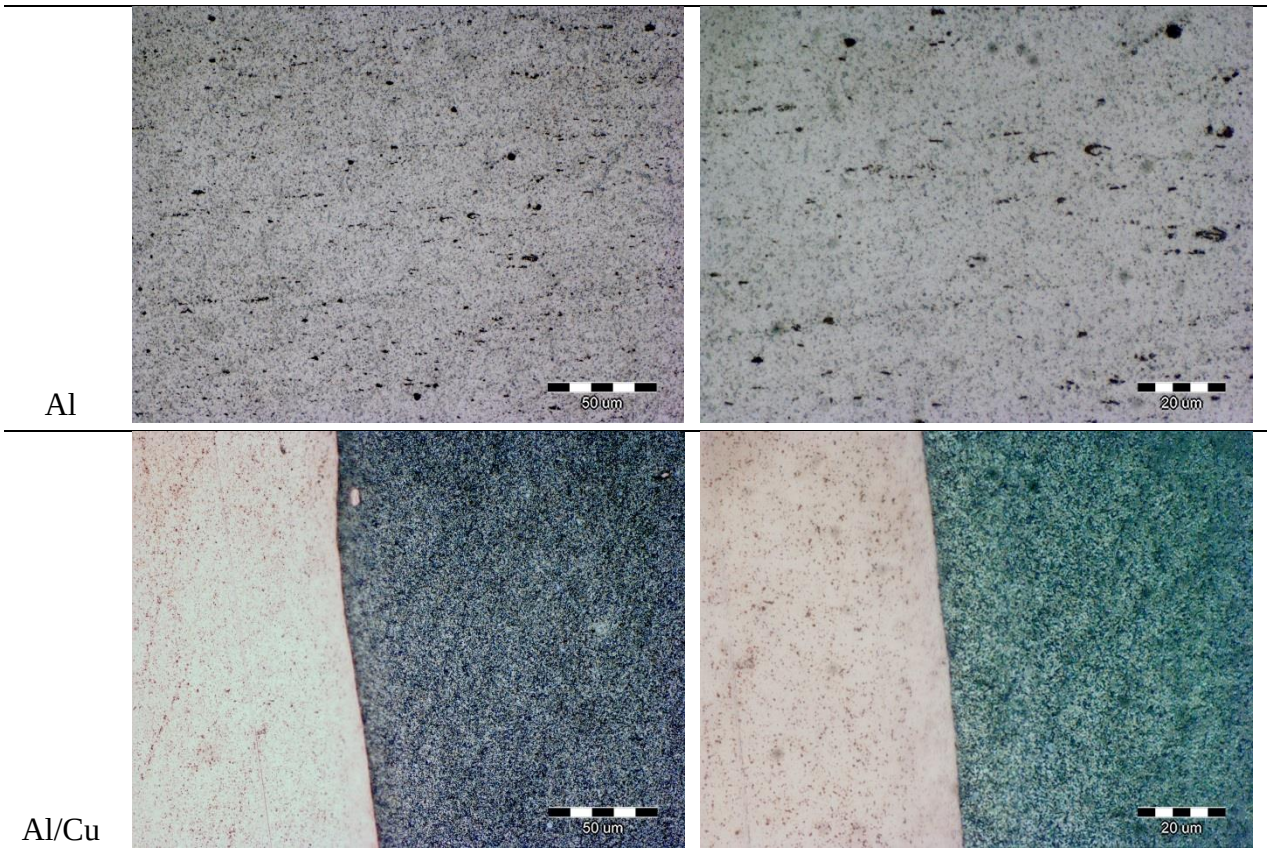
Materijal	Cu-legura	Al-legura
Granica razvlačenja $R_{p\,0,2}$ /Nmm^{-2}	58,8	107,0
Vlačna čvrstoća R_m / Nmm^{-2}	235,5	100,5
Istezljivost A / %	50,0	23,9
Tvrdoća HB / Min:30	51,0	36,6

Mikrostrukture pojedinačnih legura i Al/Cu spoja prikazane su usporedno pri povećanjima od 500X i 1000X na slici 17.

Cu

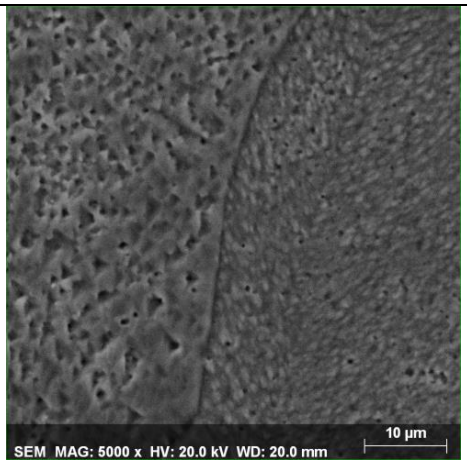
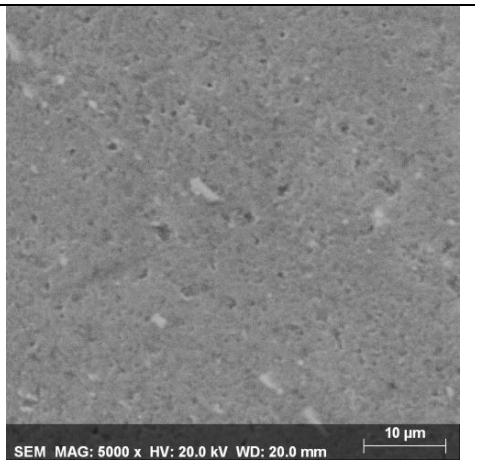
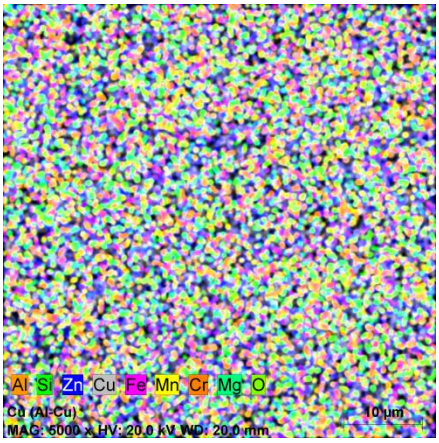
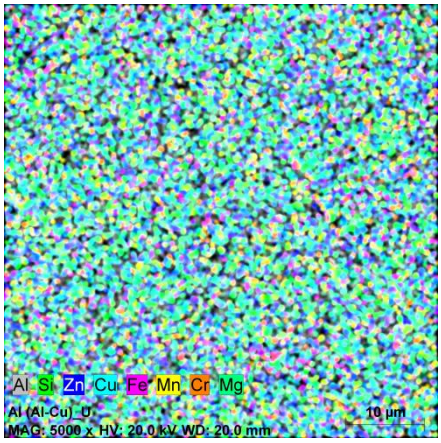
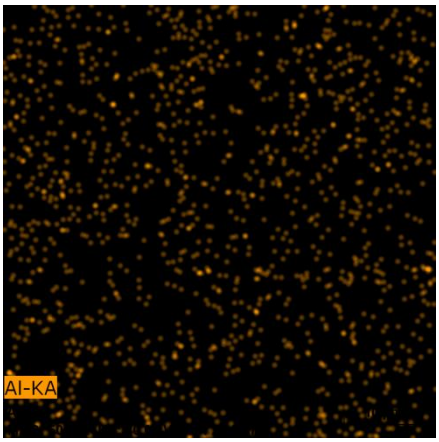
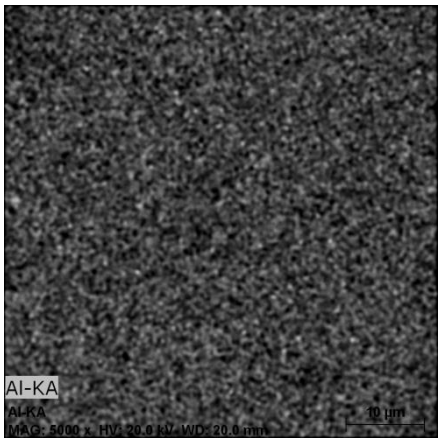
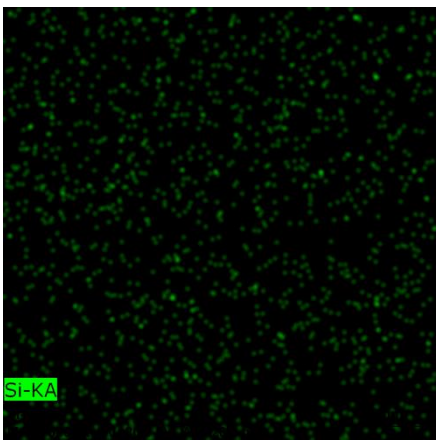
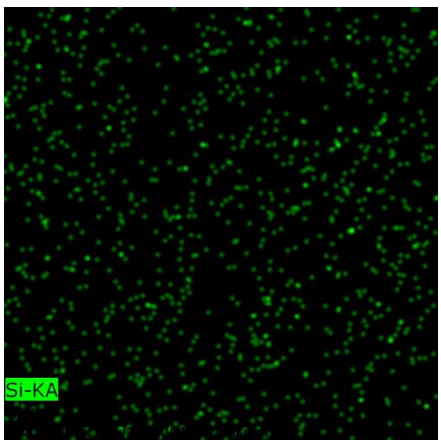


