

# Korozijska otpornost aluminijske legure AA5083

---

Zadro, Katarina

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

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:235:070161>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-17**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Katarina Zadro**

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Ivan Stojanović, dipl. ing.

Student:

Katarina Zadro

Zagreb, 2018.

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

Zahvaljujem se svojem mentoru doc. dr. sc. Ivanu Stojanoviću, dipl. ing. na uloženom vremenu i trudu, ustupljenoj literaturi i korisnim savjetima.

Zahvaljujem se gospodinu Luki Colnago i ostatku njegovog tima iz tvrtke „Colnago Marine“ na susretljivosti i pruženoj pomoći prilikom posjete brodogradilišta.

Katarina Zadro



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**  
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija brodogradnje



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Katarina Zadro**

Mat. br.: 0035197175

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Korozijska otpornost aluminijske legure AA5083**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Corrosion resistance of aluminum alloy AA5083**

Opis zadatka:

Aluminijske legure važna su skupina konstrukcijskih materijala čija se primjena sve više širi na različita područja tehnike. Jedno od važnijih područja primjene je mala brodogradnja, gdje se aluminijske legure koriste za izradu brodskog trupa. Pri tom se u praksi nerijetko događaju i neželjene korozijske pojave.

U teorijskom dijelu rada treba obraditi svojstva, podjelu i primjenu aluminijskih legura u brodogradnji. Izučiti svojstva korozijske postojanosti aluminijskih legura grupe 5000 s posebnim osvrtom na leguru AA5083. U praktičnom dijelu rada potrebno je provesti elektrokemijska ispitivanja aluminijske legure AA5083 u 3,5 % otopini NaCl s ciljem utvrđivanja korozijskih parametara materijala. Ispitivanja provesti pri sobnoj i povišenoj temperaturi. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

26. travnja 2018.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Ivan Stojanović

Datum predaje rada:

**2. rok (izvanredni):** 28. lipnja 2018.  
**3. rok:** 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:

**2. rok (izvanredni):** 2.7. 2018.  
**3. rok:** 24.9. - 28.9. 2018.

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Nastia Degiuli

**SADRŽAJ**

SADRŽAJ.....	VI
POPIS SLIKA .....	VIII
POPIS TABLICA.....	VII
POPIS OZNAKA.....	VIII
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY .....	X
1. ALUMINIJ .....	1
1.1. Osnovna svojstva aluminija .....	1
1.2. Usporedba aluminija s čelikom u svrhu primjene u brodogradnji .....	2
2. ALUMINIJSKE LEGURE.....	3
2.1. Legirni elementi.....	3
2.2. Podjela i označavanje .....	3
2.2.1. Princip označavanja kovanih legura .....	4
2.2.2. Princip označavanja lijevanih legura .....	5
2.3. Općenita primjena kovanih i lijevanih aluminijskih legura u brodogradnji.....	6
2.4. Svojstva i primjena kovanih aluminijskih legura korištenih u brodogradnji .....	6
2.4.1. AA – 4043 .....	6
2.4.2. AA – 5052 .....	6
2.4.3. AA – 5059 .....	6
2.4.4. AA – 5083 .....	6
2.4.5. AA – 5086 .....	7
2.4.6. AA – 6005 .....	7
2.4.7. AA – 6061 .....	7
2.4.8. AA – 6082 .....	7
3. KOROZIJA.....	8
3.1. Općenito .....	8
3.2. Ekonomski značaj korozije.....	8
3.3. Korozija u brodogradnji.....	9
3.4. Vrste korozije.....	10
3.5. Metode zaštite od korozije u brodogradnji.....	15
3.5.1. Konstrukcijsko - tehnološke mjere .....	15
3.5.2. Primjena korozijski postojanih materijala .....	16
3.5.3. Elektrokemijska zaštita .....	16

3.5.4.	Zaštita inhibitorima korozije.....	17
3.5.5.	Zaštita prevlačenjem .....	17
4.	KOROZIJSKA POSTOJANOST ALUMINIJSKIH LEGURA GRUPE 5000 .....	18
5.	PRIMJENA ALUMINIJSKIH LEGURA U MALOJ BRODOGRADNJI .....	20
6.	EKSPERIMENTALNI DIO .....	28
6.1.	Uvod .....	28
6.2.	Priprema uzorka .....	28
6.3.	Utvrđivanje kemijskog sastava .....	30
6.4.	Elektrokemijska metoda ispitivanja korozije.....	31
6.4.1.	Provedba eksperimenta pri sobnoj (25°C) temperaturi .....	36
6.4.1.1.	Mjerenje potencijala otvorenog strujnog kruga prije linearne polarizacije.....	36
6.4.1.2.	Linearna polarizacija.....	36
6.4.1.3.	Tafelova ekstrapolacija.....	37
6.4.1.4.	Mjerenje potencijala otvorenog strujnog kruga prije cikličke polarizacije .....	37
6.4.1.5.	Ciklička polarizacija.....	38
6.4.1.6.	Očitane vrijednosti i površina uzorka .....	38
6.4.2.	Provedba eksperimenta pri povišenoj (40 °C) temperaturi .....	42
6.4.2.1.	Mjerenje potencijala otvorenog strujnog kruga prije linearne polarizacije.....	42
6.4.2.2.	Linearna polarizacija.....	42
6.4.2.3.	Tafelova ekstrapolacija.....	43
6.4.2.4.	Mjerenje potencijala otvorenog strujnog kruga prije cikličke polarizacije .....	43
6.4.2.5.	Ciklička polarizacija.....	44
6.4.2.6.	Očitane vrijednosti i površina uzorka .....	44
6.5.	Usporedba rezultata.....	47
6.6.	Osvrt na stakloplastične brodice .....	51
7.	ZAKLJUČAK.....	52
	LITERATURA.....	53

## POPIS SLIKA

Slika 1. Jahta s aluminijskim nadgrađem [4] .....	2
Slika 2. Brodolom zbog korozijskog oštećenja – Tanker Prestige [5] .....	9
Slika 3. Brodolom zbog korozijskog oštećenja – Tanker Erika [5] .....	9
Slika 4. Brodolom zbog korozijskog oštećenja – Tanker Kirki [5] .....	9
Slika 5. Opća korozija vanjske oplata broda [6].....	11
Slika 6. Galvanska korozija nastala zbog kontakta aluminijske legure (lijevo) s broncom (desno) [7] .....	11
Slika 7. Korozijsko oštećenje čeličnog vijka za učvršćivanje broskog motora (lijevo) i shema mehanizma oštećivanja u području procijepa vijčanog spoja (desno) [8] .....	12
Slika 8. Rupičasta ( <i>eng. pitting</i> ) korozija na kobilici broda [9] .....	12
Slika 9. Interkristalna korozijana cjevovodu od aluminijske legure AA – 5083 [7].....	13
Slika 10. Decinkacija mjedi [6] .....	13
Slika 11. Erozijsko korozijsko oštećenje cijevi za transport nafte [10] .....	14
Slika 12. Primjer napetosne korozije na ugljičnom čeliku [11].....	14
Slika 13. Kavitacijska korozija krila broskog vijka ribarskog broda [6] .....	15
Slika 14. Utjecaj konstrukcijsko - tehnoloških mjera na karakter strujanja medija [6] .....	15
Slika 15. Brodski propeler izrađen od aluminijske bronce [12].....	16
Slika 16. Katodna zaštita metalnih dijelova na drvenom brodu [5] .....	16
Slika 17. Zaštita unutrašnjosti lista kormila [6] .....	17
Slika 18. Nanošenje temeljnog premaza na vanjsku oplatu broda [15] .....	17
Slika 19. Rupičasta korozija na aluminiju [16] .....	18
Slika 20. Napetosna korozija u aluminijskoj posudi za pohranu octene kiseline [7].....	18
Slika 21. Korozija u procijepu aluminijske legure nakon 11 godina u službi u morskom okolišu [7] ....	19
Slika 22. Galvanska korozija; stezni zatvarač čije je kućište izrađeno od aluminijske legure u kontaktu s ugljičnim čelikom od kojeg je izrađen stezni element na konstrukciji broda [8] .....	19
Slika 23. Limovi na skladištu .....	20
Slika 24. Profili na skladištu .....	20
Slika 25. Radionica tvrtke Colnago Marine.....	21
Slika 26. Rezanje legure na CNC stroju .....	21
Slika 27. Kvadratni profili zavareni za vanjsku oplatu .....	22
Slika 28. Poravnavanje površine kitom [19] .....	23
Slika 29. Nova cinkova anoda .....	23
Slika 30. Istrošena cinkova anoda .....	24
Slika 31. Nosači dna broda .....	24
Slika 32. Plovilo za odmor i razonodu Colnago 40.....	25
Slika 33. Colnago 40 u fazi bojanja trupa .....	25
Slika 34. Colnago 40 u službi [20] .....	26
Slika 35. Gumenjaka Colnago 26 u službi [20].....	26
Slika 36. Katamaran Colnago 40 Wcat u radionici [20] .....	27
Slika 37. Katamaran Colnago 40 Wcat u službi [20] .....	27
Slika 38. Odabrana aluminijska pločica (AA – 5083 H321) .....	28
Slika 39. Površina koja će biti ispitivana na koroziju .....	29
Slika 40. Mehanički uređaj za formiranje rupice .....	29
Slika 41. XRF uređaj za utvrđivanje kemijskog sastava materijala .....	30
Slika 42. Elektrokemijska ćelija s uronjenim elektrodama .....	31



