

# Jamičasta korozija Al-legure 6082

---

**Mezga, Izabela**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:097357>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-31**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Izabela Mezga**

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Vesna Alar, dipl. ing.

Student:

Izabela Mezga

Zagreb, 2022.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svojoj mentorici prof. dr. sc. Vesni Alar na pomoći i vodstvu pri izradi ovoga završnoga rada.

Zahvaljujem se djelatnicima Laboratorija za zaštitu materijala Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu na pruženoj pomoći pri provođenju eksperimentalnog dijela rada.

Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji na podršci tijekom cijelog studija.

Izabela Mezga



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 22 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Izabela Mezga**

JMBAG: **0035216813**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Jamičasta korozija Al-legure 6082**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Pitting corrosion of Al-alloy 6082**

Opis zadatka:

Aluminijske legure imaju dobra mehanička svojstva, međutim, kemijska svojstva su im slabija u odnosu na čisti aluminij. Legura oznake 6082 T6 ima visoku čvrstoću ali lošu korozivnu postojanost posebno kada je izložena jakim kiselinama i lužinama.

U teorijskom dijelu rada je potrebno opisati svojstva aluminijske legure, najvažnije značajke i područje uporabe.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je elektrokemijskim metodama ispitati ponašanje legure 6082 T6 u kiseljoj otopini dušične kiseline te u lužnatoj otopini NaOH pri 20 °C, u stacionarnim uvjetima. Analizirati rezultate, i dati zaključak.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2021.

Datum predaje rada:

1. rok: 24. 2. 2022.  
2. rok (izvanredni): 6. 7. 2022.  
3. rok: 22. 9. 2022.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 28. 2. - 4. 3. 2022.  
2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022.  
3. rok: 26. 9. - 30. 9. 2022.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Vesna Alar

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

## SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	I
POPIS SLIKA.....	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA.....	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY.....	VII
1. UVOD.....	1
2. OPĆA SVOJSTVA ALUMINIJA.....	2
2.1. Fizikalna svojstva.....	2
2.2. Mehanička svojstva.....	3
3. ALUMINIJSKE LEGURE.....	4
3.1. Označavanje aluminijskih legura.....	4
3.2. Al-Mg-Si legure (serija 6xxx).....	6
3.2.1. Legura 6082.....	6
3.3. Korozijsko ponašanje aluminijskih legura.....	6
3.3.1. Korozija „čistog“ aluminijske (serija 1xxx).....	8
3.3.2. Korozija serije 6xxx.....	9
4. JAMIČASTA KOROZIJA.....	10
5. ELEKTROKEMIJSKE METODE ISPITIVANJA KOROZIJE.....	12
5.1. Elektrokemijske metode ispitivanja korozije istosmjernom strujom.....	13
5.1.1. Određivanje potencijala otvorenog strujnog kruga, $E_{ok}$ .....	13
5.1.2. Određivanje polarizacijskog otpora, $R_p$ .....	14
5.1.3. Određivanje brzine korozije - Tafelova ekstrapolacija.....	14
5.1.4. Ciklička polarizacija.....	16
6. EKSPERIMENTALNI DIO.....	19
6.1. Fizikalno kemijska svojstva otopina.....	19
6.2. Priprema uzoraka za elektrokemijska DC ispitivanja.....	20
6.3. Elektrokemijska ispitivanja korozijske postojanosti u otopinama.....	20
6.3.1. Ispitivanje sklonosti uzorka Al6082 T6 općoj i jamičastoj koroziji.....	20
7. REZULTATI.....	22
7.1. Rezultati ispitivanja opće korozije.....	22

7.2. Rezultati ispitivanja jamičaste korozije.....	26
8. ZAKLJUČAK.....	29
LITERATURA .....	30

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Pourbaixov dijagram za aluminij.....	7
Slika 2. Mikrofotografija jamičaste korozije na leguri Al2024-T3 .....	10
Slika 3. Autokatalitički proces u jamici .....	11
Slika 4. Mogući pojava oblici jamica uzrokovani procesima korozije.....	11
Slika 5. Tipični raspored elektroda pri elektrokemijskim ispitivanjima.....	12
Slika 6. Određivanje polarizacijskog otpora.....	14
Slika 7. Princip Tafelove ekstrapolacije .....	16
Slika 8. Dijagram cikličke polarizacije za metal sklon pitingu .....	18
Slika 9. pH-metar-konduktometar .....	19
Slika 10. Uređaj za elektrokemijska ispitivanja, Potenciostat/Galvanostat .....	21
Slika 11. Elektrokemijska ćelija .....	21
Slika 12. Dijagram potencijala otvorenoga strujnoga kruga uzorka Al6082-T6 u elektrolitima..	22
Slika 13. Dijagram linearne polarizacije uzorka Al6082-T6 u elektrolitima.....	23
Slika 14. Dijagram Tafelove ekstrapolacije uzorka Al6082-T6 u elektrolitima.....	23
Slika 15. Izgled površine prije i poslije ispitivanja parametara opće korozije .....	25
Slika 16. Dijagram cikličke polarizacije uzorka Al6082-T6 u elektrolitima.....	26
Slika 17. Izgled površine prije i poslije ispitivanja cikličke polarizacije .....	28



**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Svojstva aluminija.....	3
Tablica 2. Označivanje aluminijских legura za gnječenje.....	4
Tablica 3. Oznake toplinske obrade za aluminijске legure.....	5
Tablica 4. Kemijski sastav legure 6082 .....	6
Tablica 5. Fizikalno kemijska svojstva elektrolita.....	20
Tablica 6. Korozijski parametri opće korozije uzorka Al6082-T6.....	24
Tablica 7. Rezultati cikličke polarizacije.....	26

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$E_{ok}, E_{kor}$	V	Potencijal otvorenog kruga
$E_{pit}$	V	Piting potencijal
$E_{zpit}$	V	Zaštitni potencijal za piting
$v_{kor}$	mm/god	Brzina korozije
$I_{kor}$	A	Jakost korozijske struje
$R_p$	$\Omega$	Polarizacijski otpor
$j_{kor}$	$A/m^2$	Gustoća korozijske struje
$j_o$	$A/m^2$	Gustoća struje izmjene
$A_p$	V	Apsolutni potencijal
$Rel$	V	Relativni potencijal
$\lambda$	S/m	Električna vodljivost
$TDS$	g/L	Količina otopljenih čvrstih tvari
ZKE	-	Zasićena kalomel elektroda

## **SAŽETAK**

Aluminijske legure pokazuju veliku sklonost koroziji kada su izložene kiselim i lužnatim otopinama.

U teorijskom dijelu rada opisana su svojstva aluminija i aluminijskih legura te područje uporabe. Iznesen je način označavanja aluminijskih legura te je detaljnije objašnjeno njihovo korozijsko ponašanje. Također, opisana je jamičasta korozija.

U eksperimentalnom dijelu rada istraživana je sklonost legure Al6082-T6 općoj i jamičastoj koroziji i to u kiseljoj otopini dušične kiseline (15% HNO<sub>3</sub>) i lužnatoj otopini natrijevog hidroksida (5% NaOH), sve pri 20 °C, u stacionarnim uvjetima. Korozijsko ponašanje ispitano je elektrokemijskim metodama koristeći polarizacijske tehnike.

Ključne riječi: aluminijske legure, korozija, elektrokemijske metode

## **SUMMARY**

Aluminum alloys show high susceptibility to corrosion when exposed to acidic and alkaline solutions.

The theoretical part of this paper describes the properties of aluminum and aluminum alloys and the area of application. Aluminum alloy designation system is presented and their corrosion behavior is explained in more detail. Pitting corrosion is also described in more details.

In the experimental part of the paper, the susceptibility of Al6082-T6 alloy to uniform and pitting corrosion in acidic nitric acid solution (15% HNO<sub>3</sub>) and alkaline sodium hydroxide solution (5% NaOH) was investigated, all at 20 °C, under stationary conditions. Corrosion behavior was tested by electrochemical methods using polarization techniques.

Key words: aluminum alloys, corrosion, electrochemical methods

## 1. UVOD

Korozija se može opisati kao postepena degradacija materijala (obično metala) kemijskom i/ili elektrokemijskom reakcijom s okolinom. Pojava korozije nije samo stvorila razne probleme za svakodnevni život, nego također ima ogroman ekonomski i ekološki utjecaj na gotovo sve aspekte svjetske infrastrukture, od autocesta, mostova i zgrada do nafte i plina. Jedan od čestih pojavnih oblika korozije je jamičasta korozija (pitting), koja predstavlja lokalizirani oblik korozije, a očituje se pojavom jamica na površini ili unutar materijala. Pitting se smatra opasnijim od opće korozije jer je male jamice teže otkriti i predvidjeti. Mala, uska jamica s minimalnim gubitkom materijala može dovesti do propasti cijelog inženjerskog sustava.

Aluminijske legure imaju široku industrijsku primjenu posebno u automobilske i zrakoplovnoj industriji, a također i u prehrambenoj industriji te građevinarstvu. U ovom radu promatrana je aluminijska legura iz serije 6000, što podrazumijeva da je aluminij legiran magnezijem i silicijem. Zbog ekonomskog i političkog pritiska za smanjenjem potrošnje goriva i emisije CO<sub>2</sub> teški čelični dijelovi automobila zamjenjuju se lakim aluminijskim, često Al-Mg-Si legurama. Legure Al-Mg-Si sve se više koriste za izradu karoserija automobila zamjenjujući tako teže metale.

U ovom radu istraživano je ponašanje aluminijske legure Al6082-T6 u jako kiseloj i lužnatoj otopini s ciljem predviđanja sklonosti materijala prema općoj i jamičastoj koroziji.

## 2. OPĆA SVOJSTVA ALUMINIJA

### 2.1. Fizikalna svojstva

Zbog svojih svojstava aluminij je jedan od najsvestranijih, najekonomičnijih i najatraktivnijih metalnih materijala koji svoju primjenu pronalazi u različitim područjima – od mekane, visoko duktilne folije koja se koristi u kućanstvu pa sve do složenih inženjerskih primjena. Aluminij je također drugi najčešće korišteni konstrukcijski materijal, nakon čelika [1].

Aluminij ima gustoću od samo  $2,7 \text{ g/cm}^3$  što je skoro tri puta manje od gustoće čelika ( $7,83 \text{ g/cm}^3$ ) [2]. Dakle, konstrukcije od aluminijske će za isti volumen biti skoro tri puta lakše od konstrukcija izrađenih od čeličnih materijala. Tako mala težina, u kombinaciji s visokom čvrstoćom nekih aluminijskih legura omogućuje projektiranje i izgradnju jakih i laganih konstrukcija što je posebno korisno kod izgradnje svega što se pokreće – svemirska vozila i zrakoplovi, kao i sve vrste kopnenih i vodenih vozila.