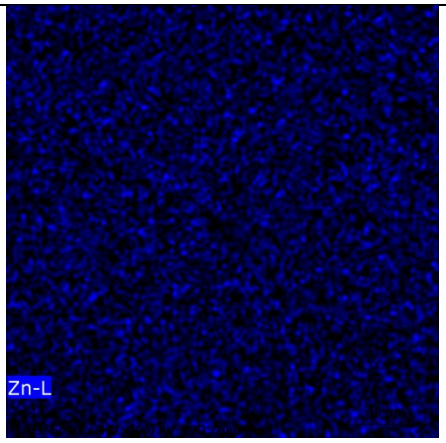
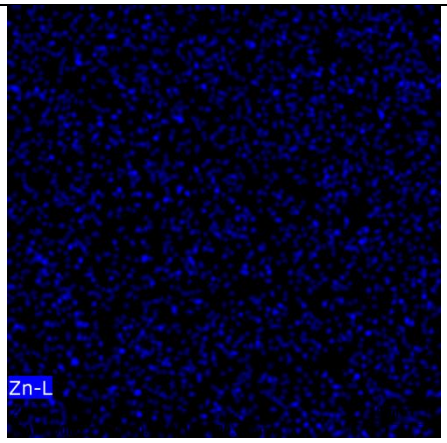
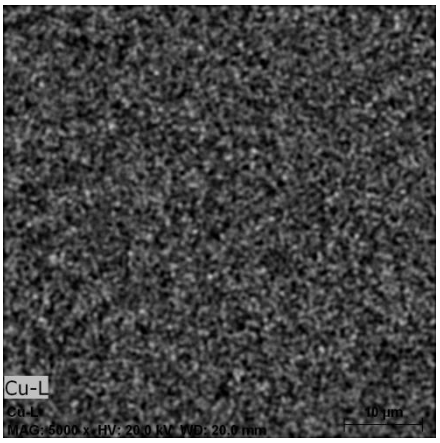
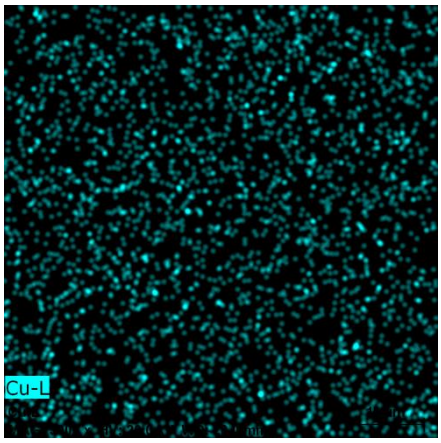
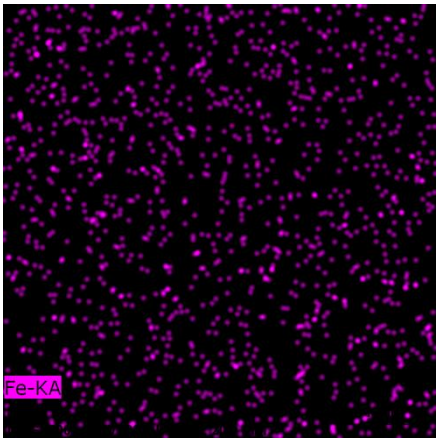
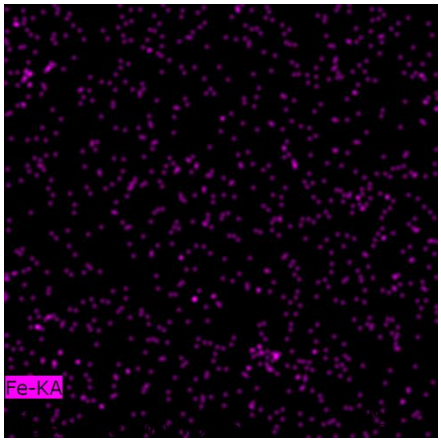
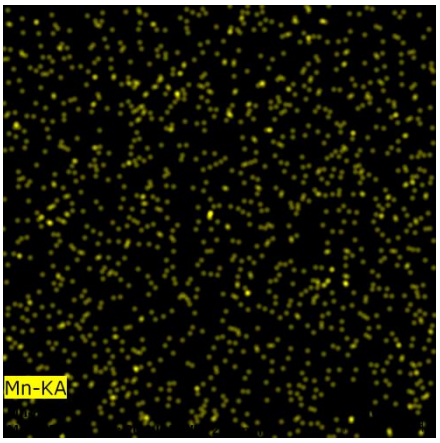
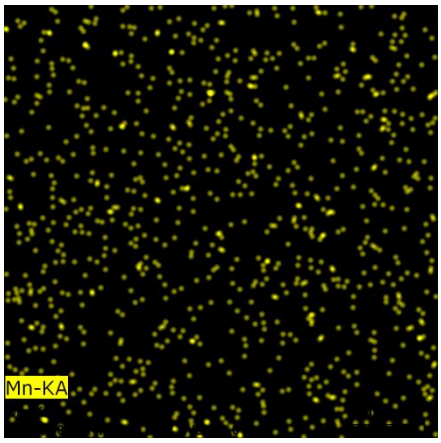


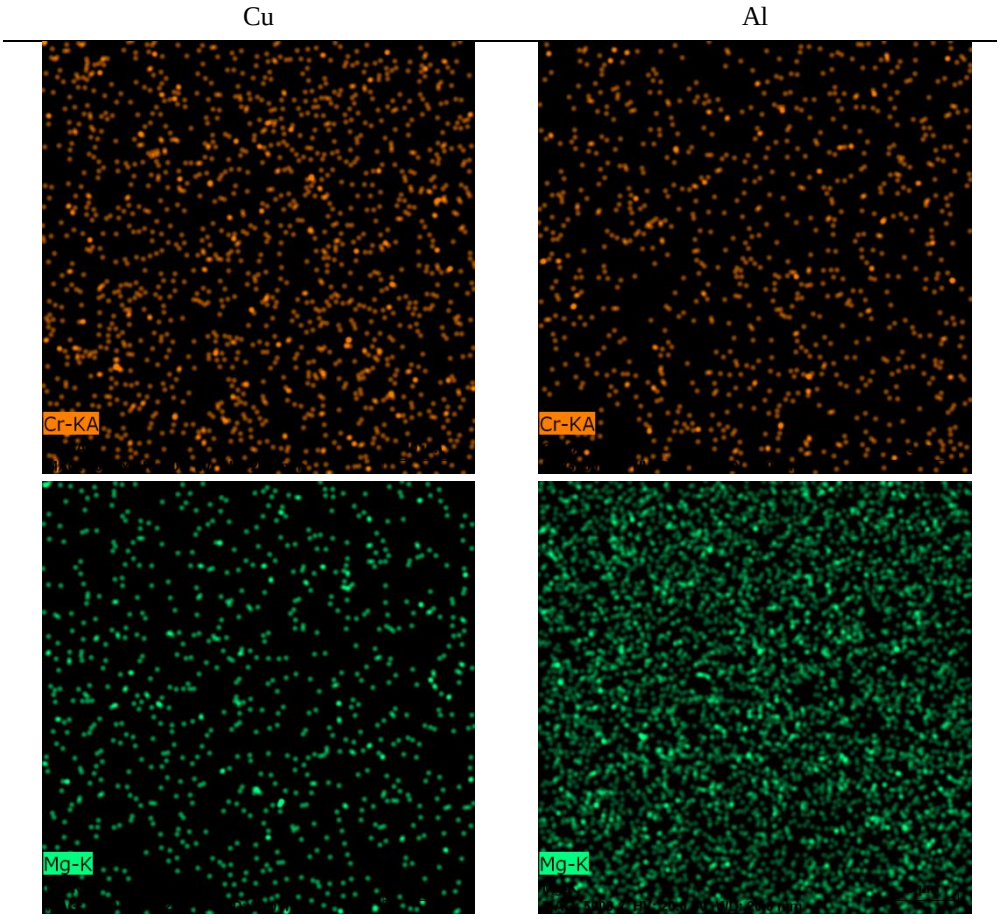


Slika 17. Mikrostruktura sastavnih komponenti i Al/Cu spoja

Uvidom u mikrostukturu uočava se legura bakra visoke čvrstoće s grubozrnatim neusmjerenim zrnima i ravnomjerno raspoređenim precipitatima unutar i po granicama zrna, dok je legura aluminija visoke čistoće mikrostrukture s usmjerenim precipitatima zbog prethodno provedene plastične prerade. Spoj aluminija i bakra ne prikazuje promjene u materijalu u rubnoj zoni. Metalografska analiza prikazuje da nema miješanja materijala u zoni spoja, već je jasno izražena granica spoja bez prisutnih precipitata, što ukazuje da je metoda zavarivanja trenjem legure bakra i aluminija vođena ispravno.
Detaljna mikroskopska analiza pojedinačnih materijala i spoja primjenom pretražnog elektronskog mikroskopa i energijske disperzivne spektrometrije, prikazana je na slikama 18 i 19.