Slika 43. Potenciostat/galvanostat (model 273 EG&E) .....	32
Slika 44. Potenciostat/galvanostat, elektrokemijska ćelija s uronjenim elektrodama te računalo za praćenje rezultata ispitivanja .....	32
Slika 45. Određivanje polarizacijskog otpora prema F. Mansfeldu [22] .....	34
Slika 46. Princip Tafelove ekstrapolacije [22] .....	34
Slika 47. Izgled dijagrama cikličke polarizacije u slučaju kada je materijal sklon pittingu [21] .....	35
Slika 48. E – t dijagram uzorka prije linearne polarizacije pri 25°C .....	36
Slika 49. Linearna polarizacija legure AA – 5083 pri 25°C .....	36
Slika 50. Tafelova ekstrapolacija legure AA - 5083 pri 25°C .....	37
Slika 51. E – t dijagram uzorka prije cikličke polarizacije pri 25°C .....	37
Slika 52. Ciklička polarizacija legure AA – 5083 pri 25°C .....	38
Slika 53. Mikroskop Leica M26 .....	39
Slika 54. Mikroskop Leica M26 i računalo s pripadajućim programom za analizu površine uzorka.....	39
Slika 55. Površina uzorka prije Tafelove ekstrapolacije.....	40
Slika 56. Površina uzorka poslije Tafelove ekstrapolacije; vidljiva rupičasta korozijska oštećenja .....	40
Slika 57. Površina uzorka prije cikličke polarizacije.....	41
Slika 58. Površina uzorka poslije cikličke polarizacije; vidljivo je intenzivno korozijsko razaranje po čitavoj ispitanoj površini.....	41
Slika 59. E – t dijagram uzorka prije linearne polarizacije pri 40°C .....	42
Slika 60. Linearna polarizacija legure AA – 5083 pri 40° .....	42
Slika 61. Tafelova ekstrapolacija uzorka pri 40°C .....	43
Slika 62. E – t dijagram uzorka prije cikličke polarizacije pri 40°C .....	43
Slika 63. Ciklička polarizacija uzorka pri 40°C .....	44
Slika 64. Površina uzorka prije Tafelove ekstrapolacije.....	45
Slika 65. Površina uzorka poslije Tafelove ekstrapolacije; vidljiva rupičasta korozijska oštećenja .....	45
Slika 66. Površina uzorka prije cikličke polarizacije.....	46
Slika 67. Površina uzorka poslije cikličke polarizacije; vidljivo je intenzivno korozijsko razaranje po čitavoj ispitanoj površini.....	46
Slika 68. Dijagram linearne polarizacije uzorka za sobnu i povišenu temperaturu.....	47
Slika 69. Dijagram Tafelove ekstrapolacije uzorka za sobnu i povišenu temperaturu.....	48
Slika 70. Dijagram cikličke polarizacije uzorka za sobnu i povišenu temperaturu.....	48
Slika 71. Površina uzorka poslije Tafelove ekstrapolacije pri sobnoj temperaturi.....	49
Slika 72. Površina uzorka poslije Tafelove ekstrapolacije pri povišenoj temperaturi.....	49
Slika 73. Površina uzorka poslije cikličke polarizacije pri sobnoj temperaturi.....	50
Slika 74. Površina uzorka poslije cikličke polarizacije pri povišenoj temperaturi.....	50
Slika 75. Napredovanje osmoze na stakloplastici [23].....	51

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Osnovna svojstva aluminija.....	1
Tablica 2. Glavni legirni elementi različitih serija kovanih legura aluminija.....	4
Tablica 3. Glavni legirni elementi različitih serija lijevanih legura aluminija.....	5
Tablica 4. Kemijski sastav uzorka i atest materijala .....	30
Tablica 5. Rezultati DC ispitivanja za leguru AA – 5083 pri 25 °C.....	38
Tablica 6. Rezultati DC ispitivanja za leguru AA – 5083 pri 40 °C.....	44
Tablica 7. Korozijske veličine aluminijske legure AA – 5083 uronjene u 3,5 % otopinu NaCl – a nakon ispitivanja na sobnoj (25°C) i povišenoj (40°C) temperaturi .....	49
Tablica 8. Usporedba brzine korozije aluminijske legure AA – 5083 i općeg konstrukcijskog čelika nakon ispitivanja 3,5 % otopini NaCl – a pri sobnoj (25°C) temperaturi.....	50

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
T	°C	Temperatura
d	cm	Širina rupice na uzorku
/	%	Maseni udio
$E_{kor}$	mV	Korozijski potencijal
$E_{ok}$	mV	Potencijal otvorenog strujnog kruga
$R_p$	kOhm	Polarizacijski otpor
$v_{kor}$	mm/god	Brzina korozije
$\beta_A, \beta_K$	V/god	Nagib anodnog i katodnog dijela; Tafelove konstante
$E_{zpit}$	mV	Potencijal repasivacije
$E_{pit}$	mV	Potencijal pittinga
j	A/cm <sup>2</sup>	Gustoća korozijske struje
$I_{kor}$	μA	Korozijska struja

## SAŽETAK

Završni rad sastoji se od dvije cjeline: teorijskog i eksperimentalnog dijela.

U teorijskom dijelu dana su svojstva aluminijske legure AA – 5083 te je napravljena podjela aluminijskih legura s posebnim osvrtom na one koje se primjenjuju u brodogradnji. Jedan od najvažnijih razloga primjene aluminijske legure AA – 5083 kao konstrukcijskog materijala je dobra korozivna postojanost te je stoga dano poglavlje o koroziji; vrstama korozije, metodama zaštite te ekonomskom značaju korozije u brodogradnji. Ispitana su svojstva korozivne postojanosti aluminijskih legura grupe 5000, a na kraju teorijskog dijela rada prikazana je primjena aluminijskih legura u maloj brodogradnji na primjeru brodogradilišta „Colnago Marine“.

U eksperimentalnom dijelu provedena su elektrokemijska ispitivanja aluminijske legure AA – 5083 u 3,5 % otopini natrijevog klorida s ciljem utvrđivanja korozivnih parametara materijala. Ispitivanja su provedena pri sobnoj i povišenoj temperaturi. Površina uzorka uspoređena je vizualno prije i poslije izlaganja 3,5 % otopini NaCl – a, a rezultati eksperimenta izneseni su u obliku dijagrama (potenciostatske krivulje) iz kojih su iščitane korozivne veličine – korozivni potencijal, polarizacijski otpor i brzina korozije. Na kraju je dana usporedba rezultata nakon provedbe eksperimenta pri sobnoj i povišenoj temperaturi te je iznesen zaključak.

Ključne riječi: aluminij, aluminijske legure, AA – 5083, mala brodogradnja, korozija, elektrokemijska ispitivanja

## SUMMARY

This final paper consists of two main units: theoretical and experimental part.

In the theoretical part of this paper, properties of aluminium are provided and division of aluminium alloys is made, with special reference to those used in shipbuilding. One of the most important reasons for the use of aluminium as a constructing material is its good corrosion resistance. Therefore, within this paper, a chapter on corrosion is provided; further, types of corrosion, methods of protection and the economic importance of corrosion in shipbuilding are described. Furthermore, properties of corrosion resistance of aluminium alloys of Group 5000 have been carefully studied, while at the end of the theoretical part of this paper, application of aluminium alloys in small shipbuilding is demonstrated, with special emphasis on the example of shipyard "Colnago Marine".