Aluminij je otporan na vrstu progresivne oksidacije koja uzrokuje hrđanje čelika. Izložena površina aluminijska s kisikom stvara tanki inertni film od aluminijskog oksida, koji materijal štiti od daljnje oksidacije. Također, za razliku od željezne hrđe film od aluminijskog oksida se ne ljušti te se površina ispod oksida ne izlaže oksidaciji. Ako se zaštitni film izgrebe, on se vrlo brzo ponovno stvori te i dalje štiti materijal. Taj tanki oksidni sloj čvrsto prianja uz metal te je bezbojan i proziran – nevidljiv golom oku [2].

Aluminij obično pokazuje izvrsnu električnu i toplinsku vodljivost te se zajedno s bakrom koristi kao električni vodič. Iako je vodljivost najčešće korištene vodljive legure (oznake 1350) samo oko 62% od vodljivosti bakra, ona je težine oko 33% težine bakra i stoga može provesti dvostruko više električne energije u usporedbi s bakrom iste težine. Toplinska vodljivost aluminijska je oko tri puta veća od čelika. To čini aluminij važim materijalom u područjima hlađenja i grijanja npr. izmjenjivači topline. U kombinaciji s time što je netoksičan, vrlo se često koristi za izradu kuhinjskog posuđa. Aluminij nije feromagnetski materijal što je važno svojstvo u električnoj i elektroničkoj industriji. Također je nepiroforan materijal što je važno kod primjena koje uključuju rukovanje zapaljivim ili eksplozivnim materijalima [2].

## 2.2. Mehanička svojstva

Čisti aluminij nema veliku vlačnu čvrstoću. Međutim, dodavanjem legirajućih elemenata poput mangana, silicija, bakra i magnezija može se povećati čvrstoća aluminija i proizvesti legura s odgovarajućim svojstvima za zadanu primjenu. Vlačna čvrstoća čistog aluminija je oko 90 MPa, ali se može povećati na preko 690 MPa za neke toplinski obrađene legure. Aluminij je dobro prikladan za hladna okruženja. Ima prednost u odnosu na čelik zato jer se njegova vlačna čvrstoća povećava s padom temperature, a zadržava svoju žilavost. Čelik pak s druge strane, postaje lomljiv na niskim temperaturama [1].

Lakoća s kojom se aluminij može preraditi u bilo koji oblik jedno je od njegovih najbitnijih svojstava. Izrazito je livljiv te se može lijevati svim poznatim metodama. Aluminijski lim najčešće se oblikuje postupcima štancanja, dubokog vučenja i valjanja. Valjati se može do željene debljine pa se tako izrađuju aluminijske folije tanje od papira. Također, pogodan je za kovanje, sa i bez ukovnja. Aluminijaska žica, dobivena vučenjem iz valjane šipke može biti upletena u kabel bilo koje veličine ili tipa. Gotovo da nema ograničenja za različite profile (oblike) koji se mogu dobiti ekstrudiranjem aluminija.

U tablici 1. prikazana su neka od fizikalnih i mehaničkih svojstava aluminija.

**Tablica 1. Svojstva aluminija**

Svojstvo	Vrijednost
Kristalna rešetka	FCC
Talište (°C)	660,2
Koeficijent toplinske vodljivosti (0-100 °C) ( $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	238,5
Koeficijent linearnog istezanja (0-100 °C) ( $*10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	23,5
Gustoća ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2,6898
Modul elastičnosti (GPa)	68,3

### 3. ALUMINIJSKE LEGURE

Komercijalno čisti aluminij sadrži minimalno 99% aluminija te je, kako je već navedeno, mekan i duktilan metal koji se koristi za mnoge primjene gdje visoka čvrstoća nije potrebna. Aluminijske legure, s druge strane, imaju bolja svojstva livljivosti, obradivosti i oblikovljivosti te općenito bolja mehanička svojstva od čistog metala pa stoga pronalaze širu primjenu.

Aluminijske legure dijele se na dvije glavne kategorije: kovane (gnječene) i lijevane legure.

#### 3.1. Označavanje aluminijskih legura

Kovani aluminij i kovane (gnječene) aluminijske legure označavaju se četveroznamenkastim sustavom koji je nastao u SAD-u i danas je široko prihvaćen. Prva znamenka označava skupinu legure prema glavnom legirajućem elementu kako slijedi u tablici 2. i često se koristi za opisivanje serija legura aluminija. Osim u slučaju komercijalno čistih aluminijskih legura, posljednje tri znamenke su proizvoljne i jednostavno identificiraju specifičnu leguru. U slučaju čistog aluminija, posljednje dvije znamenke označavaju postotak aluminija u proizvodu npr. legura oznake 1098 sadrži 99,98% aluminija. Druga znamenka označava modifikacije u odnosu na izvornu leguru. Postoji preko 300 gnječenih legura od kojih je oko 50 u uobičajenoj upotrebi.

**Tablica 2. Označivanje aluminijskih legura za gnječenje**

Legirni element	Oznaka serije
Čisti aluminij, 99%+	1xxx
Bakar	2xxx
Mangan	3xxx
Silicij	4xxx
Magnezij	5xxx
Magnezij + silicij	6xxx
Cink	7xxx
Ostali elementi npr. litij, željezo	8xxx
Nije u upotrebi	9xxx



Lijevani aluminij i lijevane aluminijske legure također se označavaju četveroznamenkastim brojem, ali s točkom između zadnje dvije znamenke. Prva znamenka kao i kod gnječanih legura označava glavni legirni element (tablica 2.). Druge dvije znamenke identificiraju aluminijsku leguru ili označavaju čistoću aluminijske u slučaju serije 1xx.x. Posljednja znamenka označava je li proizvod u obliku odljevka (oznaka 0) ili se radi o ingotu (oznaka 1 ili 2). Slovo ispred oznake označava stupanj čistoće ili prisutnost sekundarnog legirnog elementa. Npr., Axxx.0 označuje viši stupanj čistoće u odnosu na izvornu leguru xxx.0.

Iza oznake legure slijedi oznaka stanja odvojena crticom. Sustav oznaka temelji se na mehaničkim i/ili toplinskim obradama kojima se postižu određena metalurška stanja [3]. Osnovna stanja obrade označuju se velikim slovom F, O, H, W ili T. Legure u primarnom stanju nose oznaku F, one žarene O, rastvorno žarene legure koje nisu postigle stabilno stanje označuju se s W, a legure očvrstnute hladnom deformacijom s H. Ako je legura rastvorno žarena, gašena i potom dozrijevana, bilo prirodnim ili umjetnim putem, ona se označava sa T i brojem 1 do 10 koji pobliže opisuje specifičnosti provedenog postupka (tablica 3.)

**Tablica 3. Oznake toplinske obrade za aluminijske legure**

Oznaka	Opis toplinske obrade
T1	Hlađeno s povišene temperature preoblikovanja i prirodno dozrijevano.
T2	Hlađeno s povišene temperature preoblikovanja, hladno oblikovano (deformirano) i prirodno dozrijevano.
T3	Rastvorno žareno (homogenizirano), hladno oblikovano i prirodno dozrijevano.
T4	Rastvorno žareno i prirodno dozrijevano.
T5	Hlađeno s povišene temperature preoblikovanja i umjetno dozrijevano.
T6	Rastvorno žareno i umjetno dozrijevano.
T7	Rastvorno žareno i predozrijevano.
T8	Rastvorno žareno, hladno oblikovano i umjetno dozrijevano.
T9	Rastvorno žareno, umjetno dozrijevano i hladno oblikovano.
T10	Hlađeno s povišene temperature preoblikovanja, hladno oblikovano i umjetno dozrijevano.

### 3.2. Al-Mg-Si legure (serija 6xxx)

Legure iz serije 6xxx sadrže silicij i magnezij u omjerima potrebnim za stvaranje magnezijevog silicida ( $Mg_2Si$ ). Magnezijev silicid je intermetalna faza koja se dozrijevanjem izlučuje u  $\alpha$ -Al matrici i povećava granicu tečenja. Iako nemaju veliku čvrstoću kao legure iz serija 2xxx i 7xxx posjeduju svojstva dobre oblikovljivosti, zavarljivosti, obradivosti i otpornosti na koroziju. Primjena Al-Mg-Si legura uključuje arhitektonske primjene, izradu okvira bicikala, transportne opreme, mosnih ograda i zavarenih konstrukcija [4].

#### 3.2.1. Legura 6082

Aluminijska legura 6082 je legura srednje čvrstoće sa relativno dobrom otpornošću na koroziju. 6082-T6 aluminijska legura obrađena je T6 postupkom toplinske obrade. To podrazumijeva da se materijal najprije rastvorno žari, gasi, a zatim umjetno dozrijeva dok ne ispuni standardne zahtjeve na mehanička svojstva. Ima drugu najveću čvrstoću u usporedbi s ostalim varijantama 6082 aluminijske [5]. Kemijski sastav legure prikazan je u tablici 4 [6].

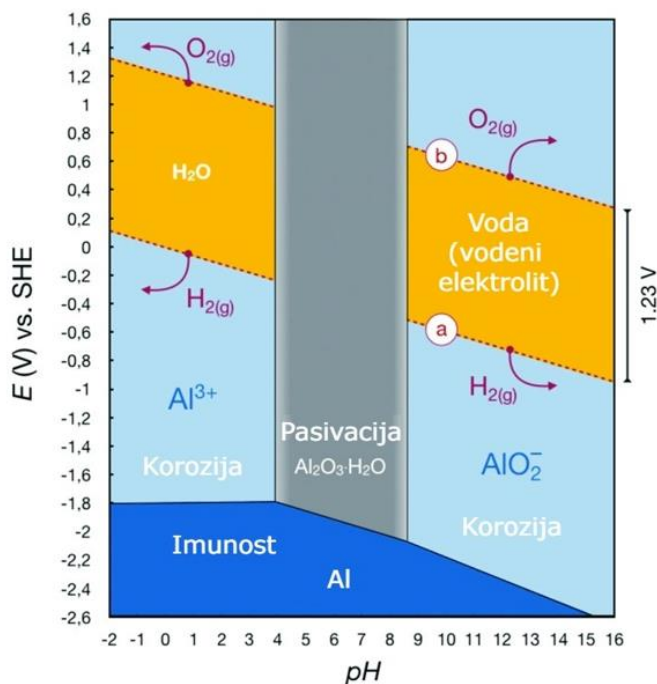
**Tablica 4. Kemijski sastav legure 6082**

Kemijski element	Maseni udio (%)
Aluminij (Al)	95,2 - 98,3
Silicij (Si)	0,7 – 1,3
Magnezij (Mg)	0,6 – 1,2
Mangan (Mn)	0,4 – 1,0
Željezo (Fe)	0 – 0,5
Krom (Cr)	0 – 0,25
Cink (Zn)	0 – 0,2
Titan (Ti)	0 – 0,1
Bakar (Cu)	0 – 0,1
Ostali	0 – 0,15