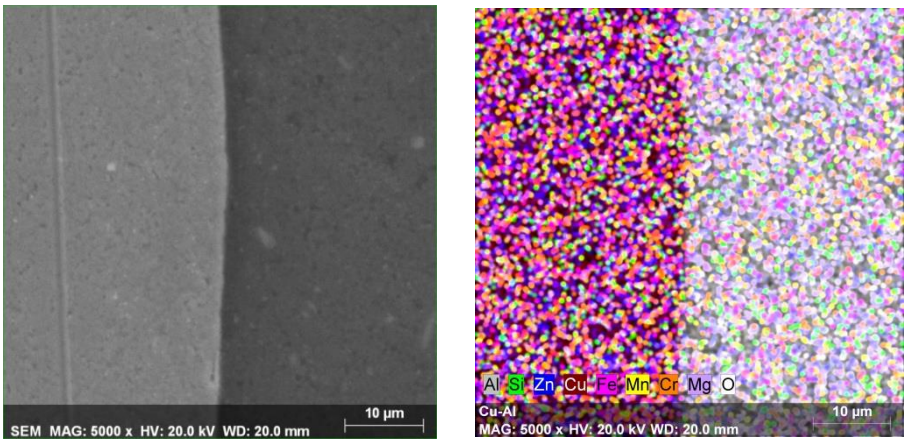
Cu	Al
SEM MAG: 5000 x HV: 20.0 kV WD: 20.0 mm 10 µm	SEM MAG: 5000 x HV: 20.0 kV WD: 20.0 mm 10 µm
Al Si Zn Cu Fe Mn Cr Mg O Cu (Al-Cu) MAG: 5000 x HV: 20.0 kV WD: 20.0 mm 10 µm	Al Si Zn Cu Fe Mn Cr Mg Al (Al-Cu) O MAG: 5000 x HV: 20.0 kV WD: 20.0 mm 10 µm
Al-KA	Al-KA Al-KA MAG: 5000 x HV: 20.0 kV WD: 20.0 mm 10 µm
Si-KA	Si-KA

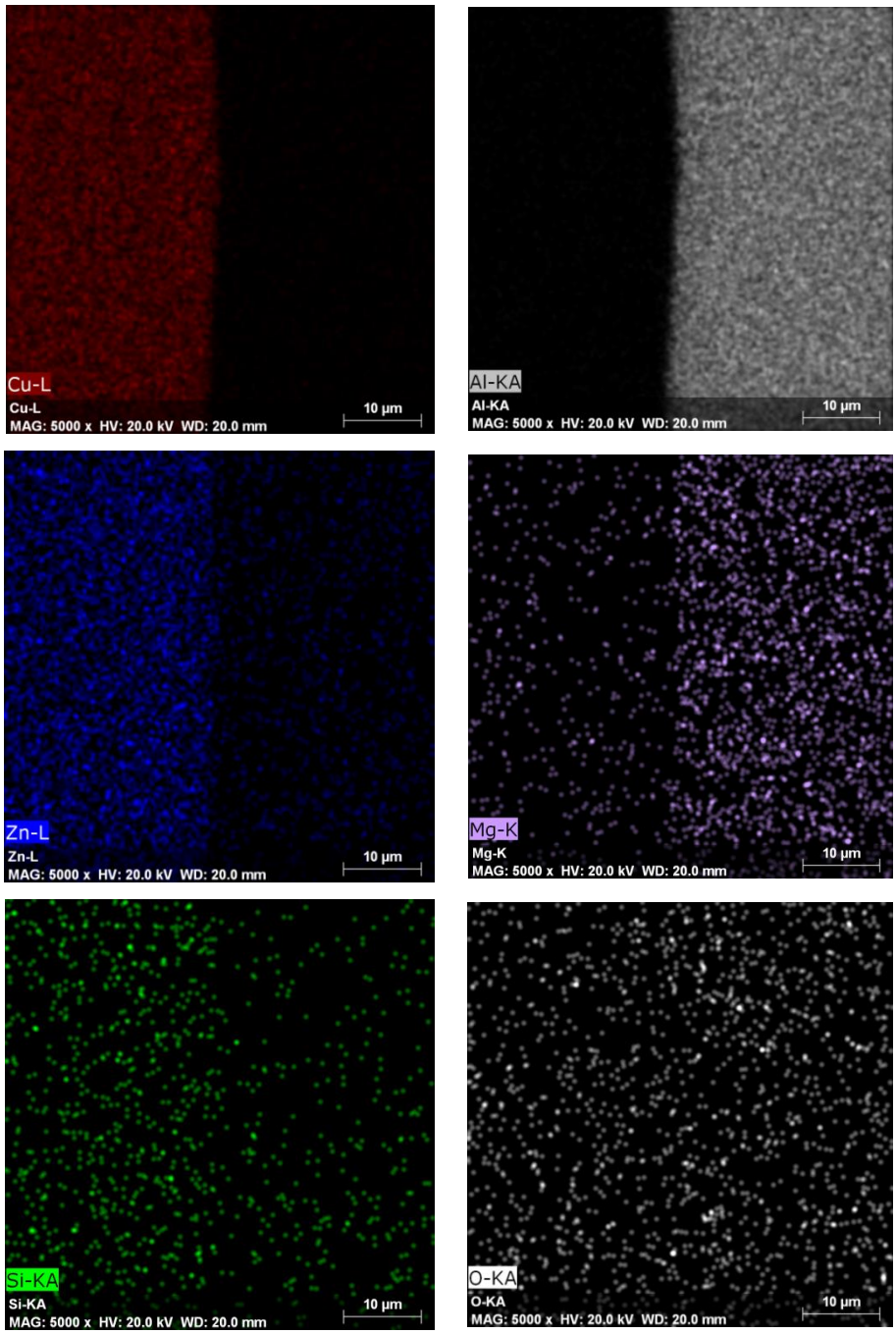
Cu	Al
	
	
	
	



Slika 18. Maping analiza legura bakra i aluminija

Uvidom u distribuciju odabranih prisutnih elemenata u legurama bakra i aluminija uočava se ravnomjerna raspodjela analiziranih elemenata u oba materijala, što indicira da se radi o legurama visoke čistoće. Prisutni elementi ne stvaraju intermetalne faze, već su otopljeni u metalnoj osnovi. Legura bakra uz metalnu osnovu prikazuje veći sadržaj Zn, Cr, i Fe. Legura aluminija uz metalnu osnovu prikazuje veći sadržaj Mg. Sadržaj Mn je u oba materijala podjednak. Važnost ispitivanja prisutnosti navedenih elemenata ogleda se u njihovu utjecaju na električnu otpornost/vodljivost navedenih materijala (slika 6.).



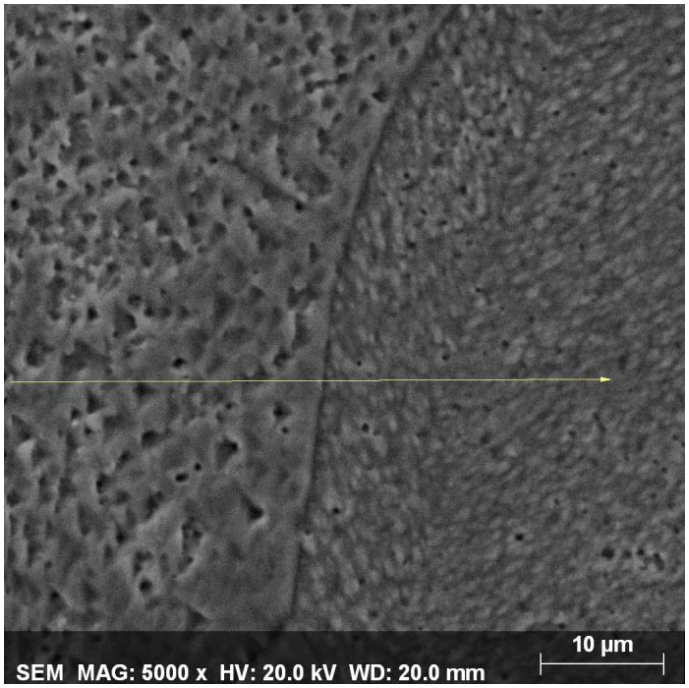


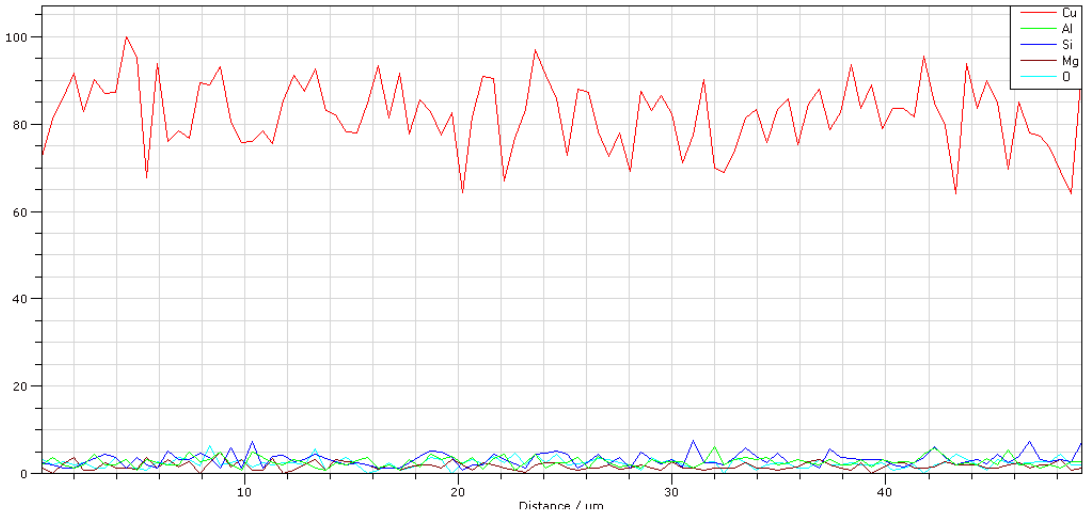
Slika 19. Maping analiza spoja materijala Cu/Al