In the experimental part of this paper, electrochemical tests of aluminium alloy AA - 5083 were performed in 3.5% sodium chloride solution, in order to determine the corrosion parameters of the material. Tests were performed at room temperature and elevated temperature. Surface of the sample was compared visually before and after exposure to 3.5% NaCl solution and results of experiment were presented in the form of diagrams (potentiostatic curves), indicating corrosion parameters - corrosion potential, polarization resistance and corrosion rates. At the end of this paper, comparison of results after performance of experiment at room and elevated temperatures were given and furthermore, conclusion was made.


Keywords: aluminium, aluminium alloys, AA – 5083, small shipbuilding, corrosion, electrochemical tests

# 1. ALUMINIJ

## 1.1. Osnovna svojstva aluminija

Aluminij je kemijski element koji se kao konstrukcijski materijal, u usporedbi s čelikom i bakrom, primjenjuje relativno kratko - svega jedno stoljeće. Međutim, zahvaljujući svojim vrlo povoljnim karakteristikama, vrlo je brzo zauzeo drugo mjesto u ukupnoj proizvodnji i potrošnji metala u svijetu. [1] Niska specifična gustoća, prirodna otpornost na koroziju, visoka električna i toplinska provodljivost, visoka refleksija zračenja, dobra mehanička svojstva, livljivost, hladna oblikovljivost, rezljivost, zavarljivost i slično, svojstva su koja su omogućila aluminiju široku primjenu u mnogim granama industrije među kojima se nalazi i brodogradnja. U tablici 1 dana su osnovna svojstva aluminija.

Tablica 1. Osnovna svojstva aluminija

izgled	
gustoća	2 700 kg/m <sup>3</sup>
tvrdoća	167 MPa (HV)
modul elastičnosti	69 000 N/mm <sup>2</sup>
granica razvlačenja	20...120 N/mm <sup>2</sup>

Osnovne su značajke korozijskog ponašanja aluminija u elektrolitima sklonost pravom pasiviranju nastajanjem površinskog filma  $Al_2O_3$  i nepostojanost u lužnatim sredinama zbog amfoternog karaktera. Aluminij je redovito pasivan u slatkoj vodi, vlažnoj atmosferi te mnogim aeriranim elektrolitima kojima pH vrijednost leži između 4 i 9. Samo se u prisutnosti aktivnih aniona, kao što su kloridi, odnosno kationa plemenitijih metala, kao što su  $Cu^{2+}$  i  $Fe^{3+}$ , na njemu pojavljuje pitting čak i u približno neutralnim otopinama. [2]

## 1.2. Usporedba aluminija s čelikom u svrhu primjene u brodogradnji

Aluminij je metal kojeg karakterizira gotovo tri puta manja gustoća i Youngov modul u odnosu na običan brodograđevni čelik. Zbog toga upotreba aluminija umjesto čelika zahtijeva pažljivo provođenje analize čvrstoće i vibracija brodske strukture, pri čemu je neophodno oblikom poprečnog presjeka na razini globalne i lokalne čvrstoće osigurati zadovoljavajući moment otpora. Bez obzira na navedeni nedostatak, u odnosu na čelik, omjer čvrstoće i gustoće je povoljniji u slučaju aluminija zbog čega su aluminijske konstrukcije približno čak dvostruko lakše u odnosu na čelične jednake čvrstoće. Upravo je to osnovni razlog primjene aluminija u brodogradnji, osobito kao materijala za gradnju nadgrađa čime se smanjuje masa broda, povećava korisna nosivost te se smanjuje vertikalna ordinata težišta broda što pak povoljno utječe na svojstva stabiliteta. [1] Na slici 1 prikazana je jahta čiji je trup izrađen od čelika, a nadgrađe od aluminija. Lakoća aluminija ima dvije direktne prednosti: za vrijeme proizvodnje, težina aluminija pomaže pri rukovanju s poluproizvodima u tvornici tako da otpada uporaba teških dizalica; u službi, aluminijski čamci su lakši nego slični od čelika, brži su za istu snagu motora i imaju veću energetska iskorištenost pri većim brzinama. [3] Prednosti se mogu i povećati legiranjem aluminija s elementima specifičnih svojstava.



Slika 1. Jahta s aluminijskim nadgrađem [4]

## 2. ALUMINIJSKE LEGURE

### 2.1. Legirni elementi

Poboljšanje mehaničkih svojstava aluminija postiže se legiranjem. Najvažniji legirni elementi su:

- bakar (Cu)
- magnezij (Mg)
- silicij (Si)
- cink (Zn)
- mangan (Mn).

Kao dodaci ili nečistoće prisutni su u manjoj količini željezo (Fe), krom (Cr) i titan (Ti). Kompleksnije legure nastaju njihovom međusobnom kombinacijom i uz dodatak i drugih legirnih elemenata koji poboljšavaju svojstva osnovne legure kao npr. čvrstoću, tvrdoću, rezljivost i slično.

### 2.2. Podjela i označavanje

Uobičajeno se legure aluminija dijele na kovane (eng. *Wrought alloys*) i lijevane (eng. *Cast alloys*), ovisno o tome koje je tehnološko svojstvo, oblikovljivost ili livljivost, povoljnije izraženo.

„The Aluminium Association“ (kratica AA) neprofitna je trgovačka organizacija za proizvodnju, razvoj i recikliranje aluminija koja registrira i objavljuje specifikacije koje opisuju sastav, mehanička svojstva i nomenklaturu aluminijskih legura. Razlika u identifikaciji lijevanih i kovanih legura je u tome što se kovane legure zapisuju u obliku četiri znamenke (XXXX) dok se lijevane legure zapisuju kao tri znamenke nakon kojih slijedi decimalna točka, a zatim još jedna znamenka (XXX.X). U tablicama 2 i 3 prikazani su glavni legirni elementi za pojedinu seriju aluminijskih legura.

Kao dodatak uz brojčanu oznaku legure koristi se i oznaka za uvjete u kojima je provedeno očvršćivanje legure. Ta oznaka slijedi nakon brojčane oznake tipa legure. Legure koje nisu toplinski obradive označuju se s HXXX (npr. 5083 – H321). Toplinski obradive legure označuju se s TXXX (npr. 6082 – T6). Ako nije provedeno očvršćivanje ili ako je proizvod dobiven žarenjem, označuje se s – O (npr. 5086 – O).

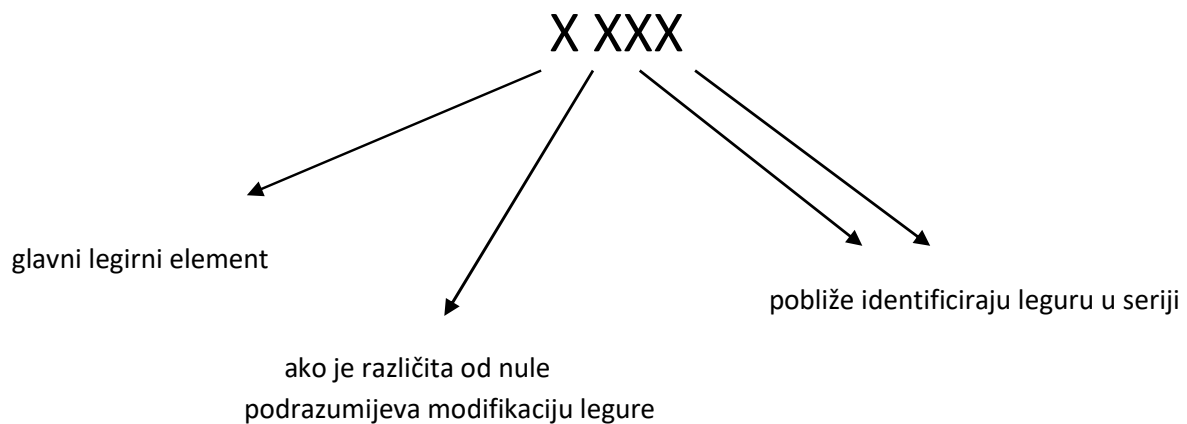


### 2.2.1. Princip označavanja kovanih legura

U tablici 2 dani su glavni legirni elementi za odgovarajuću seriju kovane aluminijske legure.