### 3.3. Korozijsko ponašanje aluminijskih legura

Kao što pokazuje njegov položaj u elektromotornoj seriji, aluminij je termodinamički reaktivan metal, od konstrukcijskih metala samo su magnezij i berilij reaktivniji. Zahvaljujući

zaštitnom djelovanju oksidnog filma koji stvara aluminij, ne dolazi do stvaranja hrđe kao kod željeza i sprječava se daljnja korozija. Debljina tog površinskog filma formiranog u dodiru sa zrakom na temperaturi okoline je samo oko 5 nm [2]. Ako je oštećen, ovaj tanki film se odmah ponovno formira u većini okruženja i nastavlja štiti aluminij od korozije. Ako je film uklonjen ili oštećen u takvim uvjetima da se ne može sam ponovno stvoriti, dolazi do korozije. Uvjeti termodinamičke stabilnosti oksidnog filma izraženi su s Pourbaixovim dijagramom prikazanim na slici 1. Kao što pokazuje dijagram, aluminij je pasivan (zaštićen je svojim oksidnim filmom) u pH području od 3,9 do 8,5. Granice ovog raspona, međutim, variraju s temperaturom, sa specifičnim oblikom prisutnog oksidnog filma i s prisutnošću tvari koje mogu tvoriti topive komplekse ili netopive soli s aluminijem. Izvan granica svog pasivnog raspona, aluminij korodira u vodenim otopinama jer su njegovi oksidi topljivi u mnogim kiselinama i lužinama, dajući  $\text{Al}^{3+}$  ione u kiselinama i  $\text{AlO}_2^-$  ione u lužinama. Međutim, postoje slučajevi kada se korozija ne javlja izvan pasivnog raspona npr. kada je oksidni film netopiv ili kada se film održava oksidirajućom prirodom otopine [7].



Slika 1. Pourbaixov dijagram za aluminij [8]

Pri nižim i višim pH vrijednostima, aluminij ima veću vjerojatnost da korodira, ali to ovisi o koncentraciji otopina. Npr. aluminij je prilično otporan na koncentriranu dušičnu kiselinu. Kod lužnatih uvjeta, ako dođe do lokalnog oštećenja oksidnog filma, aluminij je napadnut brže od njegovog oksida. Rezultat je jamičasta korozija. U kiselim uvjetima, oksidni film je brže napadnut od aluminijskog oksida. Stoga, uvjeti koji potiču koroziju aluminijske legure su oni koji kontinuirano mehanički razaraju zaštitni film ili potiču uvjete koji lokalno razgrađuju film i minimiziraju mogućnost kisika da ga ponovo izgradi. Dakle, kiselost ili lužnatost okoliša značajno utječe na korozijsko ponašanje aluminijskih legura [9].

Otpornost aluminijske legure na koroziju ovisi i o unutrašnjim (metalurškim) i vanjskim (okolišnim) čimbenicima. Metalurški čimbenici koje utječu na koroziju su sastav legure, toplinska obrada (oznake stanja) i proces obrade (oblikovanja). Oni određuju mikrostrukturu materijala o kojoj pak ovisi hoće li se pojaviti lokalna korozija i u kojem obliku.

Od vanjskih čimbenika na koroziju utječu i kemijski i fizikalni čimbenici. Utjecaj kemijskih čimbenika ovisi o sastavu okoliša te prisutnosti nečistoća npr. iona teških metala. Fizikalni čimbenici su temperatura, tlak, mehanička djelovanja, brzina gibanja i turbulencija medija. Drugi fizikalni čimbenik koji može uzrokovati koroziju aluminijske legure je prisutnost lutajućih električnih struja (izmjeničnih ili istosmjernih).

Opća korozija aluminijske legure je rijetka osim u posebnim slučajevima (jake kiseline ili lužine). Međutim, ako je površinski oksidni film topiv u okolišu kao npr. u fosfornoj kiselini ili natrijevom hidroksidu aluminij se počinje otapati.

### **3.3.1. Korozija „čistog“ aluminijske legure (serija 1xxx)**

Čisti aluminij (99% i čišći) otporniji je na koroziju od bilo koje aluminijske legure. Brzo otapanje se javlja u jako kiselim ili lužnatim otopinama, ali u oksidno stabilnom području (pH 3,9-8,5) aluminij je sklon samo stvaranju mrlja od vode na površini i lokaliziranoj jamičastoj koroziji. Čisti aluminij ne pogađaju drastičniji oblici korozije poput napetostne i interkristalne korozije [2].

Otpornost na koroziju svih legura serije 1xxx je vrlo visoka, ali pri određenim uvjetima se blago smanjuje s povećanjem sadržaja legiranih elemenata. Željezo, silicij i bakar su prisutni u najvećim količinama. Bakar i dio silicija se nalaze u čvrstoj otopini, a željezo ili željezo i silicij tvore čestice sekundarne faze ( $Al_6Fe$ ,  $Al_3Fe$ ,  $Al_{12}Fe_3Si_2$ ) koje se ponašaju kao katoda prema

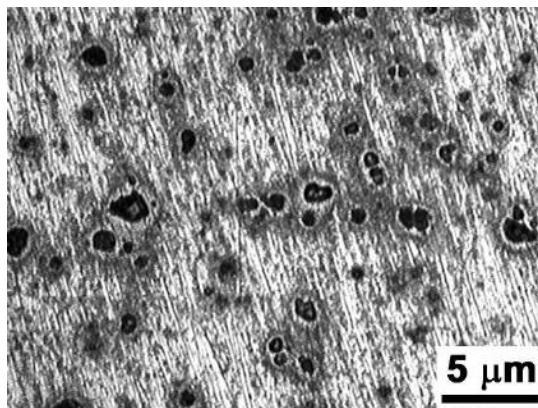
aluminijevoj matrici. Kada su te čestice prisutne na površini, oksidni film preko njih je tanak ili nepostojeći pa dolazi do jamičaste korozije [2].

### **3.3.2. Korozija serije 6xxx**

Kada je sadržaj magnezija i silicija u leguri 6xxx uravnotežen (proporcionalno stvaranju samo  $Mg_2Si$ ), smanjuje se mogućnost pojave korozije. Odgovarajući omjer za  $Mg_2Si$  je  $Mg/Si = 1,73$ , ali to je nemoguće postići s uobičajenim radnim tolerancijama; stoga većina legura ima višak magnezija ili silicija. Višak magnezija dovodi do bolje otpornosti na koroziju, ali niže čvrstoće i mogućnosti oblikovanja. Višak silicija rezultira većom čvrstoćom bez gubitka formabilnosti i zavarljivosti, ali se povećava sklonost legure interkristalnoj koroziji [10].

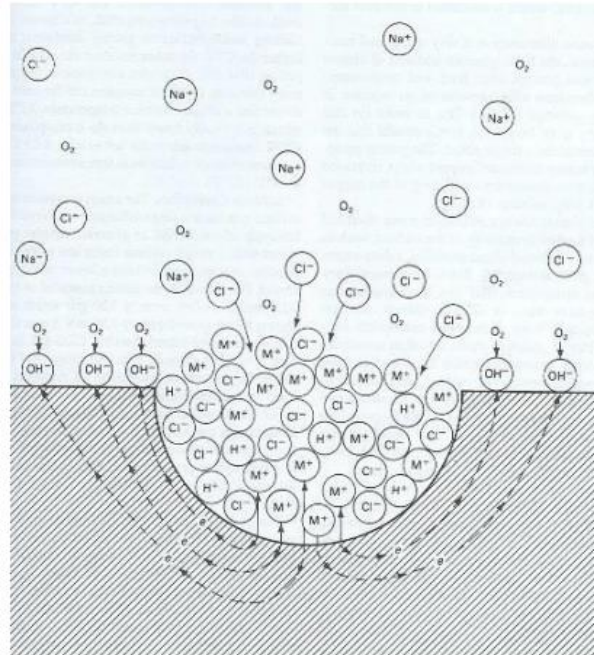
## 4. JAMIČASTA KOROZIJA

Jamičasta korozija (eng. pitting) je elektrokemijski oksidacijsko-redukcijski (redoks) proces koji je uzrokovan lokalnom depasivacijom metala koji su uobičajeno u pasivnom stanju (Aluminij, nehrđajući čelici itd.). Očituje se pojavom lokaliziranih jamica na površini metala.

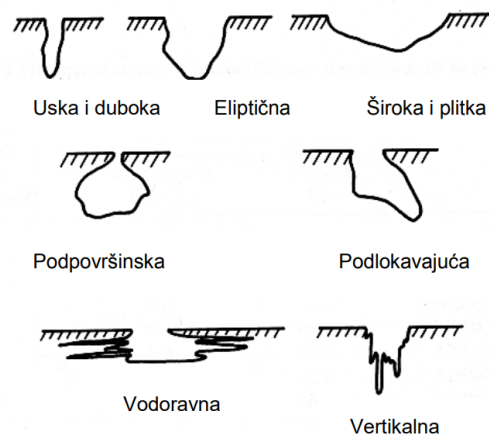


**Slika 2. Mikrofotografija jamičaste korozije na leguri Al2024-T3 [11]**

Kloridni ioni u vodenim otopinama specifičan su agresivni čimbenik koji često uzrokuje jamičastu koroziju, a slično negativno djelovanje imaju i ostali halogenidni ioni ( $\text{Br}^-$ ,  $\text{F}^-$ ) koji dovode do razaranja pasivnog filma. Jamičasta korozija smatra se autokatalitičkim procesom - nakon što se jamica formira i počne proces korozije koji je usko koncentriran u području jamice, medij unutar jamice postaje osiromašen katodnim reaktantima (npr. otopljenim kisikom) te obogaćen metalnim kationima i kloridima. Također, unutar jamice znatno se snizuje pH vrijednost. Tako nastali kloridni medij vrlo je agresivan, sprečava repasivaciju i potiče daljnju propagaciju jamice što je shematski prikazano na slici 3. Jednom inicirana korozijska jamica daljnjim autokatalitičkim procesima samo napreduje u dubinu materijala poprimajući jedan od oblika prikazanih na slici 4. [12].