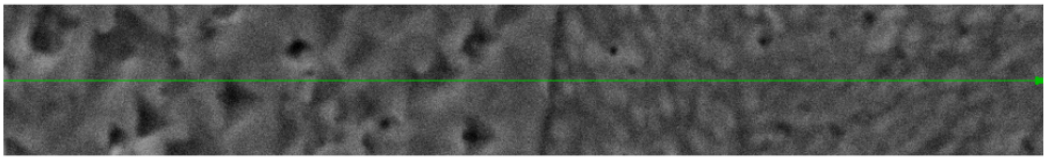
Maping analiza spoja ukazuje na visoki sadržaj ravnomjerno raspoređenog Zn i nešto veći sadržaj Si u bakrenoj leguri. Aluminijska legura sadrži veći udio ravnomjerno raspoređenog Mg. Kisik je podjednako zastupljen u obje legure. Granica spoja je oštra i ravnomjerna što upućuje na ispravno vođen postupak zavarivanja trenjem kojim nije došlo do miješanja materijala. Maping analiza potvrđuje da tijekom postupka zavarivanja nije došlo do miješanja materijala niti stvaranja spojeva po granicama spoja. Usporedbom distribucija elemenata u osnovnim materijalima (slika 19.), u blizini te na samom spoju ne uočavaju se intermetalne faze ili precipitati. To znači da materijali u zoni utjecaja topline (eng. heat affected zone) nisu pretrpjeli nikakve strukturne promjene.

Linijska analiza pojedinačnih materijala i spoja Cu/Al legure prikazana je slikom 20.

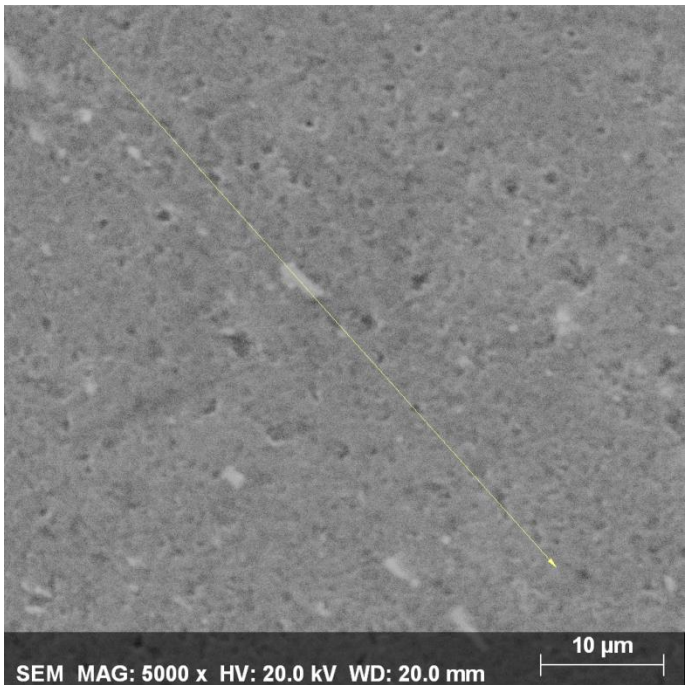
a)

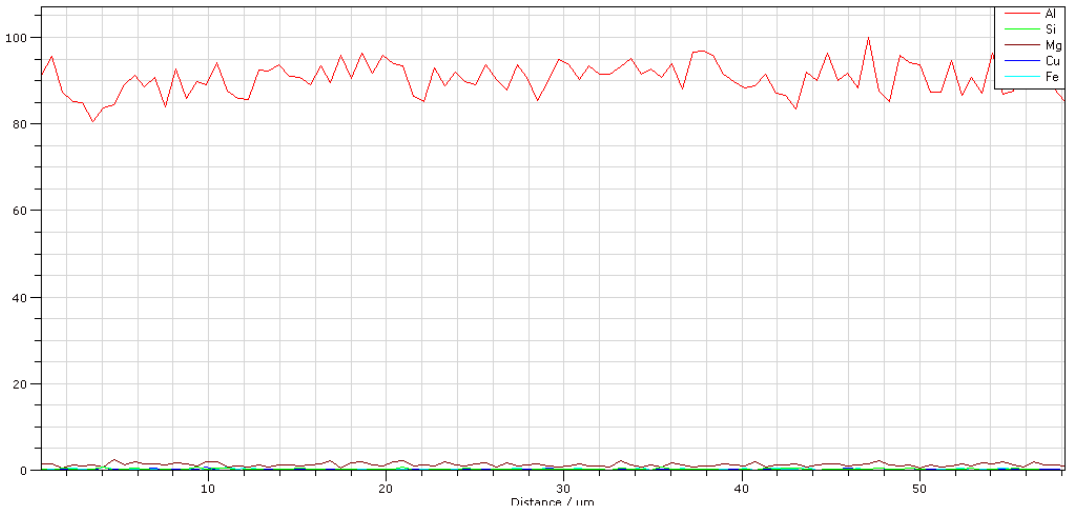

SEM MAG: 5000 x HV: 20.0 kV WD: 20.0 mm
10 µm

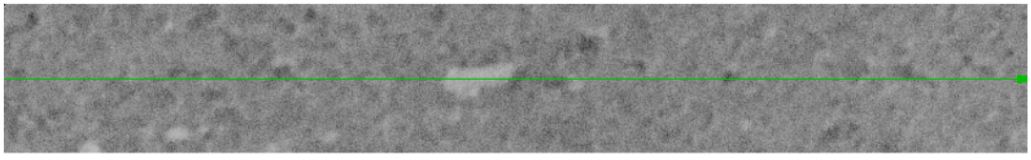

Cu
Al
Si
Mg
O
100
80
60
40
20
0
10
20
30
40
Distance / µm

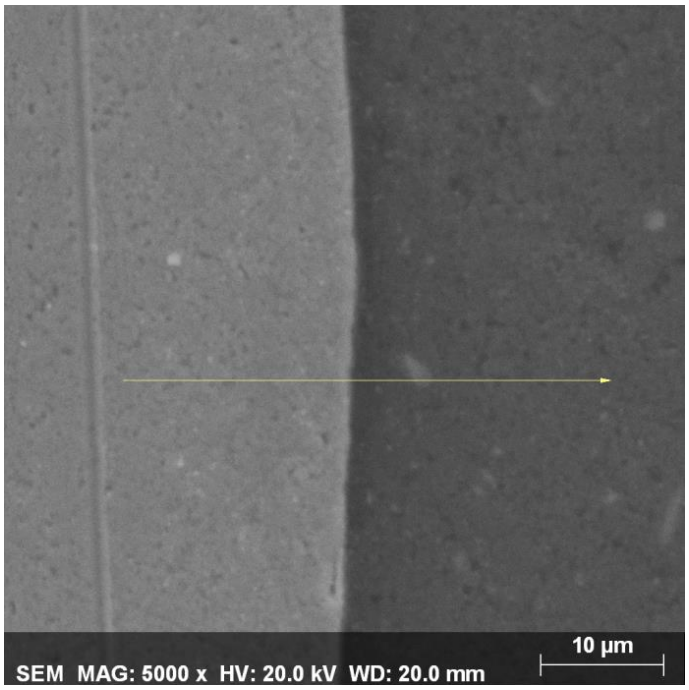


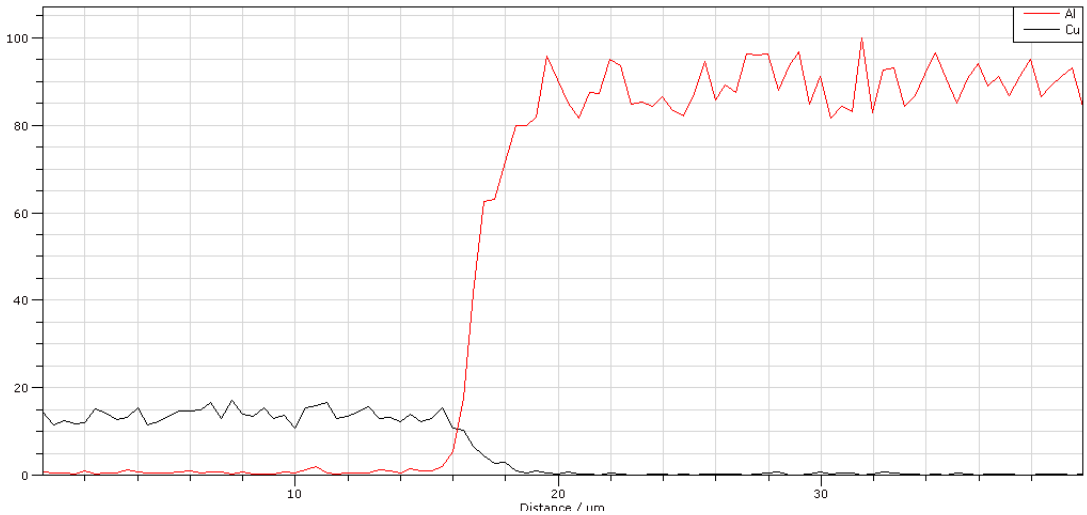
b)