Tablica 2. Glavni legirni elementi različitih serija kovanih legura aluminija

Seriya legure aluminija	Glavni legirni element
1XXX	minimalno 99% aluminija
2XXX	bakar
3XXX	mangan
4XXX	silicij
5XXX	magnezij
6XXX	magnezij i silicij
7XXX	cink
8XXX	ostali elementi

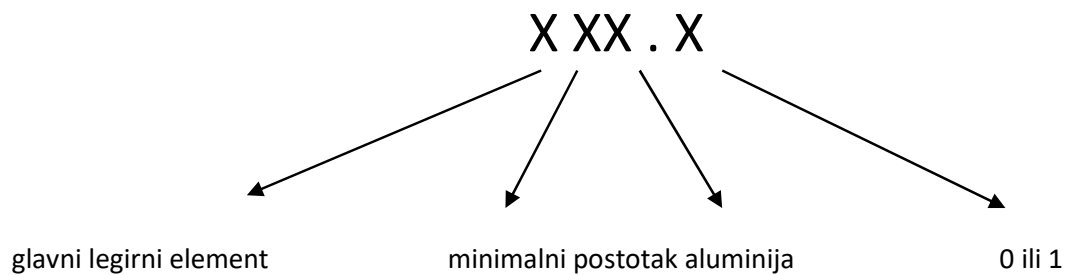


### 2.2.2. Princip označavanja lijevanih legura

U tablici 3 dani su glavni legirni elementi za odgovarajuću seriju lijevane aluminijske legure.

Tablica 3. Glavni legirni elementi različitih serija lijevanih legura aluminijske

Serijska oznaka legure aluminijske	Glavni legirni element
1XX.X	minimalno 99% aluminijska
2XX.X	bakar
3XX.X	silicij, bakar i/ili magnezij
4XX.X	silicij
5XX.X	magnezij
7XX.X	cink
8XX.X	kositar
9XX.X	ostali elementi



### **2.3. Općenita primjena kovanih i lijevanih aluminijskih legura u brodogradnji**

Kovane legure se u brodogradnji primjenjuju kao strukturni elementi koji se ugrađuju u trup ili nadgrađe broda u obliku limova i profila, a lijevane za konstrukciju trupa broda ili drugih pomorskih objekata koji su predviđeni za rad na kriogenim temperaturama. Osim navedenog, aluminijske legure se često koriste za unutarnje uređenje broda, namještaj, pomoćne uređaje, jarbole, dimnjake, čamce za spašavanje, poklopce grotla, izmjenjivače topline, posude pod tlakom i sl. Zbog svojstva nemagnetičnosti, danas se često aluminijske legure koriste kao primarni materijal za izgradnju trupa ratnih brodova. [1]

Preciznije, aluminijske legure koje se danas najviše koriste u brodogradnji su sljedeće:

- AA - 4043
- AA - 5052
- AA - 5059
- AA - 5083
- AA – 5086
- AA – 6005A
- AA - 6061
- AA –6082.

### **2.4. Svojstva i primjena kovanih aluminijskih legura korištenih u brodogradnji**

#### **2.4.1. AA – 4043**

Silicij, glavni legirni element ove skupine, dodan u aluminij, smanjuje točku taljenja i poboljšava njegovu fluidnost u rastaljenom stanju. Ove karakteristike su poželjne za dodatne materijale koji se koriste kod zavarivanja i lemljenja. Zbog toga se legura AA – 4043 prodaje kao žica za zavarivanje za TIG/MIG procese zavarivanja.

#### **2.4.2. AA – 5052**

Legura AA – 5052 s magnezijem kao glavnim legirnim elementom posjeduje dobra mehanička svojstva na niskim temperaturama, lako se zavaruje te ima odličnu otpornost na koroziju. Zbog izvrsne korozijske postojanosti ova se legura primjenjuje kod izrade tankova za ukapljeni naftni plin (UNP).

#### **2.4.3. AA – 5059**

Iako ova legura nije toplinski obradiva, to ne utječe značajno na njezinu čvrstoću te je zbog toga legura AA – 5059 lako zavariva. Njezina svojstva se mijenjaju ovisno o temperaturi i očvrstnuću. Upotrebljava se za izradu trupa aluminijskih brodica i velikih jahti.

#### **2.4.4. AA – 5083**

Legura AA – 5083 ima najveću čvrstoću u skupini toplinski neobradivih aluminijskih legura, ali se ne preporuča korištenje na temperaturama većim od 65 C°. Odlična zavarljivost i korozijska postojanost omogućili su primjenu navedene legure kod izrade jahti, ribarskih brodova, glisera, plovila po narudžbi te policijskih čamaca.

#### **2.4.5. AA – 5086**

Kao i kod legure AA – 5059, mehanička svojstva legure AA – 5086 mijenjaju se ovisno o temperaturi i očvršću. Tipična primjena u morskom okruženju ista je kao i kod legure AA – 5083 osim što se legura AA – 5086 još i koristi kod izrade spremišta za tekući prirodni plin te rebra cijevnog izmjenjivača topline.

#### **2.4.6. AA – 6005**

Osrednje čvrstoće, toplinski obradiva i lako savitljiva legura AA – 6005 dobiva se na različite načine no svakako ekstrudiranjem postiže najbolja svojstva u smislu glatkoće površine i mogućnosti dobivanja profila složenih oblika. Upravo iz tog razloga primjenjuje se za izradu cjevovoda, prijenosnih ljestvi i platformi.

#### **2.4.7. AA – 6061**

Za razliku od ostalih, legura AA – 6061 je precipitacijski očvršnuta što znači da ima prednost u postizanju povoljnog omjera čvrstoće i gustoće. Odlično je oblikovljiva, dobro zavariva i posjeduje dobra antikorozivna svojstva. Primjenu pronalazi u izradi pontona, ljestvi za ukrcaj, pisti i heliodroma.

#### **2.4.8. AA – 6082**

Poznata kao „strukturna legura“, AA – 6082 primjenjuje se u područjima visokih naprezanja zbog svoje velike čvrstoće, najveće u skupini 6XXX. Primjerice koristi se prilikom izrade brodskih nosača, dizalica, ali i rebra cijevnog izmjenjivača topline.

Ono što povezuje svaku od aluminijskih legura korištenih u brodogradnji je dobra otpornost na koroziju, a to je od izuzetne važnosti s obzirom na to da je morska voda najagresivniji medij.

Korozivna postojanost aluminijskih legura grupe 5000 bit će detaljnije obrađena u poglavlju 4.

### 3. KOROZIJA

#### 3.1. Općenito

Korozija je nepoželjno trošenje konstrukcijskih materijala kemijskim djelovanjem okoline. Korozija se definira kao spontani proces razaranja metala i anorganskih nemetala (npr. beton), a sudjeluje i u oštećivanju (degradaciji) organskih materijala (polimernih materijala, drva). [5]

Vanjski čimbenici koji uvjetuju koroziju mogu se podijeliti na:

- ➔ kemijske čimbenike (otopljeni plinovi poput SO<sub>2</sub> i CO<sub>2</sub>, ravnoteža karbonata, sadržaj soli i pH-vrijednost)
- ➔ fizikalne čimbenike (brzina strujanja medija, temperatura, tlak, prisutnost zračnih mjehurića)
- ➔ biološke čimbenike (obraštanje, mikrobiološka potrošnja kisika, potrošnja ugljičnog dioksida)
- ➔ električne čimbenike (pojava stvaranja galvanskih struja i njihov utjecaj na brzinu korozije). [5]

Djelovanju vanjskih čimbenika suprotstavljaju se unutarnji čimbenici od kojih su najvažniji:

- ➔ sastav materijala
- ➔ prostorni raspored
- ➔ veličina i oblik kristala
- ➔ učestalost defekata kristalne rešetke
- ➔ zaostala mehanička naprezanja
- ➔ stanje površine u pogledu onečišćenja, hrapavosti i površinskih filmova. [5]

#### 3.2. Ekonomski značaj korozije

Korozija smanjuje masu metala i njegovu uporabnu vrijednost u obliku sirovine, poluproizvoda i proizvoda. Skraćuje vijek trajanja proizvoda, poskupljuje održavanje, uzrokuje zastoje u radu, pogoršava kvalitetu proizvoda i slično. Zbog korozije postaju neupotrebljive i mnogo veće količine materijala od korodiranih jer element koji je korodirao može biti vitalni dio nekoga sklopa ili konstrukcije. Posljedično su i gubici zbog korozije konstrukcije puno veći od korodirana sirovog materijala. [5]