Slika 3. Autokatalitički proces u jamici [12]



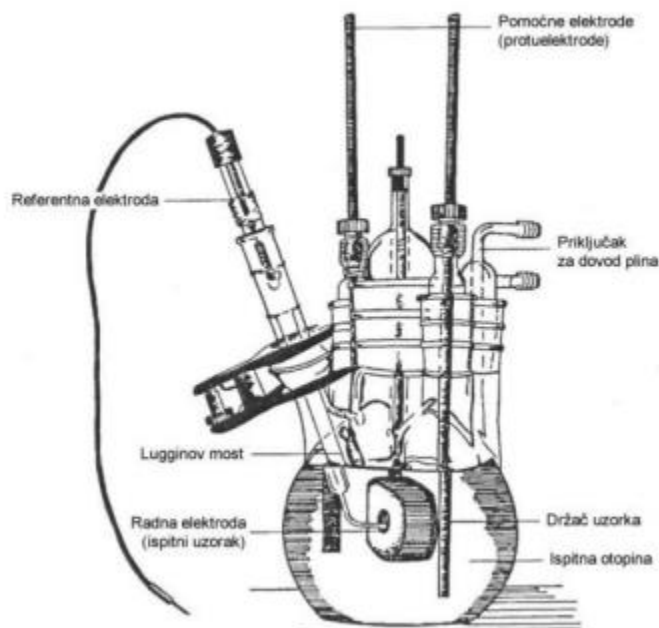
Slika 4. Mogući pojavni oblici jamica uzrokovani procesima korozije [13]

Jamičasta korozija je povezana s aktivno-pasivnim legurama i javlja se pod uvjetima koji su specifični za svaku leguru i okoliš.

## 5. ELEKTROKEMIJSKE METODE ISPITIVANJA KOROZIJE

Korozija najčešće nastaje elektrokemijskom reakcijom u kojoj se anoda (pozitivna elektroda) oksidira (gubi elektrone), a katoda (negativna elektroda) kemijski reducira (prima elektrone). Stoga je moguće procijeniti korozijske karakteristike provođenjem elektrokemijskog ispitivanja.

Elektrokemijska mjerenja provode se u elektrokemijskoj ćeliji čija je shema prikazana na slici 5. Sastoji se od tri elektrode spojene na potenciostat. Ukoliko se elektrolitički vodljiva površina konstrukcijskog materijala spoji s ostalim elementima strujnog kruga, te se uroni u vodljivu otopinu (elektrolit), dobiva se istraživani uzorak koji se naziva radnom elektrodom. Elektroda od platine ili grafita se upotrebljava kao protuelektroda i ona je zapravo vodič kojim se zatvara strujni krug. Treća elektroda je referentna ( $\text{Hg}/\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ ,  $\text{Ag}/\text{AgCl}$ ,  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$  ili dr.). Potenciostat je uređaj koji vrlo precizno održava razliku potencijala između radne elektrode (metalnog uzorka) i referentne elektrode uronjene u otopinu. Slično, galvanostat održava konstantnu struju.



**Slika 5. Tipični raspored elektroda pri elektrokemijskim ispitivanjima [14]**

Kod elektrokemijskih ispitivanja prate se tri varijable: potencijal (napon), struja i vrijeme. Razlikuju se tehnike s [15]:



- Istosmjernom strujom (DC – tehnike)
- Izmjeničnom strujom (AC – tehnike)

U eksperimentalnom dijelu ovoga rada koristile su se tehnike s istosmjernom strujom, pa će one u nastavku biti detaljnije objašnjene.

### 5.1. Elektrokemijske metode ispitivanja korozije istosmjernom strujom

Kod elektrokemijskih ispitivanja procesa korozije DC – tehnikama upotrebljavaju se polarizacijske metode mjerenja. Karakteristika polarizacijskih mjerenja jest da se na sustav djeluje signalom izvana te se prati odziv sustava. Vrste polarizacija koje se mogu primijeniti su: galvanostatska, potenciostatska, galvanodinamička i potenciodinamička polarizacija. Kod galvanostatske polarizacije u elektrolitu se održava konstantna struja između radne i protuelektrode, a mjeri se napon odziva sustava. Na isti način, kod potenciostatske polarizacije održava se konstantna razlika potencijala, a mjeri se struja odziva sustava. Narinuti potencijal odnosno struju moguće je kontinuirano polako mijenjati i pratiti odziv, pa se u tom slučaju radi o potenciodinamičkoj i galvanodinamičkoj polarizaciji. Cilj ovakvih mjerenja je snimanje krivulja polarizacije struja-napon. Na temelju anodnih i katodnih krivulja dobiva se slika o korozijskom ponašanju određenog materijala u određenom mediju.

#### 5.1.1. Određivanje potencijala otvorenog strujnog kruga, $E_{ok}$

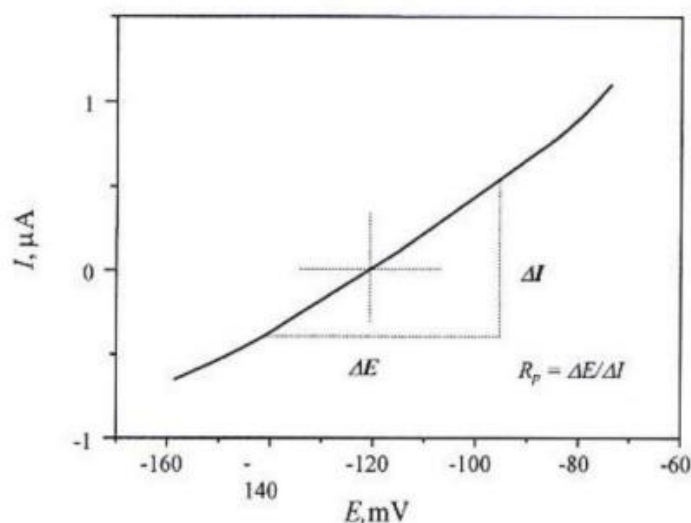
Prije početka polarizacijskog mjerenja potrebno je da se sustav metal-elektrolit stabilizira. To znači da se nakon uranjanja u elektrolit, električni krug između radne i protuelektrode pusti otvorenim, a razlika potencijala između referentne i radne elektrode se prati kao funkcija vremena. Nakon određenog vremena, uspostavlja se približno stacionarno stanje na nekoj vrijednosti potencijala, koji je jednak potencijalu otvorenog strujnog kruga  $E_{ok}$  ili korozijskom potencijalu  $E_{kor}$ . Na površini metala koji je uronjen u elektrolit uspostavlja se stacionarno stanje, anodna struja otapanja metala i katodna struja redukcije su istog iznosa, ali suprotnog smjera ( $I_a = I_k = I_{kor}$ ). Praćenjem promjena stacionarnoga potencijala otvorenoga strujnoga kruga  $E_{ok}$  u vremenu, moguće je dobiti podatak o korozijskom ponašanju ispitivanog uzorka u određenu mediju [15]:

- Pozitivne vrijednosti  $E_{ok}$  upućuju na stabilnost elektrode (imunost uzorka u ispitnoj vodenoj otopini)
- Negativne vrijednosti  $E_{ok}$  upućuju na nestabilnost odnosno na otapanje (koroziju)

- Ako se vrijednosti mijenjaju od negativnih prema pozitivnima, dolazi do spontane pasivacije

### 5.1.2. Određivanje polarizacijskog otpora, $R_p$

Polarizacijski otpor ( $R_p$ ) definira se kao otpor prolazu elektroaktivnih čestica iz jedne faze (metal ili legura) u drugu (elektrolit) i obrnuto [15]. Što je veća vrijednost polarizacijskog otpora, veća je otpornost materijala na medij u kojemu se nalazi. Slika 6. prikazuje postupak određivanja polarizacijskog otpora.



Slika 6. Određivanje polarizacijskog otpora [14]

### 5.1.3. Određivanje brzine korozije - Tafelova ekstrapolacija

Metoda Tafelove ekstrapolacije temelji se na Butler-Volmerovoj jednadžbi, temeljnoj jednadžbi elektrokemijske kinetike kojom je opisana ukupna struja koja prolazi kroz granicu faza na kojoj se zbivaju jedna anodna i jedna katodna reakcija, a koje nisu pod difuzijskom kontrolom [15]:

$$j = j_0 \left\{ \exp \left[ \frac{(1-\alpha) \cdot z \cdot F \cdot \eta}{RT} \right] - \exp \left[ \frac{-\alpha \cdot z \cdot F \cdot \eta}{RT} \right] \right\} \quad (1)$$

gdje je:

- $j$  gustoća struje [ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ]
- $j_0$  gustoća struje izmjene

- $F$  Faradayeva konstanta,  $F = 9,648 \cdot 10^4 \text{ C mol}^{-1} \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
- $R$  opća plinska konstanta,  $R = 8,314$
- $\eta$  prenapon,  $\eta = E - E_{kor}$
- $T$  termodinamička temperatura [K]
- $z$  broj elektrona
- $\alpha$  koeficijent prijenosa (vrijednost od 0 do 1)

Povećanjem prenapona usporava se reakcija redukcije, a ubrzava se reakcija oksidacije. Kad je prenapon tako velik da se struja redukcije može zanemariti, *Butler-Volmerova* jednadžba poprima sljedeći oblik [15]:

$$j = j_0 \left\{ \exp \left[ \frac{(1-\alpha)zF\eta}{RT} \right] \right\} \quad (2)$$

koja se logaritmiranjem prevodi u oblik:

$$\eta = \frac{-2,303RT}{zF(1-\alpha)} \log j_0 + \frac{-2,303RT}{zF(1-\alpha)} \log j \quad (3)$$

i može se pisati u sljedećem obliku (Tafelova jednadžba):

$$\eta = a + b \cdot \log j \quad (4)$$

gdje su:

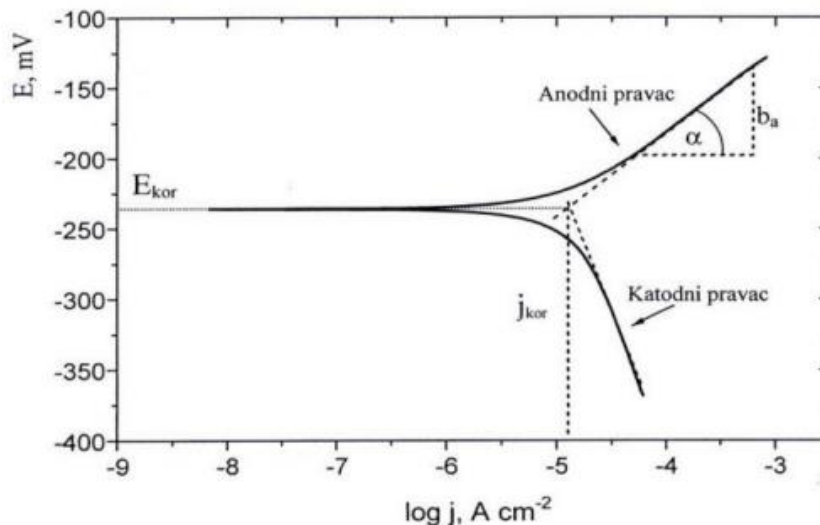
$$a_a = \frac{-2,303RT}{zF(1-\alpha)} \log j_0 - \text{odsječak na osi y anodnoga pravca}$$

$$a_k = \frac{2,303RT}{\alpha zF} \log j_0 - \text{odsječak na osi y katodnoga pravca}$$

$$b_a = \frac{2,303RT}{(1-\alpha)zF} - \text{nagib anodnoga Tafelova pravca}$$

$$b_k = \frac{2,303RT}{\alpha zF} - \text{nagib katodnoga Tafelova pravca}$$

Rezultati dobiveni anodnom i katodnom polarizacijom u širokom području potencijala u odnosu na korozijski potencijal ( $E = E_{kor} \pm 250 \text{ mV}$ ) prikazuju se grafički u polulogaritamskom obliku ( $E - \log j$ ). Ekstrapolacijom anodnih i katodnih Tafelovih pravaca u njihovu sjecištu određuju se vrijednosti gustoće korozijske struje  $j_{kor}$  i korozijskoga potencijala  $E_{kor}$  (slika 7.).