SEM MAG: 5000 x HV: 20.0 kV WD: 20.0 mm
10 µm

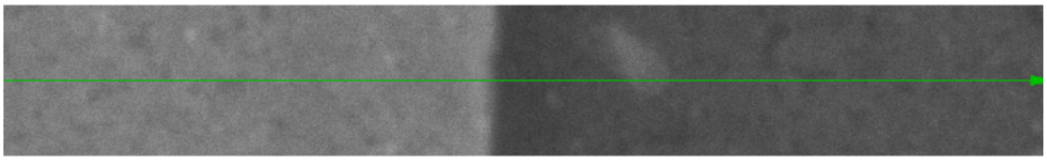

Al
Si
Mg
Cu
Fe
100
80
60
40
20
0
10
20
30
40
50
Distance / µm







c)

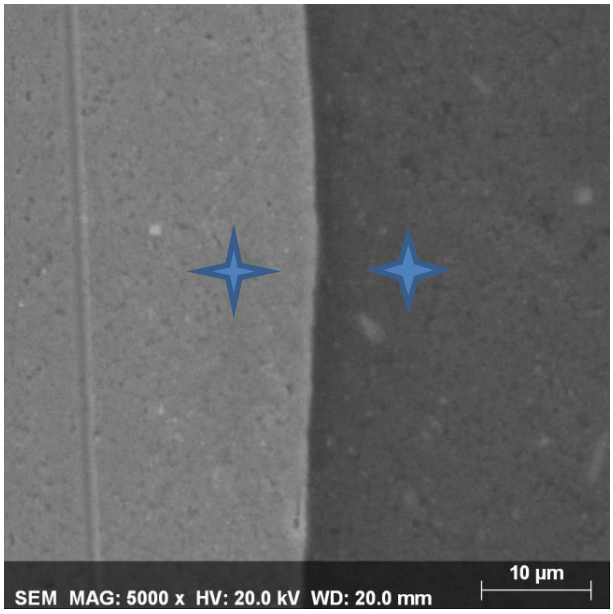


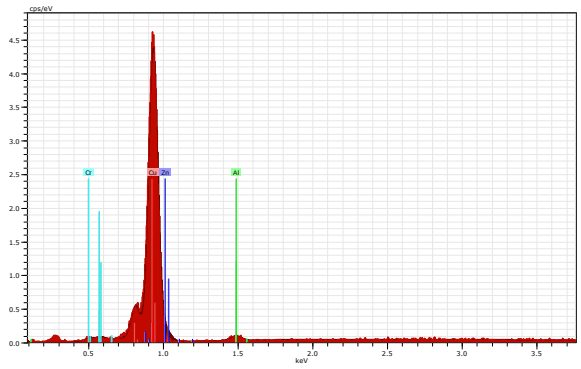
Slika 20. Linijska analiza a) legure bakra; b) legure aluminija; c) spoja Cu/Al

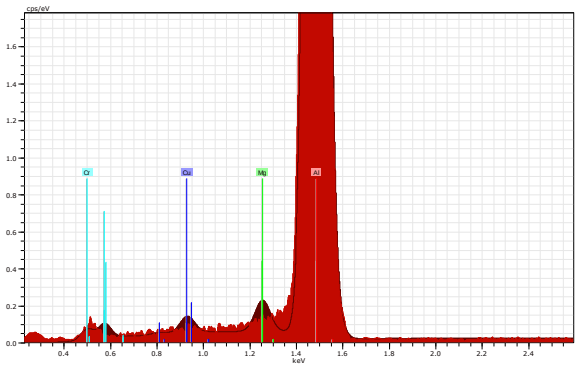
Linijska analiza pojedinačnih materijala legura bakra i aluminija ne ukazuje na odstupanja u pogledu distribucije pojedinih elemenata. Pritom su odabrani i analizirani utjecajni elementi na svojstvo električne vodljivosti odnosno električne otpornosti pojedinog materijala. Legura bakra je homogena i ne pokazuje nagomilavanje elemenata po granicama zrna (Al, Si, Mg). Osim navedenih elemenata ispitan je i sadržaj kisika zbog afiniteta metalne osnove ka stvaranju oksida zbog utjecaja toplinske energije uslijed primjene postupka zavarivanja. Legura aluminija također pokazuje visoki stupanj homogenosti. Zbog uočenih precipitata linijska analiza provedena je upravo preko jedne dimenzijski značajne tvorbe kako bi se utvrdila raspodjela kemijskih elemenata. Nije utvrđena značajna fluktuacija u sadržaju značajnih elemenata za električna svojstva legure aluminija (Si, Mg, Cu, Fe). Linijska analiza

elemenata na spoju također ukazuje na homogenu i jasnu granicu spoja i nije utvrđeno miješanje materijala u zoni zavara.

Analiza u točki provedena je na oba materijala radi utvrđivanja prisustva primjesa u osnovnom materijalu, kako je prikazano slikom 21.







Element	C norm. [wt.%]	C Atom [at.%]
Cu	95,04	93,28
Al	1,29	2,99
Zn	2,71	2,58
Cr	0,96	1,15

a)

Element	C norm. [wt.%]	C Atom [at.%]
Al	96,50	97,63
Mg	1,15	1,29
Cu	1,65	0,71
Cr	0,69	0,36

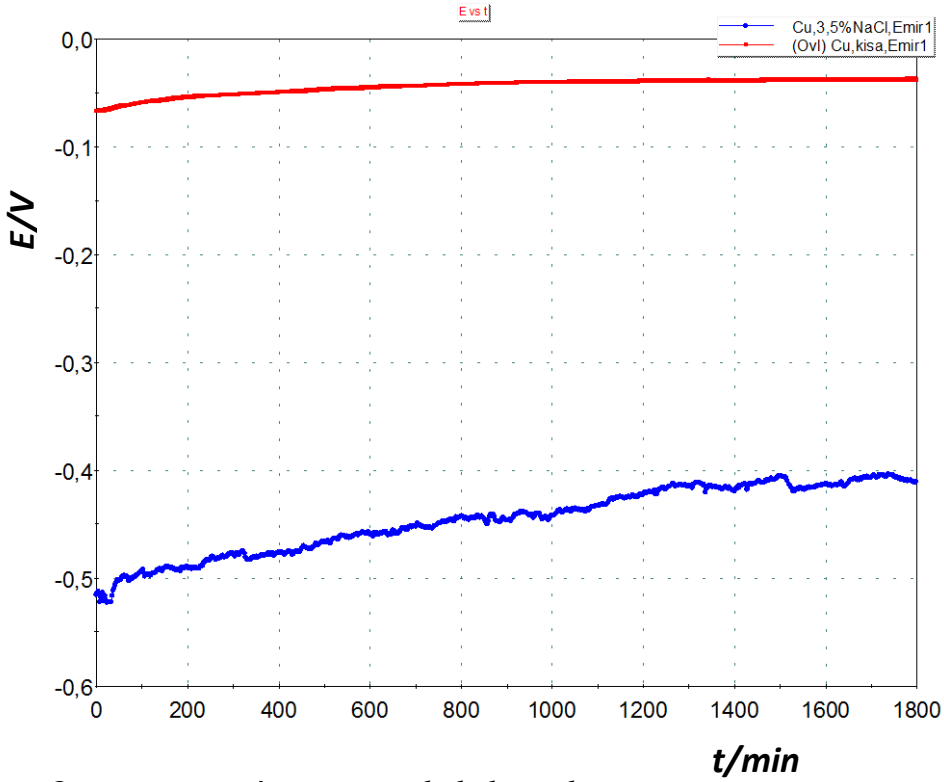
b)

Slika 21. Analiza u točki legura bakra (a) i aluminija (b)