Posljednji podaci Svjetske korozijske organizacije (WCO – The World Corrosion Organization) potvrđuju kako troškovi uslijed korozije još uvijek nisu pod kontrolom. Za 2006. ukupni troškovi zbog korozije u svijetu iznose čak 2200 milijardi USD, dok su za 2011. troškovi procijenjeni na 3300 milijardi USD. [5]

Primjerice u SAD- u, troškovi koji se tiču korozije u brodograđevnoj industriji iznose čak 2,7 milijardi USD godišnje. 1,1 milijardi odnosi se na novogradnju (prevenciju korozije), 0,8 milijardi na popravke i održavanje (direktne štete uslijed korozije) te dodatnih 0,8 milijardi na izgubljene vozarine uslijed šteta od korozije (indirektne štete od korozije). [6]

### 3.3. Korozija u brodogradnji

Brod kao složen i skup proizvod svoju funkciju mora obavljati tijekom životnog vijeka od nekoliko desetljeća, u uvjetima koji su s korozijskoga stajališta iznimno nepovoljni. Korozijska oštećenja mogu uzrokovati velike probleme na brodskoj konstrukciji, a s vremenom i kolaps konstrukcije što osim materijalne štete može uzrokovati ljudske žrtve, ekološke probleme i sl. [6] Na slikama 2, 3 i 4 prikazani su brodolomi koji su uslijedili upravo zbog korozije.



Tanker Prestige, brod jednostruke oplate, star 26 godina, doživio je havariju 2002. godine. Tijekom oluje počeo je tonuti, a pri pokušaju odvlačenja u dublje vode Atlantika prepolovio se. Procijenjeno je da se izlilo oko 63 000 tona nafte. Razlog potonuća bila je korozija desne strane broda koja je uzrokovala oštećenje oplate balastnih tankova. [5]

Slika 2. Brodolom zbog korozijskog oštećenja – Tanker Prestige [5]



Tanker Erika je tijekom svojeg putovanja 1999. godine blizu obale Velike Britanije uplovio u veliku oluju te je zbog nevremena počeo pucati. Na trupu i palubi pojavile su se i do 3,5 m široke pukotine. Utvrđeno je da je uzrok nereda bila korozija koja je oslabila trup broda. Na sreću je posada evakuirana, ali ekološka katastrofa bila je neizbježna. Naftna mrlja je zagađila više od 400 km obale. [5]

Slika 3. Brodolom zbog korozijskog oštećenja – Tanker Erika [5]



Godine 1990. tankeru Kirki se, dok je plovio u blizini australske obale, kompletan pramac odvojio od broda. Tada je bilo uobičajeno ne upotrebljavati zaštitne premaze niti katodnu zaštitu u balastnim spremnicima. Stoga su rezultati izvješća bili očekivani. Uzrok brodolomu bila je korozija koja je uvelike smanjila debljinu lima, ali i konstrukcija broda loše projektirana na umor materijala. [5]

Slika 4. Brodolom zbog korozijskog oštećenja – Tanker Kirki [5]

### 3.4. Vrste korozije

Pojave korozije klasificiraju se prema mehanizmu procesa, mediju u kojemu se nalazi, vrsti postrojenja i geometriji korozijskog razaranja.

Prema mehanizmu procesa i mediju u kojemu se nalazi razlikujemo:

- kemijsku koroziju
- elektrokemijsku koroziju.

Kemijska korozija – izravna kemijska reakcija između metala i medija koja se zbiva u neelektrolitima, tj. medijima koji ne provode električnu struju, pri čemu nastaju spojevi metala s nemetalnim elementima (najčešće oksidi i sulfidi).

Kemijska korozija primijećena je na brodu u brodskim motornim postrojenjima gdje je neelektrolit vrući plin produkta izgaranja goriva.

Elektrokemijska korozija – nastaje na metalima u električki vodljivim sredinama (elektrolitima) kao što su prirodna i tehnička voda, vodene otopine kiselina, lužina, soli i drugih tvari, vlažno tlo te vlažna atmosfera. Ova vrsta korozije nastaje stvaranjem galvanskog članka između dva metala i elektrolita.

Elektrokemijska korozija je najčešći oblik korozije na brodu.

Prema geometriji korozijskog razaranja razlikujemo:

- opću koroziju
- galvansku koroziju
- koroziju u procjepu
- rupičastu koroziju
- interkristalnu koroziju
- selektivnu koroziju
- erozijsku koroziju
- napetosnu koroziju.

Opća korozija (Slika 5) – najrašireniji oblik korozije, ali najmanje opasan jer zahvaća približno jednako čitavu površinu materijala izloženu nekoj agresivnoj sredini te se proces može pratiti i lako predvidjeti kada je potrebno zamijeniti metalni predmet novim.



Slika 5. Opća korozija vanjske oplata broda [6]

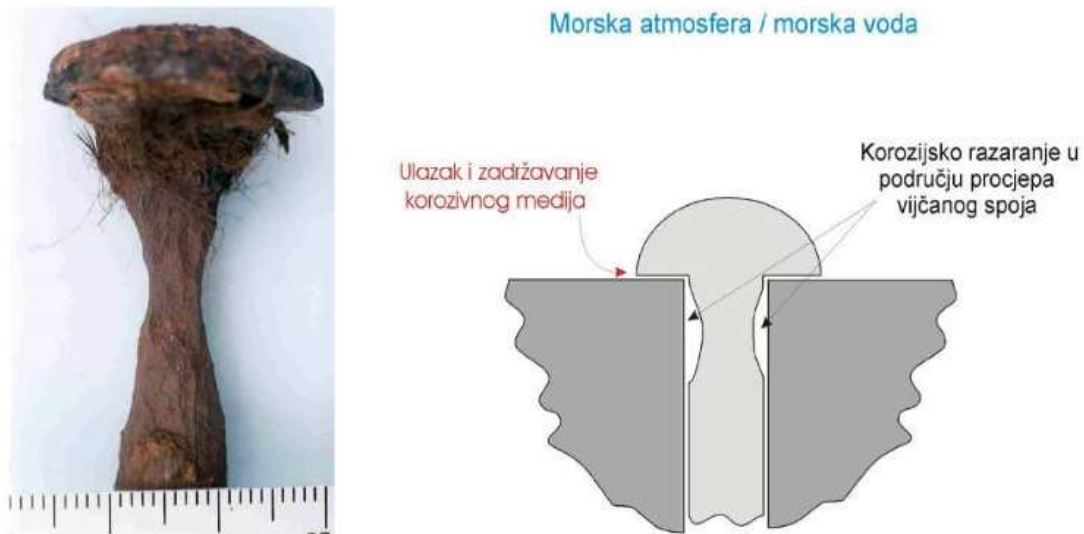
Galvanska korozija (Slika 6) – nastaje pri spajanju dvaju ili više materijala različitog potencijala u elektrolitu, pri čemu dolazi do korozije onog metala koji ima niži električni potencijal.



Slika 6. Galvanska korozija nastala zbog kontakta aluminija (lijevo) s broncom (desno) [7]



Korozija u procijepu (Slika 7) – korozijska pojava u uskim površinskim pukotinama ili u procijepima konstrukcijske izvedbe materijala istih korozijskih potencijala.



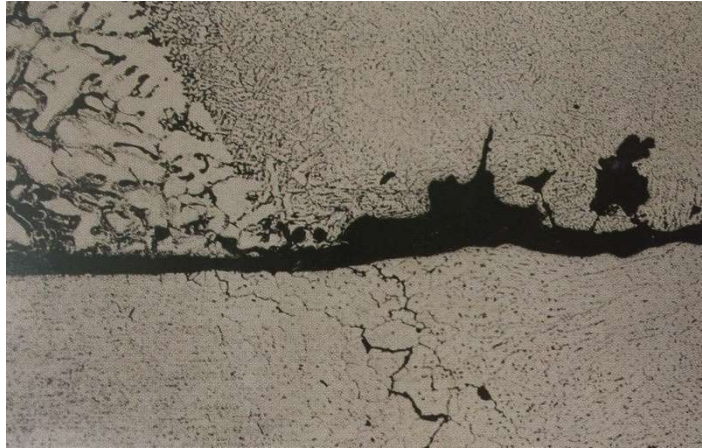
Slika 7. Korozijsko oštećenje čeličnog vijka za učvršćivanje broskog motora (lijevo) i shema mehanizma oštećivanja u području procijepa vijčanog spoja (desno) [8]

Rupičasta korozija (Slika 8) – usko lokalizirana korozija približno kružnog oblika, pri čemu je dubina prodiranja nakon dovoljno dugo vremena nekoliko puta veća od njezine širine na površini materijala. To je lokalni oblik korozije koji napada samo neke dijelove izložene površine materijala.