Slika 7. Princip Tafelove ekstrapolacije [14]

Iz određene vrijednosti gustoće korozijske struje  $j_{kor}$  ( $\mu\text{Acm}^{-2}$ ) te poznate ekvivalentne mase materijala  $EW$  i gustoće materijala  $\rho$  ( $\text{gcm}^{-3}$ ) izračunava se brzina korozije  $v_{kor}$  [ $\text{mmgod}$ ] prema jednadžbi [15]:

$$v_{kor} = \frac{3,3 \cdot 10^{-3} \cdot j_{kor} \cdot EW}{\rho} \quad (5)$$

#### 5.1.4. Ciklička polarizacija [14]

Ciklička polarizacija predstavlja dinamičku metodu elektrokemijskog ispitivanja korozije kojom se određuje tendencija prema nastanku jamičaste korozije (pitinga) u primijenjenoj korozivnoj sredini. Ovom metodom se mogu i uspoređivati i efekti zaštite metala od korozije, na primjer, inhibitorima.

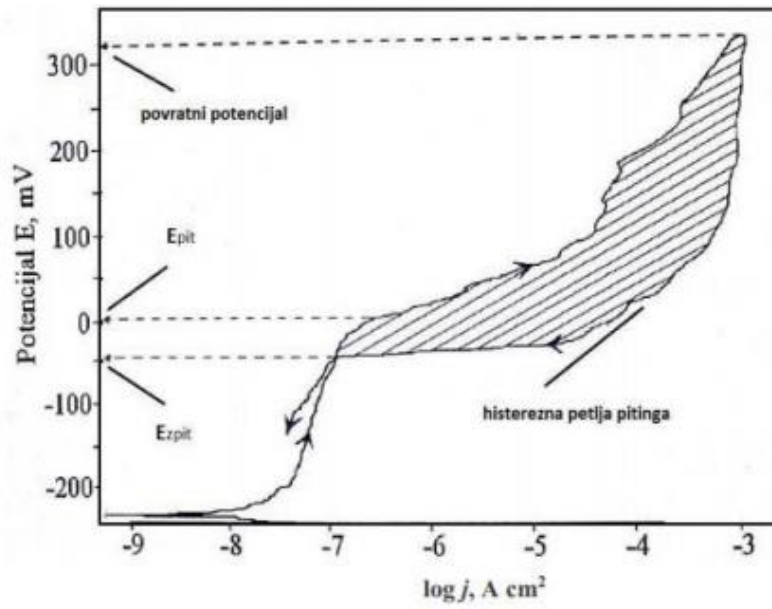
Eksperimentalno, metoda se izvodi tako što se potencijal uzorka kontinuirano kreće u anodnom pravcu dok se ne postigne određena jačina struje između radne i pomoćne elektrode, a zatim se prekidajući eksperiment, potencijal vraća u katodnom pravcu do kraja anodnog područja, što tada predstavlja područje kružnog kretanja potencijala. U dijagramu koji se dobije kao rezultat eksperimenta, prikazuje se odnos potencijala elektrode i logaritma neto struje koja protječe između radne elektrode (uzorka) i pomoćne elektrode.

Izgled dijagrama je karakterističan i na njemu se potencijal pitinga  $E_{pit}$  (ukoliko do pojave pitinga dolazi), raspoznaje po naglom skoku vrijednosti struje, koja se zapaža u fazi kretanja potencijala u anodnom pravcu. Pri kretanju potencijala u katodnom pravcu, ukoliko je pojava

pitinga evidentna, nastaje histerežno odstupanje vrijednosti struje u odnosu na anodni pravac, pri čemu se za iste vrijednosti potencijala, u povratnom smjeru javlja veća struja, što formira tzv. histerežnu petlju. Potencijal pri kojem se histerežna petlja zatvara (mjesto ponovnog izjednačavanja struja, tj. presjeka katodnog i anodnog pravca), predstavlja potencijal repasivacije ili, kako se još zove, zaštitni potencijal za piting koroziju,  $E_{zpit}$ . Pri potencijalima negativnijim od potencijala repasivacije, metalni materijal neće podleći piting koroziji u primjenjenoj sredini.

Izgled dijagrama cikličke polarizacije može biti različit u pogledu odnosa potencijala pitinga i potencijala repasivacije. Ukoliko su ova dva potencijala jednaka, tendencija ispitivanog uzorka u primijenjenom elektrolitu ka nastajanju piting korozije je mala. Ako je zaštitni potencijal ( $E_{zpit}$ ), pozitivniji od potencijala pitinga ( $E_{pit}$ ), tendencija ka pitu ne postoji. U slučaju da zaštitni potencijal ima negativniju vrijednost od potencijala pitinga, u primijenjenom elektrolitu će doći do pojave pitinga na ispitivanom uzorku. U ovom slučaju, grubo se može procijeniti da veće histerežno odstupanje na dijagramu cikličke polarizacije ukazuje veću sklonost ka piting koroziji uzorka u datom elektrolitu.

Dijagram cikličke polarizacije, pored procjene sklonosti ka piting koroziji, može biti korišten i za procjenu sklonosti uzorka prema drugim vrstama lokalne korozije. Na primjer, poznato je da najveći broj metalnih materijala koji su skloni piting koroziji, istu sklonost pokazuju i prema koroziji u procjepu. Pri potencijalima koji se nalaze između potencijala pitinga i potencijala repasivacije, piting korozija i korozija u procjepu će se razvijati (ukoliko je počela), ali novi pitovi neće nastajati. Ovo je značajan zaključak koji ukazuje da metalnim materijalima sklonima piting koroziji prije upotrebe u agresivnoj korozivnoj sredini površina mora biti pažljivo mehanički obrađena, tj. na njihovoj površini ne smije biti oštećenja, ogrebotina i rupica, jer bi ta mjesta bila potencijalne lokacije za razvitak piting korozije, odnosno korozije u procjepu. Slika 8. prikazuje eksperimentalno određeni dijagram cikličke polarizacije za metal sklon pitingu.



Slika 8. Dijagram cikličke polarizacije za metal sklon pitingu [14]

## 6. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni dio rada proveden je u Laboratoriju za zaštitu materijala Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Elektrokemijskim metodama ispitano je ponašanje legure Al6082 T6 u kiseloj otopini dušične kiseline (15% HNO<sub>3</sub>) te u lužnatoj otopini natrijevog hidroksida (5% NaOH) pri sobnoj temperaturi. Posebnim uređajem ispitana su fizikalno kemijska svojstva navedenih otopina, a zatim je snimanjem E-t krivulja određen potencijal otvorenog strujnog kruga  $E_{ok}$ , određen je polarizacijski otpor  $R_p$ , Tafelovom ekstrapolacijom određena je brzina korozije  $v_{kor}$ , a metodom cikličke polarizacije određena je sklonost materijala jamičastoj koroziji.

### 6.1. Fizikalno kemijska svojstva otopina

Ispitivanje fizikalno kemijskih svojstava otopina HNO<sub>3</sub> i NaOH provedeno je pomoću uređaja pH-metar-konduktometar Mettler Toledo SevenMulti S47-K, slika 9. Za mjerenje pH vrijednosti, apsolutnog i relativnog potencijala koristila se staklena indikatorska elektroda (par staklena/zasićena kalomel elektroda) InLab 413 pH, a za mjerenje elektrovodljivosti, saliniteta, ukupne količine otopljenih čvrstih tvari (TDS) i specifičnog otpora koristila se elektrokemijska ćelija InLab 730. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 5.



Slika 9. pH-metar-konduktometar

Tablica 5. Fizikalno kemijska svojstva elektrolita

Otopina	pH	Ap, mV	Rel, mV	$\lambda$ , mS/cm	TDS, g/l	Salinitet, ‰	Specifični otpor, $\Omega\text{cm}$	T, °C
15% HNO <sub>3</sub>	0,712	463,3	0,2	243	121,7	0	4,11	23,9
5 % NaOH	12,947	-277,6	-3,2	114,7	58,2	$8,333 \cdot 10^{-8}$	8,55	23,4

## 6.2. Priprema uzoraka za elektrokemijska DC ispitivanja

Uzorak za ispitivanje je najprije ručnom pilom odrezan na dimenziju  $\varnothing 16$  mm. Prije svakog ispitivanja uzorak je postepeno brušen brusnim papirima različitih granulacija, kako bi se dobila što čišća površina. Nakon toga uzorak je radi odmaščivanja opran destiliranom vodom i etanolom.

## 6.3. Elektrokemijska ispitivanja korozijske postojanosti u otopinama

Ispitivanja su provedena na:

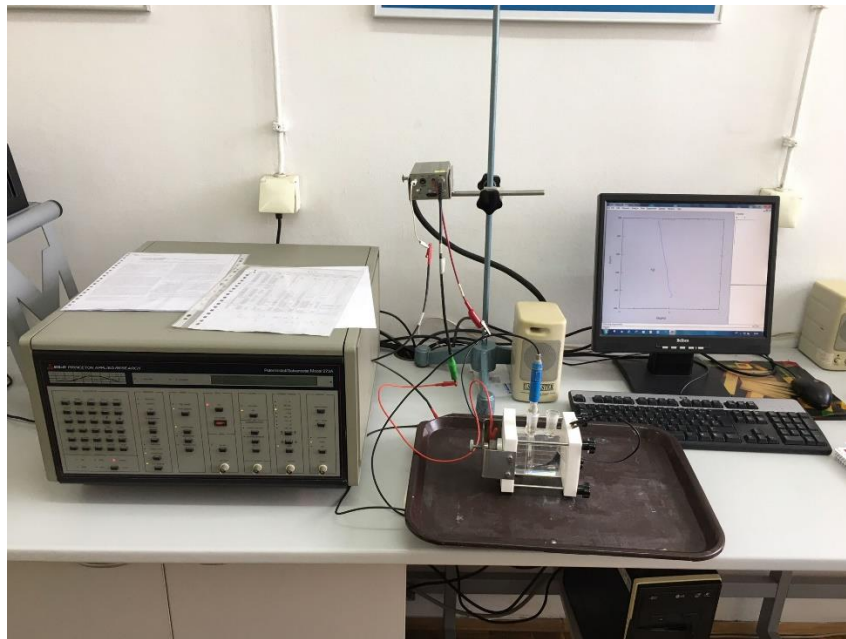
- uzorku Al6082 T6 u kiseloj otopini dušične kiseline (15% HNO<sub>3</sub>)
- uzorku Al6082 T6 u lužnatoj otopini natrijevog hidroksida (5% NaOH)

Sva ispitivanja su provedena pri 20 °C.