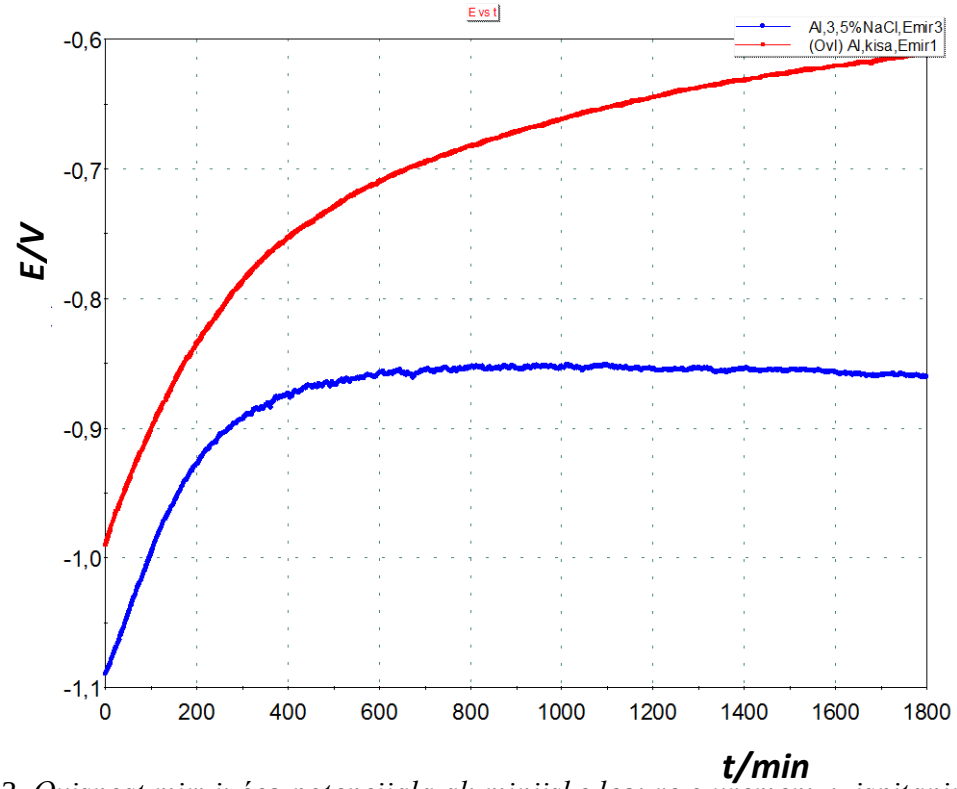
Analiza u točki pojedinačnih materijala ukazuje na visoku čistoću legura i potvrđuje certificiranu analizu dobivenu od dobavljača uložnih materijala. Legura bakra sadrži 95,04 mas.% Cu, a legura aluminija 98,63 mas.% Al. Iz analize u točki materijala spoja utvrđen je odgovarajući udio utjecajnih elemenata cinka, aluminija i kroma u leguri bakra. Krom je pripadnik skupine najutjecajnijih elemenata na povećanje električne otpornosti bakra, dok aluminij ima manji utjecaj. Legura aluminija sadrži odgovarajući udio utjecajnih elemenata magnezija, bakra i kroma. Magnezij i bakar imaju srednji utjecaj, dok krom značajno pogoršava električnu vodljivost aluminija. Budući da su navedeni elementi u obliku krute

otopine metalne osnove i ne tvore intermetalne faze/precipitate ne očekuje se značajan utjecaj u smislu pogoršanja električne vodljivosti pojedinih materijala.

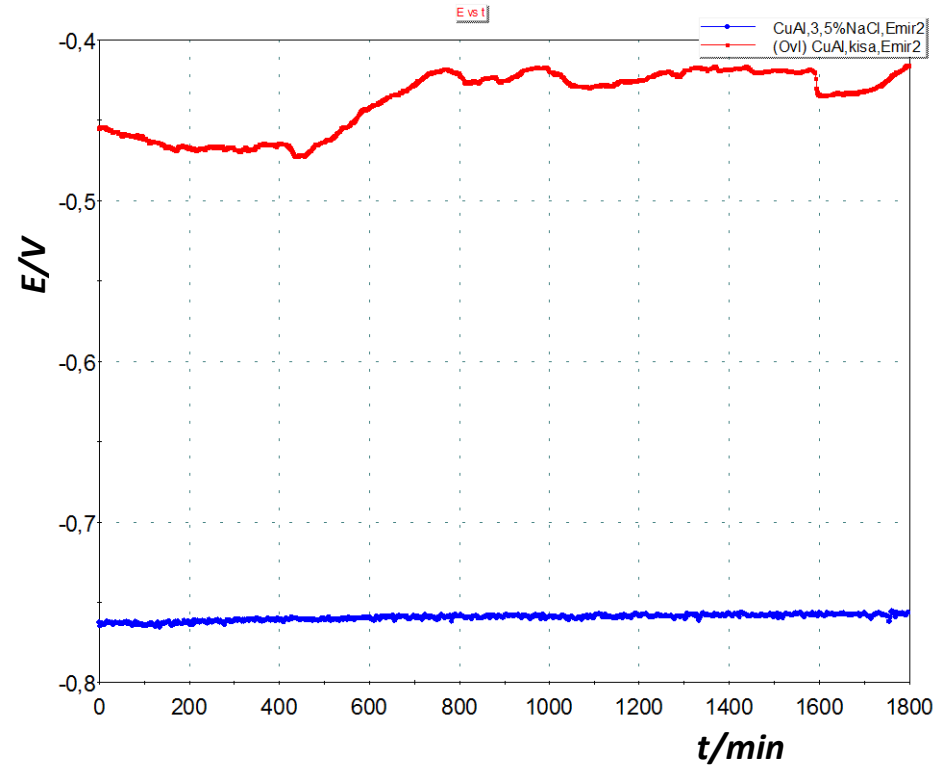
Nakon mjerenja potencijala otvorenog strujnog kruga E_{ocp}, a u svrhu određivanja sljedećih korozijskih parametara: korozijskog potencijala E_{corr}, gustoće struje korozije I_{corr}, anodnog nagiba b_a, katodnog nagiba b_c i brzine korozije v_{corr} izvedena je potenciodinamička polarizacija u području potencijala od −250 mV do +250 mV vs. E_{corr} u mediju 3,5 % NaCl i mediju umjetne kiše. Ovisnosti potencijala kod otvorenog strujnog kruga o vremenu za ispitane materijale prikazane su na slikama 22-24. Polarizacijske krivulje ispitanih legura pri različitim temperaturama prikazane su na slikama 25-27, a korozijski parametri određeni iz polarizacijskih krivulja navedeni su u tablicama 6 i 7.



Slika 22. Ovisnost mirujućeg potencijala bakrene legure o vremenu u ispitanim medijima



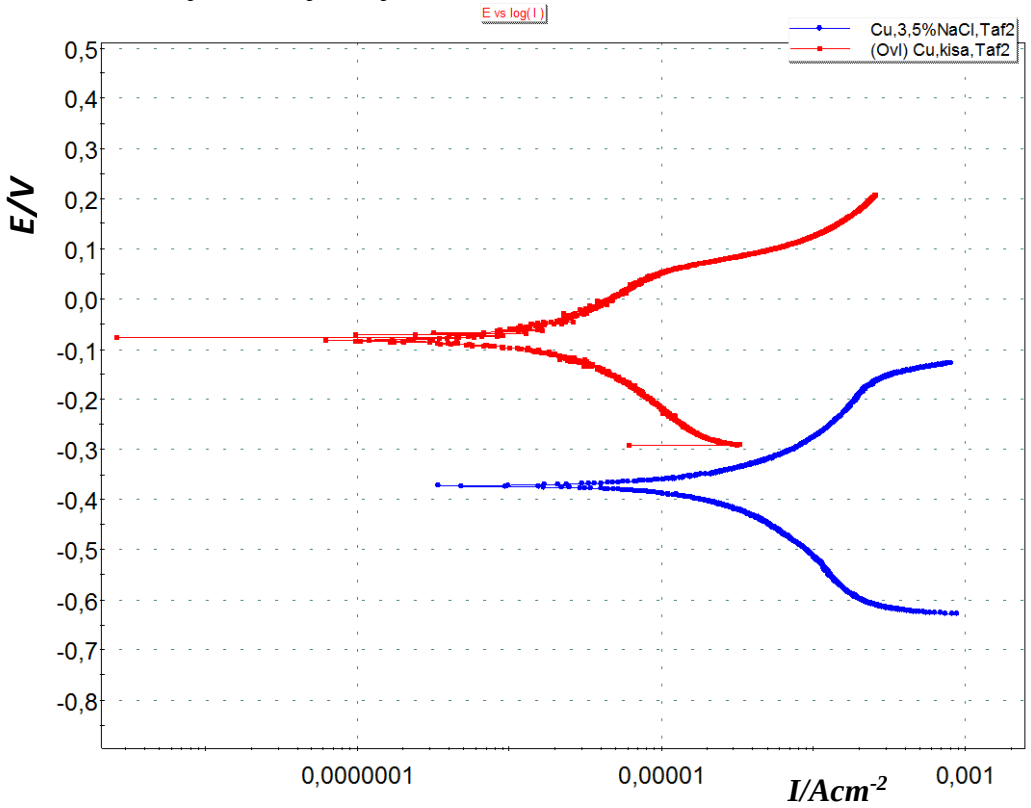
Slika 23. Ovisnost mirujućeg potencijala aluminijske legure o vremenu u ispitanim medijima