Slika 8. Rupičasta (eng. *pitting*) korozija na kobilici broda [9]

Interkristalna korozija (Slika 9) – posebno opasan oblik korozije jer napreduje nevidljivo duž granica kristalita čime se izaziva razaranje metalne veze među kristalitima u mikrostrukтури čelika i konačno raspad čitavog tijela. Intekristalna korozija može dugo ostati nezamijećena, a naglo smanjuje čvrstoću i žilavost materijala.



Slika 9. Interkristalna korozijana cjevovodu od aluminijske legure AA – 5083 [7]

Selektivna korozija (Slika 10) – napada samo jednu (neplemenitiju) od faza ili komponenata višefaznoga ili višekomponentnoga materijala; opasan oblik korozije jer pretvara čvrst i duktilan metal u slab i krhak te podložan lomu. Najvažniji primjeri selektivnog otapanja konstrukcijskog materijala su grafitizacija sivog lijeva i decinkacija mjedi.



Slika 10. Decinkacija mjedi [6]

Erozijska korozija (Slika 11) – rezultat istodobnog djelovanja kemijskog (korozija) i fizikalnog (erozija) oštećivanja materijala. Zbiva se u turbulentnim strujama kapljevina te je posljedično karakteristična za cjevovode.



Slika 11. Erozijsko korozijsko oštećenje cijevi za transport nafte [10]

Napetosna korozija (Slika 12) – oblik korozije koji nastaje poradi istodobnog djelovanja agresivnog okruženja i vlačnih naprezanja na materijal konstrukcije. Najčešće se pojavljuje u okolini zavara.



Slika 12. Primjer napetosne korozije na ugljičnom čeliku [11]

Uz navedene, na brodovima se pojavljuju još i korozijski umor (pojava pukotina i loma uslijed dinamičkog opterećenja u korozivnoj sredini), kavitacijska erozija (Slika 13) koja se razvija na krilima brodskih vijaka zbog rada vijka u zoni visoke turbulencije strujanja te biokorozija (pojava nagrizanja metalne površine uslijed metaboličkih procesa mikroorganizama).



Slika 13. Kavitacijska korozija krila brodskog vijka ribarskog broda [6]

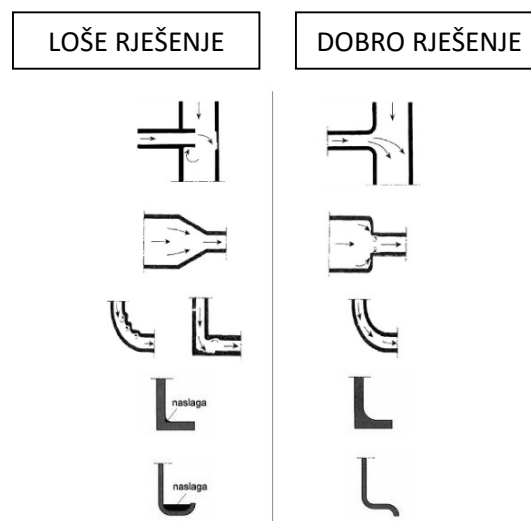
### 3.5. Metode zaštite od korozije u brodogradnji

Korozija se ublažava i sprječava na pet principijelno različitih načina, a svih pet se koristi u brodogradnji. To su:

- ➔ konstrukcijsko - tehnološke mjere
- ➔ primjena korozijski postojanih materijala
- ➔ elektrokemijska zaštita
- ➔ zaštita inhibitorima korozije
- ➔ zaštita prevlačenjem.

#### 3.5.1. Konstrukcijsko - tehnološke mjere

Mnoge konstrukcijske i tehnološke mjere mogu znatno usporiti korozijski proces i produžiti vijek trajanja opreme. Te mjere se ne mogu sustavno prikazati jer se ne radi o šablonskom poslu nego o kreativnoj primjeni teorijskih temelja zaštite od korozije. Slika 14. prikazuje loše i dobro izvedeno konstrukcijsko – tehnološko rješenje.



Slika 14. Utjecaj konstrukcijsko - tehnoloških mjera na karakter strujanja medija [6]

### 3.5.2. Primjena korozijski postojanih materijala

Riječ je o materijalima koje karakterizira korozijska otpornost na djelovanje medija koji ih okružuju tj. mora. U brodogradnji se najviše primjenjuju nehrđajući čelici, bakrene i aluminijske legure. Na slici 15 prikazana je izvedba brodsoga propelera izrađenog od aluminijske bronce.



Slika 15. Brodski propeler izrađen od aluminijske bronce [12]

### 3.5.3. Elektrokemijska zaštita

Katodna zaštita je postupak koji se temelji na privođenju elektrona metalu, bilo iz negativnog pola izvora istosmjerne struje (zaštita narinutom strujom), bilo iz neplemenitijeg metala (tzv. protektorska zaštita), sve dok potencijal objekta ne padne niže od zaštitne vrijednosti jednake ravnotežnu potencijalu anode korozijskog članka. Time nestaje afinitet za koroziju, tj. metal postaje imun. [13] U brodogradnji se katodno zaštićuju svi dijelovi broda koji su u dodiru s morem (Slika 16).



Slika 16. Katodna zaštita metalnih dijelova na drvenom brodu [5]

### 3.5.4. Zaštita inhibitorima korozije

Inhibitori korozije su supstance koje usporavaju korozijski proces tako što se u malim količinama dodaju okolini. Prema mehanizmu djelovanja dijele se na anodne, katodne i mješovite, a posebnu skupinu čine hlapivi inhibitori. To su organske tvari u čvrstom stanju koje imaju dostatno visok tlak isparavanja da bi sublimacijom učinile medij nekoroziivnim bez potrebe izravnog nanošenja na kovinu. Zbog svojeg specifičnog djelovanja, tj. jednolikog ispunjavanja prostora i stvaranja zaštitnog filma na površini metala čime se sprječava dodir s okolinom i medijem, hlapivi inhibitori nalaze primjenu kod zaštite nepristupačnih mjesta brodskih konstrukcija kao što su npr. kobilica, list kormila iznutra (Slika 17), brodska oprema, cjevovodi itd. [14]



Slika 17. Zaštita unutrašnjosti lista kormila [6]

### 3.5.5. Zaštita prevlačenjem

Prevlake mogu biti metalne i nemetalne, a nemetalne mogu biti organske i anorganske. Najraširenija tehnologija zaštite broskog trupa od korozije je zaštita premazima organskoga podrijetla. Kod izvođenja zaštite od iznimne je važnosti odgovarajuće pripremiti podlogu, korektno nanositi premaz te osigurati dobre radne uvjete (osvjetljenje, dostupnost površine, ventilacija) uz odgovarajuću mikroklimu (temperatura okolice, relativna vlažnost i sl.). Također, pravilan izbor metode bojanja bitno utječe na cjelokupnu zaštitu površine. U brodogradnji se najčešće koristi: bojanje četkom, valjcima, prskanje sa zrakom, bezračno i elektrostatsko prskanje. Karakteristike ove metode su jednostavnost i brzina primjene te relativno niska cijena. [14] Nanošenje temeljnog premaza na vanjsku oplatu broda prikazano je na slici 18.



Slika 18. Nanošenje temeljnog premaza na vanjsku oplatu broda [15]

#### 4. KOROZIJSKA POSTOJANOST ALUMINIJSKIH LEGURA GRUPE 5000

Za primjenu u morskoj vodi odabiru se 5XXX legure zbog svoje izrazite korozijske postojanosti. S obzirom na oblike korozije koji se pojavljuju kod aluminijskih legura, ova skupina s legurom AA – 5083 kao predstavnikom, apsolutno prednjači u svojstvima koja su se pokazala povoljnima za primjenu u mediju koji je vrlo pogodan za nastanak korozijskih produkata. Primjerice, 5XXX legure sa sadržajem magnezija manjim od 3,5 % imune su na interkristalnu koroziju, vrlo opasan oblik korozije. Također su manje sklone rupičastoj (Slika 19) i napetosnoj koroziji (Slika 20) od 6XXX legura.