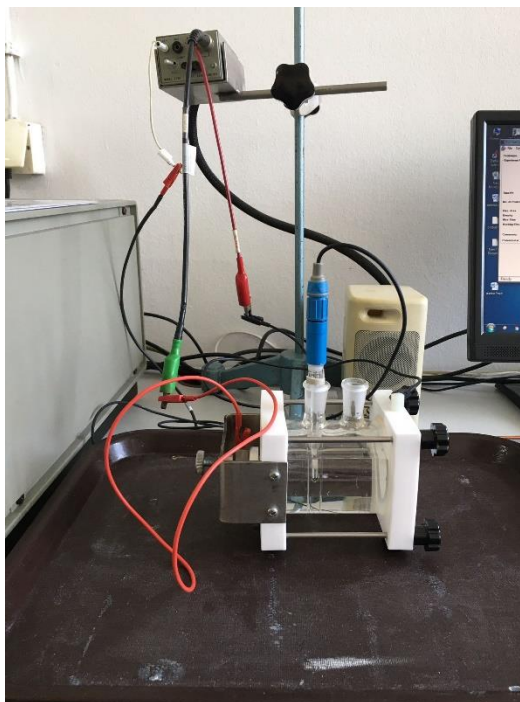
### 6.3.1. Ispitivanje sklonosti uzorka Al6082 T6 općoj i jamičastoj koroziji

Elektrokemijska ispitivanja su provedena u odnosu na referentnu zasićenu kalomel elektrodu (ZKE) čiji je standardni potencijal za 0,242 V pozitivniji od vodikove elektrode. Sva elektrokemijska mjerenja su se odvijala uporabom instrumenta Potenciostat/Galvanostat 273 A EG&E. Mjerenja su kontrolirana računalom preko programskog paketa SoftCor III, slike 10. i 11. Elektrokemijska ispitivanja obuhvaćala su ispitivanje parametara opće korozije i to: korozijskog potencijala ( $E_{kor}$ ), polarizacijskog otpor ( $R_p$ ) i brzinu korozije metala u zadanoj otopini ( $v_{kor}$ ). Na kraju, cikličkom polarizacijom ispitana je sklonost uzorka prema jamičastoj koroziji.





**Slika 10. Uređaj za elektrokemijska ispitivanja, Potenciostat/Galvanostat**

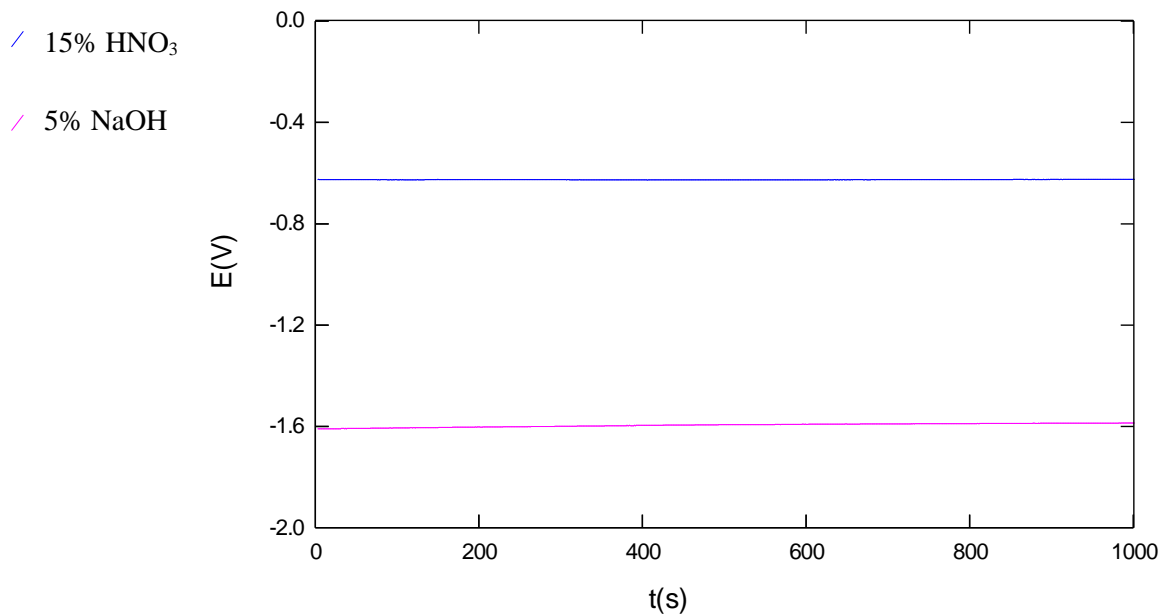


**Slika 11. Elektrokemijska ćelija**

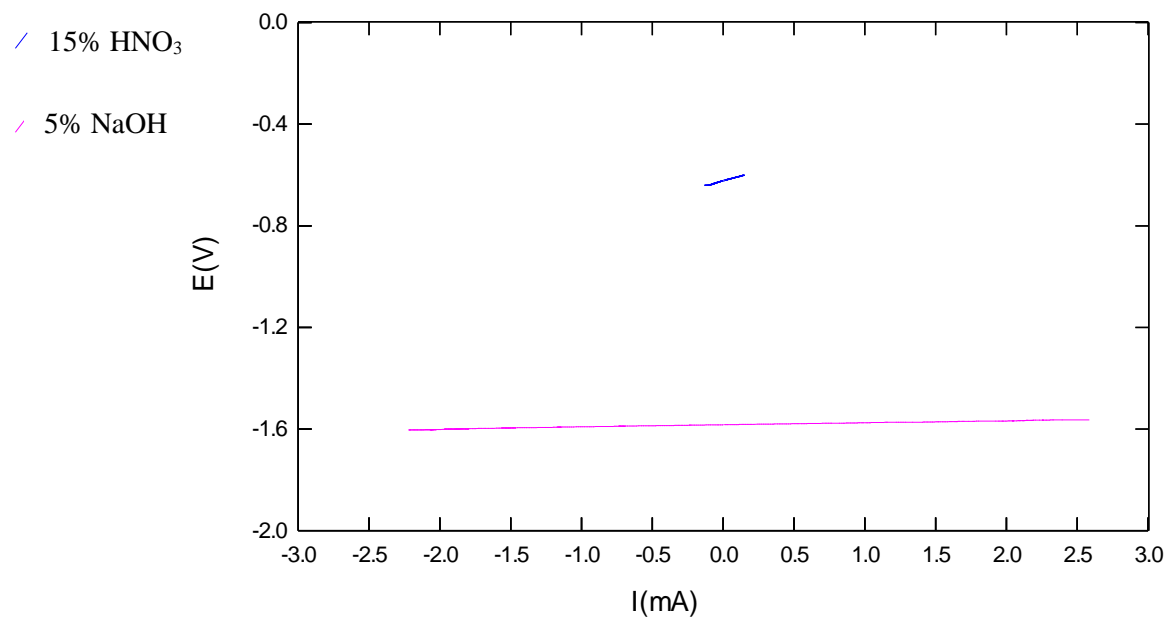
## 7. REZULTATI

### 7.1. Rezultati ispitivanja opće korozije

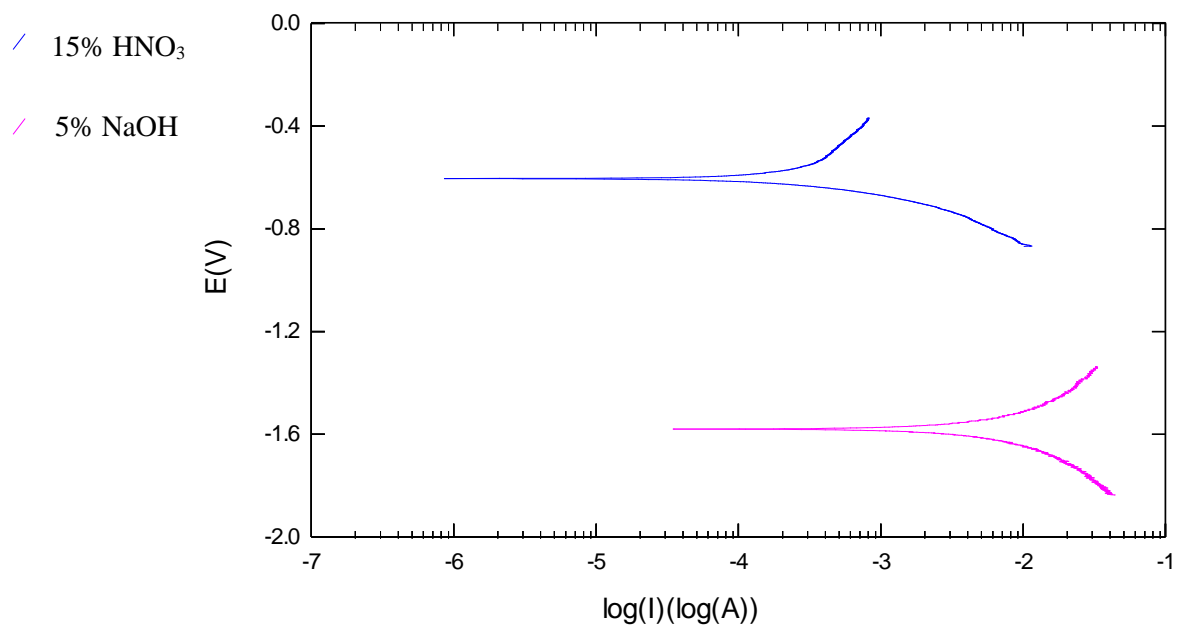
Rezultati provedenih elektrokemijskih ispitivanja parametara opće korozije prikazani su grafički na slikama 12., 13., 14. i u tablici 6.