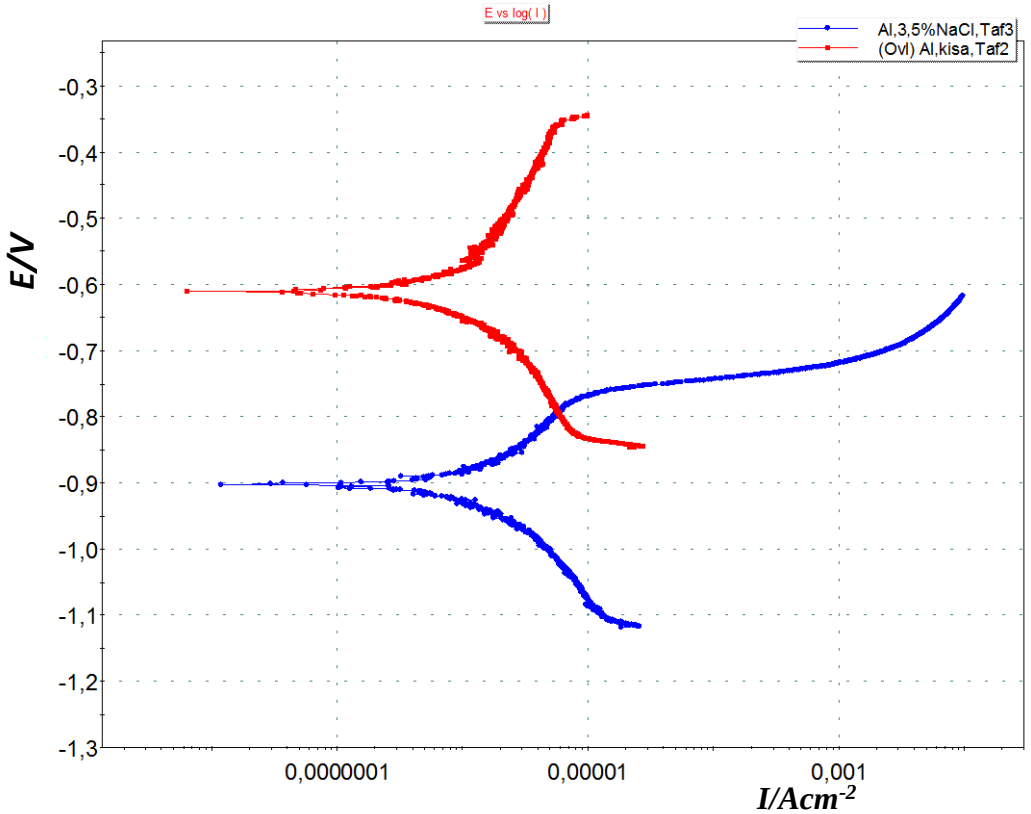
Slika 24. Ovisnost mirujućeg potencijala Al-Cu spoja o vremenu u ispitanim medijima

Promatrajući slike 22-24 može se uočiti da ispitani materijali brzo postižu svoj mirujući potencijal u oba ispitana medija, tj. potencijal otvorenog strujnog kruga. Međutim, važno je za primijetiti da se potencijal kod otvorenog strujnog kruga u mediju umjetne kiše pomiče ka pozitivnijim vrijednostima, što upućuje na činjenicu da u tom mediju dolazi do stvaranja

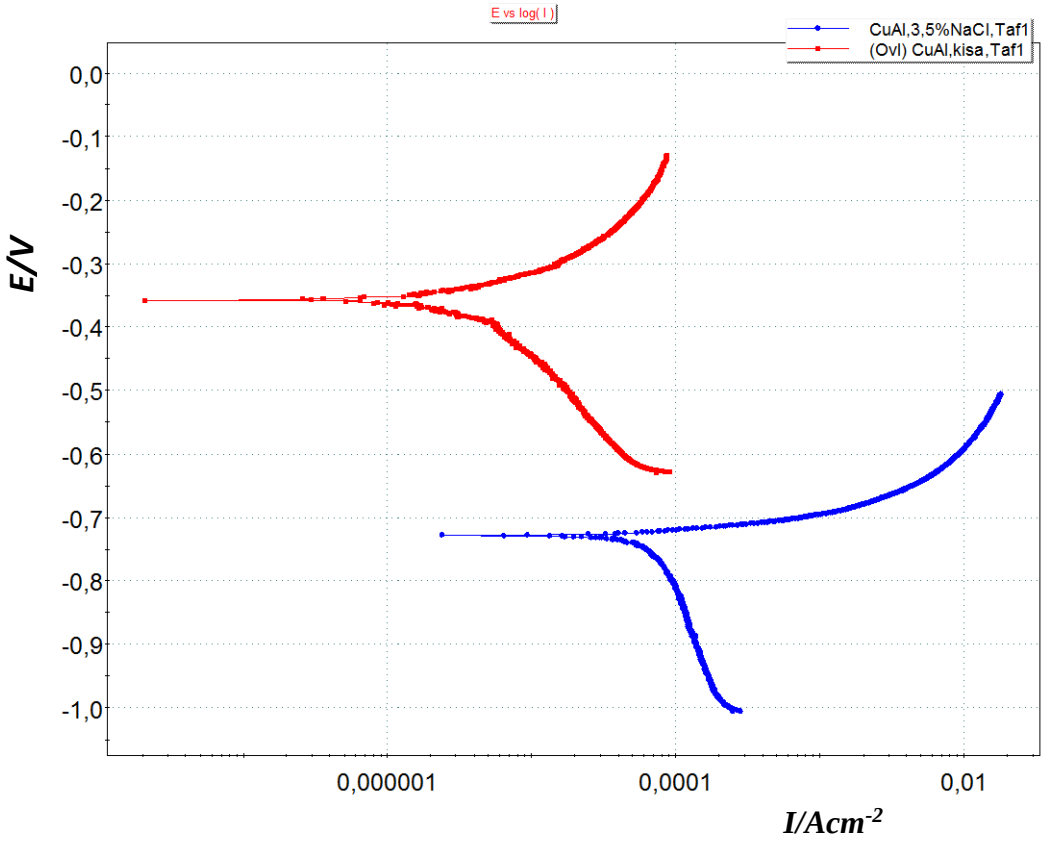
pasivnog zaštitnog sloja, koji dalje štiti materijal od korozije. Iz tog razloga, dobivene su i manje brzine korozije u mediju umjetne kiše.



Slika 25. Polarizacijska krivulja bakrene legure u ispitanim medijima



Slika 26. Polarizacijska krivulja aluminijske legure u ispitanim medijima



Slika 27. Polarizacijska krivulja Cu/Al spoja u ispitanim medijima

Tablica 6. Korozijski parametri ispitanih materijala u mediju 3,5 % NaCl

Materijal	***P***	E_{corr}**vs. SCE**	b_a	b_c	I_{corr}	v_{corr}
	cm²	mV	mV/dec	mV/dec	Acm^{-2}	$mm\ god^{-1}$
Cu-legura	1,43	-372,55	254,98	356,86	$3,29\times10^{-5}$	0,77
Al-legura	0,52	-799,70	90,58	221,31	$3,07\times10^{-6}$	0,10
Cu/Al spoj	1,92	-728,52	124,17	852,66	$5,67\times10^{-5}$	1,46

Tablica 7. Korozijski parametri ispitanih materijala u mediju umjetne kiše

Materijal	***P***	E_{corr}**vs. SCE**	b_a	b_c	I_{corr}	v_{corr}
	cm²	mV	mV/dec	mV/dec	Acm^{-2}	$mm\ god^{-1}$
Cu-legura	1,43	-78,45	117,74	152,54	$0,81\times10^{-6}$	0,019
Al-legura	0,52	-609,35	246,71	178,02	$1,41\times10^{-6}$	0,046
Cu/Al spoj	1,92	-357,61	200,20	393,76	$4,70\times10^{-6}$	0,121

Iz dobivenih rezultata prikazanih na slikama 25-27 i u tablicama 6 i 7 može se uočiti da su svi ispitani materijali pokazali najmanju korozijsku otpornost u mediju 3,5 % NaCl, o čemu svjedoče veći iznosi za brzinu korozije i gustoću brzine korozije. Također, iz rezultata je vidljivo da je u mediju 3,5 % NaCl najmanju brzinu korozije pokazala Al-legura, nju slijedi Cu-legura pa onda Cu/Al spoj. U mediju umjetne kiše situacija je malo drugačija, jer je najveću korozijsku otpornost pokazala Cu-legura pa tek onda Al-legura i Cu/Al spoj. Dobiveni rezultati su u skladu s već provedenim znanstvenim istraživanjima i ako promotrimo podatke u tablici 6, ispitani materijali su pokazali dobru otpornost na atmosfersku koroziju i stoga, mogu se primjenjivati u primorskom i kontinentalnom području [29].

Tablica 8. Prosječna brzina prodiranja korozije za razne metale i otopine [30]

Metal ili legura	**Prosječna brzina prodiranja korozije (mm/god)**				
	Gradska atmosfera	Morska voda	H_2SO_4 (5 mas.%)	HNO_3 (5 mas.%)	NaOH (5 mas.%)
Ugljični čelik	1,182-7,88	0,1182-11,82	15,76-394	VRLO VELIKA	< 0,197
Aluminij	< 0,512	1,182-51,22	7,88	15,76-78,8	VRLO VELIKA
Bakar	< 1,97	1,97-19,7	3,15-39,4	VRLO VELIKA	1,97-19,7
Olovo	< 0,197	0,197-15,76	<1,97	98,5-591	5,91-591

Također, vidljivo je da su sva tri ispitana materijala pokazala manje anodne i katodne nagibe u mediju umjetne kiše, što upućuje na činjenicu da su u tom mediju manje izražene reakcije na anodi i katodi. Drugim riječima, u mediju 3,5 % NaCl više su izražene katodna reakcija i reakcija anodnog otapanja ispitanih materijala.