Slika 19. Rupičasta korozija na aluminiju [16]



Slika 20. Napetosna korozija u aluminijskoj posudi za pohranu octene kiseline [7]

Ipak, one vrste korozije kojima treba posvetiti pažnju jer su karakteristične za sve aluminijske legure pa tako i seriju 5000, su korozija u procijepu, galvanska korozija i biokorozija. Valovi zapljuskivanjem tzv. splash zone, područja velikog korozijskog potencijala, dovode sol i mikroorganizme koji svojim prisustvom uzrokuju koroziju u procijepu i biokoroziju. Aluminij i njegove legure vrlo su elektrokemijski aktivni i kad su izloženi morskoj vodi koja je dobar elektrolit, imaju sklonost korodiranja ukoliko dođu u dodir s drugim metalom. Na slikama 21 i 22 prikazane su korozija u procijepu i galvanska korozija aluminijskih legura.



Slika 21. Korozija u procijepu aluminijske legure nakon 11 godina u službi u morskom okolišu [7]



Slika 22. Galvanska korozija; stezni zatvarač čije je kućište izrađeno od aluminijske legure u kontaktu s ugljičnim čelikom od kojeg je izrađen stezni element na konstrukciji broda [8]

Glavni su ciljevi brodovlasnika u životnom vijeku broda maksimizirati učinkovitost u eksploataciji i minimizirati potrošnju goriva. Korozija kao makro fizička hrapavost povećava otpor trenja broda jer već hrapavost od 10  $\mu\text{m}$  utječe na rast potrošnje goriva za 1% [17]. Povećana potrošnja goriva rezultira povećanom emisijom štetnih plinova ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ) što predstavlja ozbiljan problem za okoliš. Uporabom korozijski postojanih materijala kao što su aluminijske legure reduciraju se efekti korozije i samim time produljuje vijek trajanja brodske konstrukcije.



## 5. PRIMJENA ALUMINIJSKIH LEGURA U MALOJ BRODOGRADNJI

Dok su primjerice u Australiji, mala aluminijska plovila zauzela veći dio tržišta, u Hrvatskoj je među brodicama do desetak metara duljine i dalje stakloplastika na prvome mjestu. Iako se mala brodogradnja u Hrvatskoj razvija vrlo polagano, ipak svjedočimo novim projektima koji krče put alu-brodogradnji. Jedna takva firma naziva „Colnago Marine“ pod vodstvom Luke Colnaga dokaz je isplativosti proizvodnje aluminijskih brodicama. Primjena aluminijskih legura u maloj brodogradnji bit će dana upravo na primjeru navedene firme.

Aluminijska legura AA – 5083, izričito korištena u proizvodnom procesu, u brodogradilište dolazi brodom u obliku limova (Slika 23) i profila (Slika 24) koji se onda slažu u radionici (Slika 25).



Slika 23. Limovi na skladištu

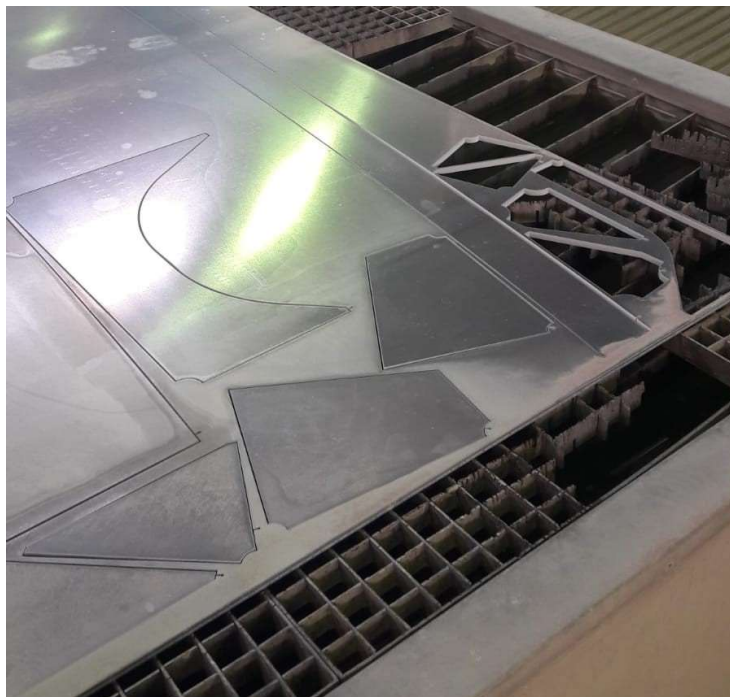


Slika 24. Profili na skladištu



Slika 25. Radionica tvrtke Colnago Marine

Budući da aluminij na atmosferskom tlaku razvija zaštitni sloj oksida, nije ga potrebno, za razliku od čelika, pjeskariti. Nakon brušenja i čišćenja površine legure slijedi rezanje na CNC stroju (Slika 26).



Slika 26. Rezanje legure na CNC stroju

Prednosti korištenja aluminijskih legura za izradu brodica su sljedeće:

- ➔ kao materijal za gradnju aluminij je lakši od stakloplastike i do 30% što za sobom povlači manji utrošak snage, manju potrošnju goriva te mogućnost većeg opterećenja
- ➔ ekološki su prihvatljivije i mogu se u potpunosti reciklirati dok je razgradnja stakloplastike skup i dug posao
- ➔ bolje hidrodinamičke značajke u usporedbi s čelikom i stakloplastikom
- ➔ ukoliko dođe do oštećenja dna broda, krpanje je znatno lakše nego kod brodova izrađenih od stakloplastike
- ➔ velika korozijska postojanost omogućuje to da se aluminijski konstrukcijski elementi ne trebaju predimenzionirati kako bi se spriječio gubitak čvrstoće koji se pojavljuje uslijed korozije kao što je to slučaj kod čelika
- ➔ lako održavanje.

Ipak, mana aluminiija očituje se u koraku proizvodnog procesa koji slijedi nakon rezanja, a to je zavarivanje. Oksid koji prekriva aluminij u obliku tanke čvrste prevlake ima talište na 2060°C što je mnogo više od tališta aluminiija koje je 660°C stoga se mora prije zavarivanja ukloniti. U suprotnom, pri taljenju osnovnog materijala aluminijski oksid uzrokuje uključke u zavaru u obliku tankog oksidnog sloja što utječe na smanjenje čvrstoće zavara.

Također, pri elektrolučnom zavarivanju taljivom elektrodom u zaštitnom plinu, metal se tali i očvršćuje zajedno s dodanim metalom. Aluminijske legure su podložne visokoj topivosti vodika u talini koji pri hlađenju ostaje „zarobljen“ u spoju te se na taj način dobiva porozni zavareni spoj. Vodik u talini je rezultat nečistoća na aluminiju, žici, plinu ili iz atmosfere. Zbog toga se zavarivanje aluminiija mora izvoditi isključivo u zatvorenom prostoru za razliku od čelika koji se uz odgovarajuće postupke zavarivanja može zavarivati i u otvorenom i zatvorenom prostoru. [18]

Aluminij je znatno mekši od čelika, stoga se prilikom zagrijavanja aluminiija i njegovih legura javlja problem savijanja. Iz tog razloga se primjenjuju L profili koji služe za ispravljanje limova te kvadratni profili za učvršćivanje konstrukcijskih elemenata. Na slici 27. prikazani su kvadratni profili za učvršćivanje zavareni za oplatu brodice.



Slika 27. Kvadratni profili zavareni za vanjsku oplatu

Za sprječavanje korozije i obraštanja, na brod je potrebno nanijeti zaštitne premaze. U Colnago Marine brodogradilištu se kao temeljeni premaz koristi dvokomponentni premaz na bazi epoksidne smole. Eventualne neravnine na brodu potrebno je zapuniti kitom (Slika 28). Kada je premaz suh na dodir slijedi prvi sloj antifoulinga, odnosno antivegetativnog premaza, a po specifikaciji proizvođača može se nanijeti i drugi sloj. Naposljetku, na nadvodni dio broda se nanosi boja na poliuretanskoj bazi.



Slika 28. Poravnavanje površine kitom [19]

Osim zaštite premazima, aluminijski brod potrebno je zaštititi katodnom zaštitom sa žrtvovanom cinkovom anodom (Slika 29 i 30).