Slika 12. Dijagram potencijala otvorenoga strujnoga kruga uzorka Al6082-T6 u elektrolitima



Slika 13. Dijagram linearne polarizacije uzorka Al6082-T6 u elektrolitima

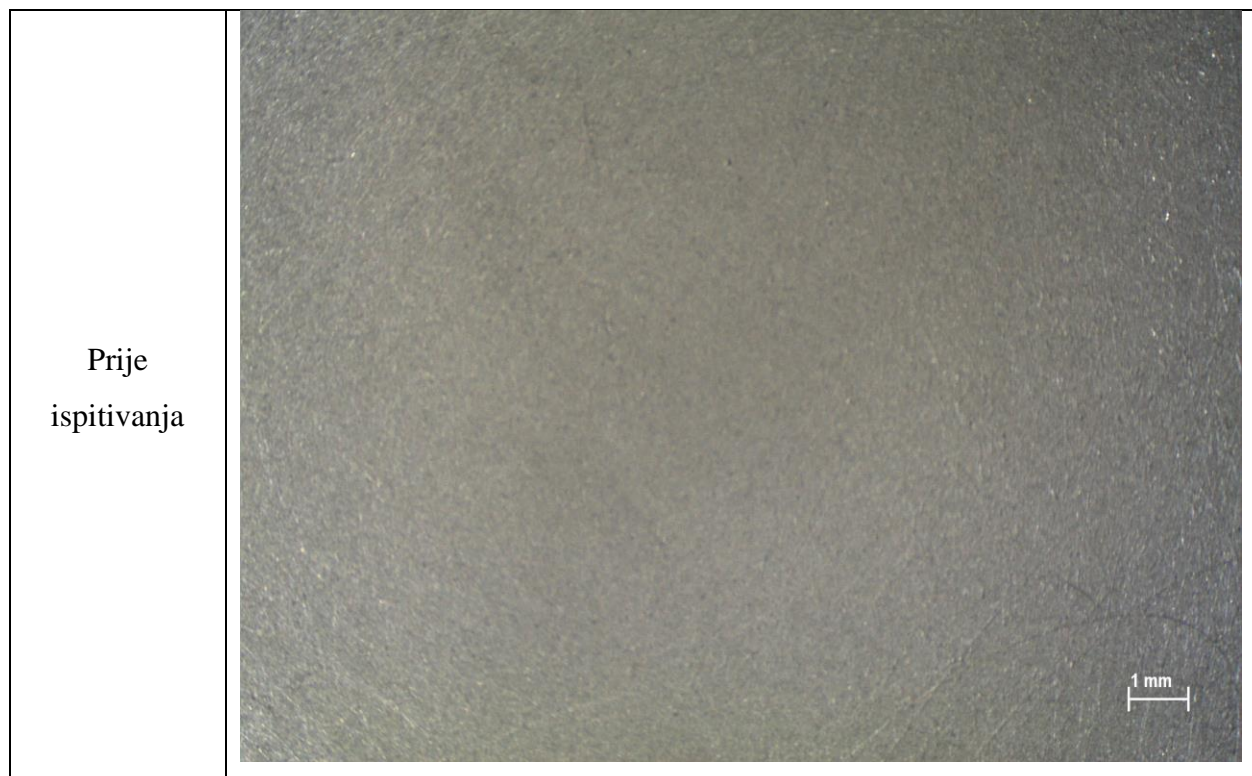


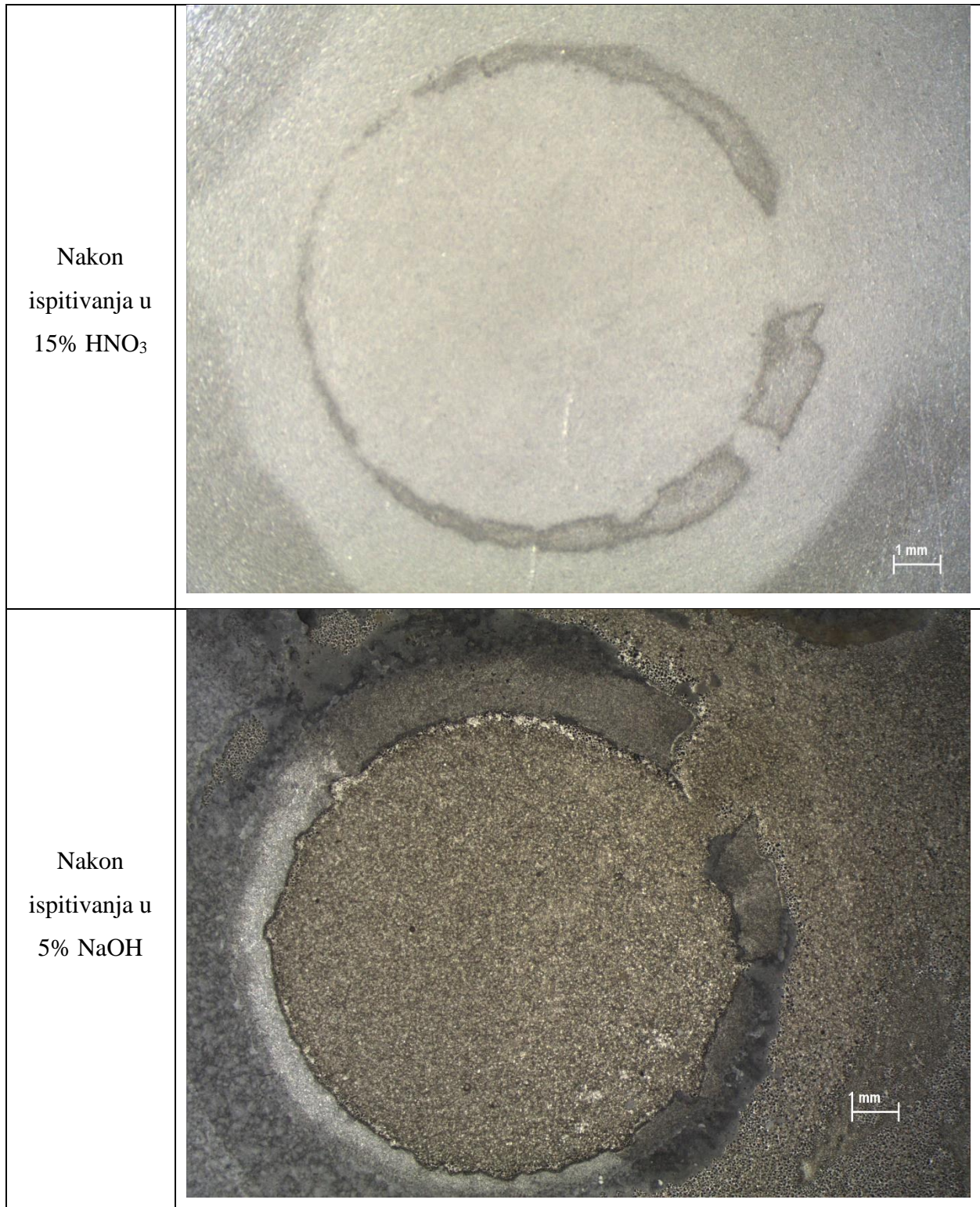
Slika 14. Dijagram Tafelove ekstrapolacije uzorka Al6082-T6 u elektrolitima

Tablica 6. Korozijski parametri opće korozije uzorka Al6082-T6

Medij	$E_{kor}$ vs ZKE, mV	$R_p$ , $\Omega$	$v_{kor}$ , mm/god	$j_{kor}$ , $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
15% $\text{HNO}_3$	-624	150,9	9,9	713,3
5% NaOH	-1580	8,188	105,5	7600

Na slici 15. dan je stereomikroskopski prikaz izgleda uzorka Al6082 prije i poslije ispitivanja sklonosti općoj koroziji pri 20 °C.



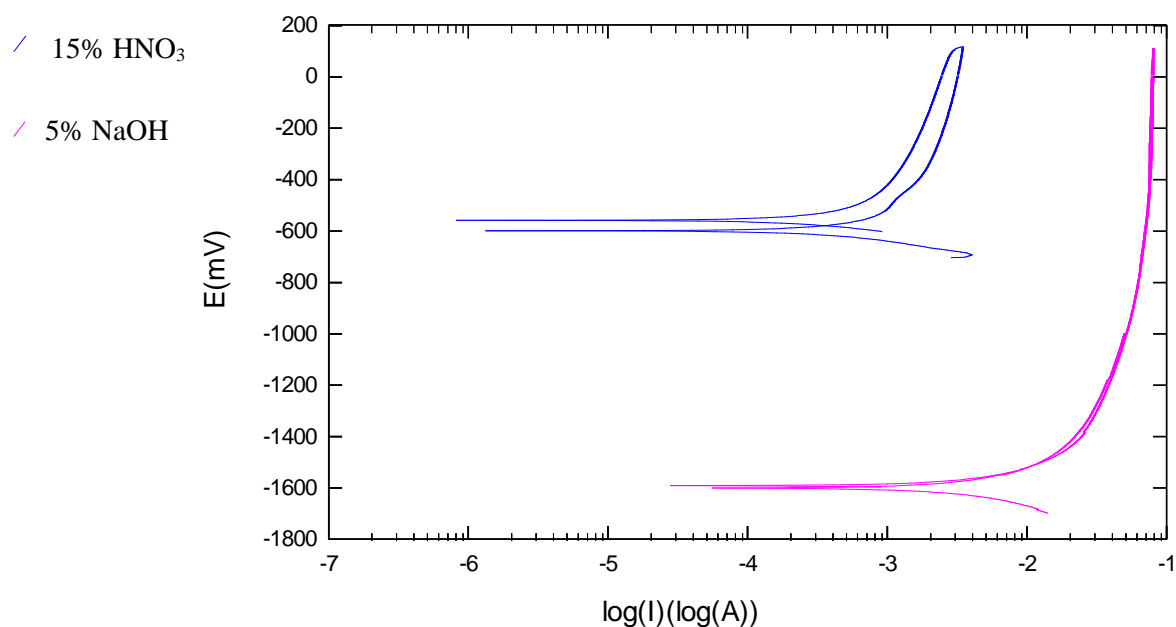


**Slika 15. Izgled površine prije i poslije ispitivanja parametara opće korozije**

Analiza rezultata prikazanih u tablici 6. ukazuje da je korozijski potencijal ( $E_{kor}$ ) u oba elektrolita negativan što upućuje na koroziju promatranog uzorka. Može se zaključiti da uzorak aluminijske legure Al6082-T6 pokazuje sklonost općoj koroziji u oba elektrolita. Pri izlaganju uzorka 5%-tnoj NaOH polarizacijski otpor je značajno manji, a brzina korozije značajno veća nego kad je uzorak izložen 15% HNO<sub>3</sub>.

## 7.2. Rezultati ispitivanja jamičaste korozije

Rezultati cikličke polarizacije prikazani su na slici 16. i u tablici 7.