5. ZAKLJUČCI

Pomoću metalografskih ispitivanja ispitana je kvaliteta dvaju materijala spoja Cu/Al te njihova granica. Elektrokemijskim ispitivanjima proučavana je korozijska otpornost bakrene i aluminijske legure te njihova spoja zavarena trenjem u mediju 3,5% NaCl i mediju umjetne kiše.

- Metalografskom analizom utvrđeno je da se radi o legurama bakra i aluminija visoke čistoće. Legura bakra sadrži potencijalno visok sadržaj kroma koji može narušiti njezinu vodljivost te visok sadržaj aluminija koji u dodiru s kisikom i vlagom može uzrokovati elektrokemijsku koroziju. Aluminijska legura ima nešto viši sadržaj kroma, koji potencijalno narušava električnu vodljivost legure. Precizna granica spoja, koja ne pokazuje miješanje dvaju materijala, ukazuje na ispravno vođen postupak zavarivanja trenjem.

- Mikrostrukturna analiza provedena je tehnikama maping analize određenih površina pojedinih materijala i Cu/Al spoja te analizom po liniji i u točki značajnih područja mikrostrukture. Uvidom u distribuciju odabranih prisutnih elemenata maping analizom u legurama bakra i aluminija uočava se ravnomjerna raspodjela analiziranih u oba materijala, što indicira da se radi o legurama visoke čistoće. Točkasta analiza pojedinačnih materijala ukazuje na visoku čistoću legura i potvrđuje certificiranu analizu dobivenu od dobavljača uložnih materijala. Legura bakra sadrži 95,04 mas.% Cu, a legura aluminija 98,63 mas.% Al. Iz točkaste analize materijala spoja utvrđen je odgovarajući udio utjecajnih elemenata cinka, aluminija i kroma u leguri bakra. Legura aluminija sadrži odgovarajući udio utjecajnih elemenata magnezija, bakra i kroma. Budući da su navedeni elementi u obliku krute otopine metalne osnove i ne tvore intermetalne faze/precipitate ne očekuje se značajan utjecaj u smislu pogoršanja električne vodljivosti pojedinačnih materijala. Spoj Cu/Al također ne pokazuje nikakve intermetalne faze/precipitate niti nagomilavanje utjecajnih elemenata u blizini spoja što znači da materijali u zoni utjecaja topline (eng. heat affected zone) nisu pretrpjeli nikakve strukturne promjene.

- Metodom potenciodinamičke polarizacije je ustanovljeno da je brzina korozije aluminija i bakra manja u mediju umjetne kiše, nego u mediju 3,5 % NaCl. Pritom je Al-legura pokazala najmanju brzinu korozije u mediju 3,5 % NaCl, dok je u mediju umjetne kiše najmanju brzinu korozije pokazala Cu-legura. U oba medija, najveću brzinu korozije je pokazao Cu/Al spoj, tj. područje zavara izvedenog trenjem.

- S obzirom na male iznose brzine korozije ispitanih materijala u oba medija može se zaključiti da je Cu/Al spojnica od legura visoke čistoće, spojena primjenom metode zavarivanja trenjem, otporna na atmosfersku koroziju i stoga primjenjiva u primorskom i kontinentalnom predjelu.

6. LITERATURA

[1] V. Šunde, Z. Benčić, T. Filetin, Materijali u elektrotehničkim proizvodima, Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva, Graphis, Zagreb, https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/Skripta_Materijali_u_elektrotehnickim_proizvodima.pdf, 15. 4. 2016.

[2] https://www.scribd.com/doc/28528838/Materijali-II-drugi-Dio, 10. 7. 2016.

[3] http://www.livescience.com/images/i/000/039/867/original/copper.jpg?1367945259, 11. 7. 2016.

[4] https://hr.wikipedia.org/wiki/Bakar_(element), 10. 7. 2016.

[5] S. O Kasap, Principles of Electrical Engineering Materials and devices, McGraw-Hill, Boston, 2000.

[6] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof, Svojstva i primjena materijala, Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.

[7] http://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium, 13. 7. 2016

[8] ASM Specialty Handbook® , Aluminum and Aluminum Alloys, ur. J. R. Davis, ASM International, Materials Park, Ohio, 2002.

[9] G. Budd, TALAT Lecture 1101, Resources and Production of Aluminium, Aluminium Federation, Birmingham, 1999.

[10] https://hr.wikipedia.org/wiki/Aluminij, 10.7.2016.

[11] Ž. A. Spasojević , Z. V. Popović, Elektrotehnički i elektronski materijali, Naučna knjiga , Beograd, 1979.

[12] V. Knapp, P. Colić, Uvod u električna i magnetna svojstva materijala, Školska knjiga, Zagreb, 1997.

[13] T. Tarandek, Magistarski rad, Utjecaj aluminijskih dijelova na pojavu vodika u mjernom transformatoru, Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.

[14] http://www.lme.com/metals/non-ferrous/aluminium/production-and-consumption/, 13. 7. 2016.

[15] https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektrotehni%C4%8Dki_materijali#Podjela_prema_namjeni_i_osobinama, 9. 7. 2016.

[16] http://www.sonosystems.eu/fileadmin/sp-images/schunk-sonosystems-litzen-busbar-an-aluschiene.jpg, 11. 7. 2016.

[17] J. I. Frenkelj, Uvod u teoriju metala, Moderna fizika, Školska knjiga, Zagreb, 1996.

[18] http://g03.a.alicdn.com/kf/HTB1jketJVXXXXXXIXFXXq6xXFXXXZ/Conduit-Hose-Cover-Length-10-Wire-Protector-Dia-20mm-Electric-Wiring-Wire-Split-Loom-Tubing-Wire.jpg, 11. 7. 2016.

[19] https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektri%C4%8Dni_vodi%C4%8D, 11. 7. 2016.

[20] ASM International Handbook Committe: ASM Handbook – Welding, Brazing and Soldering, ASM International Materials park, 1993.

[21] S. Kralj, Š. Andrić, Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka, Sveučilište u Zagrebu – Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1992.

[22] ASM International Handbook Committe: ASM Handbook – Welding Fundamentals and Processes, 2011.

[23] G. Meden, A. Pavelić, D. Pavletić, Osnove zavarivanja, Sveučilište u Rijeci – Tehnički fakultet, Rijeka, 2000.

[24] "Zavarivanje I", izv. prof. dr. sc. Duško Pavletić, dipl. ing., Tehnički fakultet Rijeka, 2011.

[25] E. Stupnišek-Lisac, Korozija i zaštita konstrukcijskih materijala, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2007.
[26] L. Pomenić, Zaštita materijala, skripta, Tehnički fakultet Rijeka, 2011.
[27] A. Begić Hadžipašić, H. Hadžipašić, S. Vrbanjac, The Influence of Medium and Microstructure on Corrosion Rate of Dual Phase High-Strength Structural Steels, The Holistic Approach to Environment 2 (2012) 2, 73-84.
[28] V. Novak, Primjena metalnih prevlaka u zaštiti metala od korozije, Završni rad, Metalurški fakultet, Sisak, 2012.
[29] B. S. Pijanowski, I. Mahmud, A Study of the Effects of Temperature and Oxygen Content on the Corrosion of Several Metals, Report 69-2, Cooperative Program in Ocean Engineering, Institute of Ocean Science and Engineering, The Catholic University of America, Washington, D. C., June 1969.
[30] S. Martinez, I. Štern, Korozija i zaštita-Eksperimentalne metode, HINUS, Zagreb, 1999.

ŽIVOTOPIS

OSOBNI PODACI:

Ime i prezime	Dario Mašinović
Datum i mjesto rođenja	18. 06. 1992. Banja Luka
Adresa	Andrije Kačića Miošića 19, 44 000 Sisak
Telefon	091 939 6710
E-mail:	dario.masinovic@hotmail.com

OBRAZOVANJE:

2007-2011	Prirodoslovno-matematička gimnazija, Gimnazija Sisak
2011-	Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet

RADNO ISKUSTVO:

2011.	Globalna hrana d.o.o. - Radnik
2015.	Grad Sisak – Dijeljenje letaka
2016.	Centrade Cheil – Promotor smartphonea
2016.	Euroherc osiguranje d.d. – Agent u Call centru Sisak

VJEŠTINE:

Rad na računalu	Dobro poznavanje operativnog sustava Windows i korištenje paketnog pograma MS Office, te rad u nekoliko programa za 2D i 3D modeliranje, poznavanje osnova C++
Strani jezik	Engleski, Njemački

ZNANSTVENO-ISTRAŽIVAČKA AKTIVNOST:

A. Begić Hadžipašić, Z. Zovko Brodarac, D. Mašinović, Utjecaj medija i mikrostrukture na brzinu korozije bakrene i aluminijske legure zavarene trenjem, Proceedings Book of 15th International Foundrymen Conference INNOVATION - The Foundation of Competitive Casting Production, (Ed. N. Dolić, Z. Zovko Brodarac), Opatija, University of Zagreb, Faculty of Metallurgy, 2016, 62-79

Znanstveni rad „Umjetno dobivanje safira“ – Tehnologijada 2012.

Znanstveni rad „Primjena termografije u istraživanju svojstava metala“ – Tehnologijada 2014.

Znanstveni rad „Određivanje deformacije metodom vizioplastičnosti“ – Tehnologijada 2015.