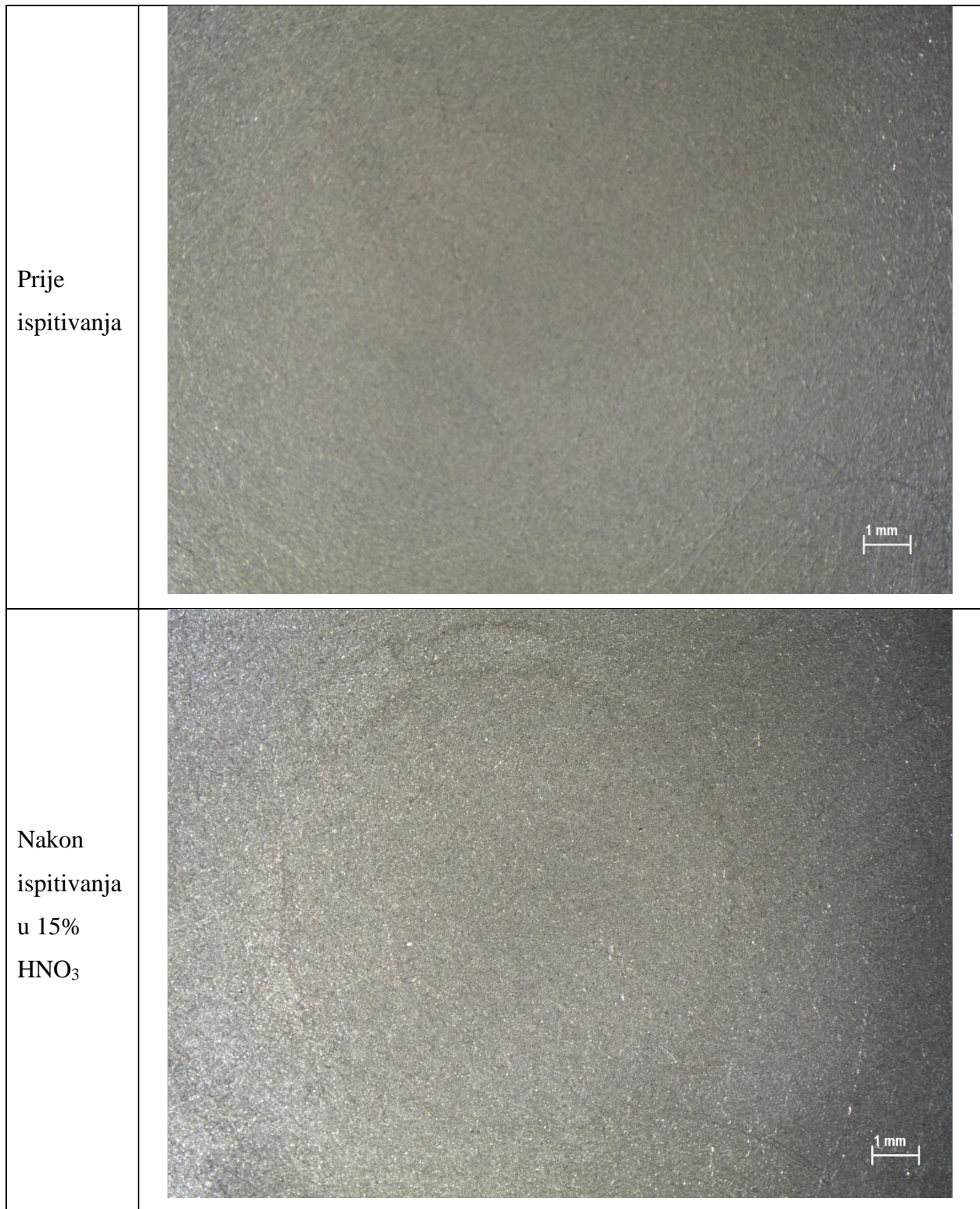


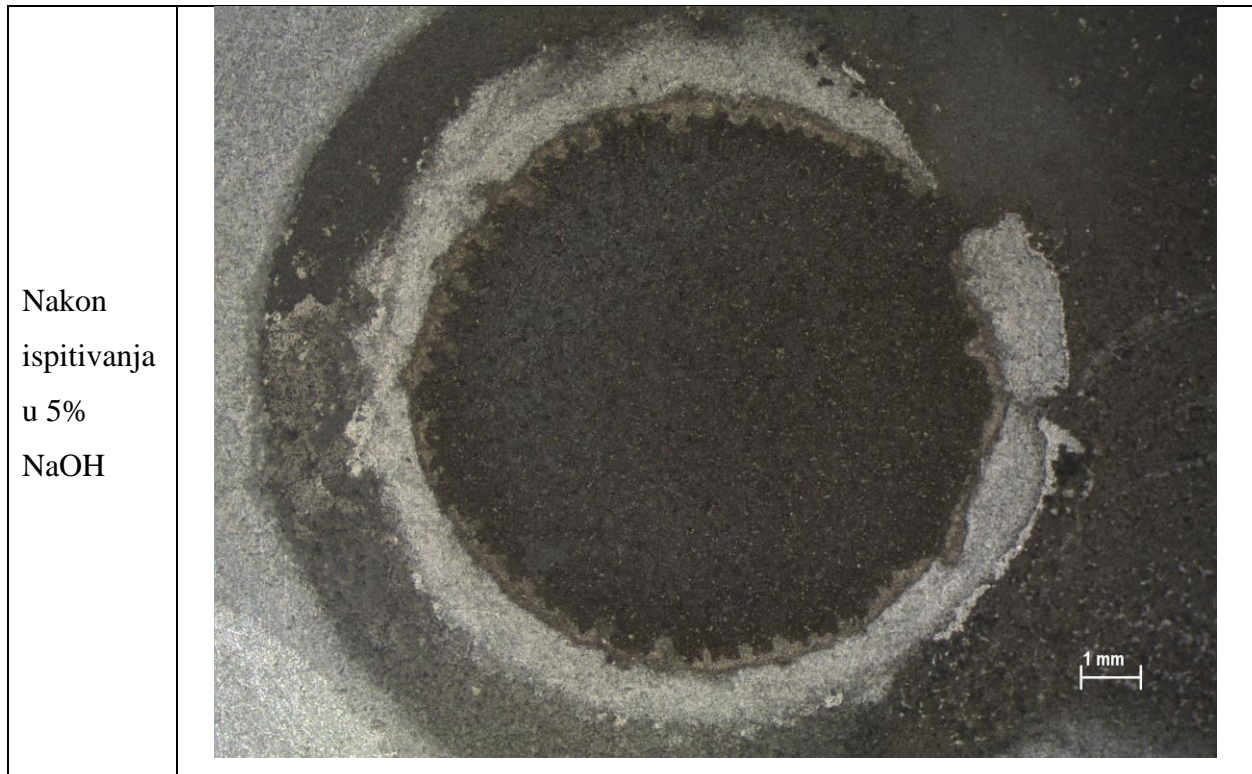
Slika 16. Dijagram cikličke polarizacije uzorka Al6082-T6 u elektrolitima

Tablica 7. Rezultati cikličke polarizacije

Medij	$E_{kor}$ vs ZKE, mV	$E_{pit}$
15% HNO <sub>3</sub>	-580	materijal ne pokazuje sklonost pitingu
5% NaOH	-1500	materijal ne pokazuje sklonost pitingu

Na slici 17. dan je stereomikroskopski prikaz izgleda uzorka Al6082 T6 prije i poslije ispitivanja sklonosti rupičastoj koroziji cikličkom polarizacijom pri 20 °C.





**Slika 17. Izgled površine prije i poslije ispitivanja cikličke polarizacije**

Iz elektrokemijskih ispitivanja kao i iz stereomikroskopske analize površine uzorka aluminijske legure u analiziranom kiselom (15%  $\text{HNO}_3$ ) i lužnatom mediju (5% NaOH) može se vidjeti da dolazi do opće korozije. Materijal ne pokazuje sklonost jamičastoj koroziji.



## 8. ZAKLJUČAK

Aluminijske legure, zahvaljujući maloj gustoći, a dobrim mehaničkim svojstvima pronalaze sve širu primjenu posebno u automobilskoj i zrakoplovnoj industriji. Iako legure iz serije 6xxx imaju visoku čvrstoću, lošije su korozijske postojanosti nego čisti aluminij.

U ovom radu provedena su elektrokemijska ispitivanja u svrhu određivanja sklonosti općoj i jamičastoj koroziji aluminijske legure Al6082-T6. Ispitivanja su provedena u dva medija i to u kiselj otropini dušične kiseline (15% HNO<sub>3</sub>) i lužnatj otropini natrijevog hidroksida (5% NaOH). Ispitivanja su provedena pri 20 °C.

Na temelju provedenih ispitivanja može se zaključiti da legura 6082-T6 pokazuje veliku sklonost općoj koroziji u oba medija. Međutim, ta je sklonost puno veća u lužnatj otropini NaOH te je u tom mediju brzina korozije  $v_{kor}$  deset puta veća nego u kiselj otropini HNO<sub>3</sub>. Također, utvrđeno je da promatrani materijal niti u jednom od medija nije sklon jamičastj koroziji.

## LITERATURA

- [1] <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2863>, dostupno 30.12.2021.
- [2] <https://materialsdata.nist.gov/bitstream/handle/11115/173/Aluminum%20and%20Aluminum%20Alloys%20Davis.pdf.>, dostupno 30.12.2021.
- [3] M. Pulić, Precipitacijsko očvršćivanje toplinski obradive aluminijske legure, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2015.
- [4] ASM Handbook Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM International, 1990.
- [5] <https://www.makeitfrom.com/material-properties/6082-T6-Aluminum>, dostupno 02.01.2022.
- [6] <https://www.makeitfrom.com/material-properties/6082-AISi1MgMn-3.2315-H30-A96082-Aluminum/>, dostupno 02.01.2022.
- [7] J. R. Davis, Corrosion Understanding The Basics, ASM International, 2000.
- [8] [https://www.researchgate.net/figure/Pourbaix-diagram-of-aluminum-in-water-at-25-C-showing-its-corrosion-behavior-It\\_fig2\\_332786554](https://www.researchgate.net/figure/Pourbaix-diagram-of-aluminum-in-water-at-25-C-showing-its-corrosion-behavior-It_fig2_332786554), dostupno 02.01.2022.
- [9] P. R. Roberge, Handbook of Corrosion Engineering, McGraw-Hill, 2000.
- [10] <http://www.totalmateria.com/Article74.htm>, dostupno 06.02.2022.
- [11] [https://www.researchgate.net/figure/Optical-micrograph-of-surface-pitting-in-Al-2024-T3\\_fig3\\_237617601](https://www.researchgate.net/figure/Optical-micrograph-of-surface-pitting-in-Al-2024-T3_fig3_237617601), dostupno 06.02.2022.
- [12] V. Alar, Kemijska postojanost metala, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2015.
- [13] <http://depa.fquim.unam.mx/labcorr/publicaciones/ASTM-G46-94-Examination-and-evaluation-of-pitting>, dostupno 14.02.2022.
- [14] A. Ajduković, Diplomski rad, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2016.
- [15] I. Juraga, V. Alar i I. Stojanović, Korozija i zaštita premazima, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2014.