Slika 29. Nova cinkova anoda



Slika 30. Istrošena cinkova anoda

Brodogradilište Colnago Marine primjer je kako se aluminij i aluminijske legure, osim za izradu nadgrađa (što je najčešći slučaj), mogu koristiti i za konstruiranje ostalih dijelova broda kao što su npr. broski nosači (Slika 31), vanjska oplata, dno, tankovi, namještaj, interijer itd. Drugi materijali koriste se samo na mjestima gdje aluminij, zbog svojih tehničkih specifikacija, ne može ili može samo djelomično naći svoju primjenu (postolje motora, propeler i slično). Na slikama 32 - 37 prikazane su aluminijske brodice u različitim proizvodnim fazama.



Slika 31. Nosači dna broda



Slika 32. Plovilo za odmor i razonodu Colnago 40



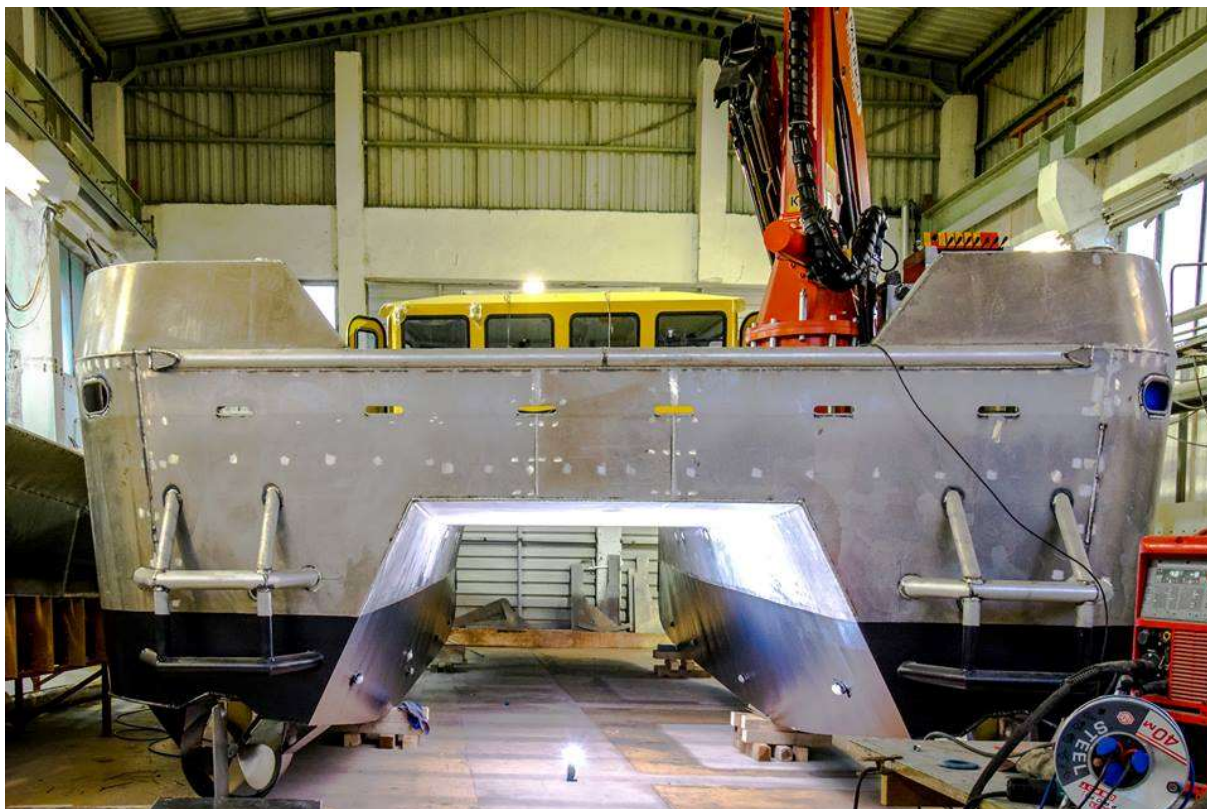
Slika 33. Colnago 40 u fazi bojanja trupa



Slika 34. Colnago 40 u službi [20]



Slika 35. Gumenjak Colnago 26 u službi [20]



Slika 36. Katamaran Colnago 40 Wcat u radionici [20]



Slika 37. Katamaran Colnago 40 Wcat u službi [20]



## 6. EKSPERIMENTALNI DIO

### 6.1. Uvod

U eksperimentalnom dijelu rada provedena su elektrokemijska ispitivanja aluminija u morskoj vodi s ciljem utvrđivanja korozivskih parametara materijala. Pritom je korištena aluminijska legura AA – 5083, dok je morski okoliš simulirala 3,5 % otopina natrijevog klorida (NaCl). Ispitivanja su provedena pri sobnoj (25 °C) i povišenoj temperaturi (40 °C).

### 6.2. Priprema uzorka

Prije početka izvođenja eksperimenta pristupilo se pripremi uzorka. Na aluminijskoj pločici širine 1,5 cm (Slika 38) najprije je bilo potrebno odabrati površinu koja će biti testirana na koroziju te ju pripremiti abrazivnim papirom A – 120, a zatim i očistiti etanolom kako bi se s površine uklonile sve neravnine i nečistoće koje bi mogle inicirati pojavu korozije u procijepu.



Slika 38. Odabrana aluminijska pločica (AA – 5083 H321)

Od cijele pločice uzet je krug promjera 1 cm, a ostatak pločice koja će biti uronjena u 3,5 % otopinu NaCl-a je prekriven ljepljivom trakom (Slika 39).



Slika 39. Površina koja će biti ispitivana na koroziju

Za formiranje rupice na ljepljivoj traci korišten je poseban mehanički uređaj čija je namjena utiskivanje rupe upravo promjera 1 cm (Slika 40).



Slika 40. Mehanički uređaj za formiranje rupice

### 6.3. Utvrđivanje kemijskog sastava

U Laboratoriju za zaštitu materijala Fakulteta strojarstva i brodogradnje, provedena je kvantitativna kemijska analiza odabranog uzorka. Maseni udio kemijskih elemenata određen je nerazornom metodom rendgenske fluorescentne spektrometrije (XRF) na uređaju XRF – Olympus, proizvođač: Innov-X Systems, Inc., USA, model: DS 2000-C, serijski broj: 50149. Na slici 41 prikazan je navedeni uređaj.



Slika 41. XRF uređaj za utvrđivanje kemijskog sastava materijala

Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 4 u kojoj je dana i usporedba s atestom materijala koji je dostavljen od naručitelja.

Tablica 4. Kemijski sastav uzorka i atest materijala

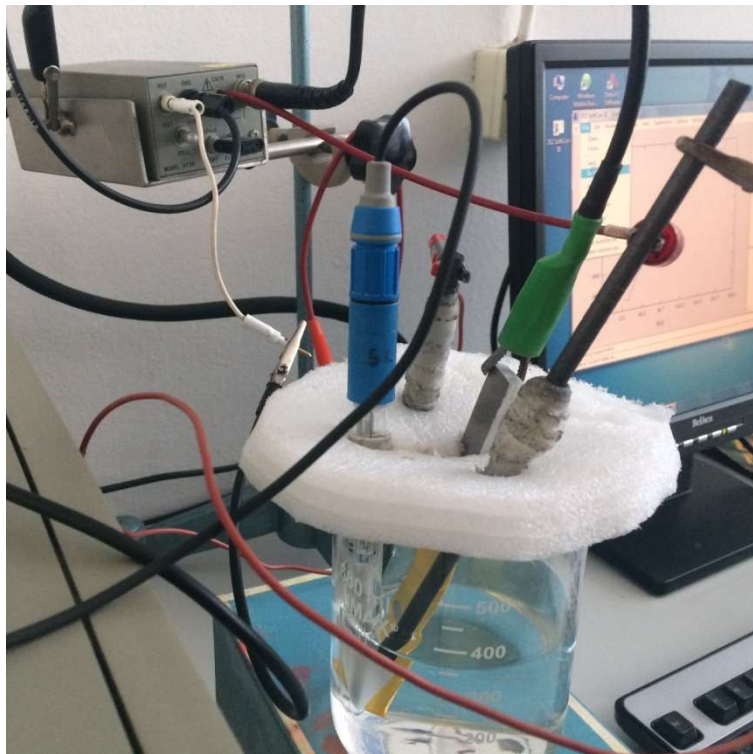
	Maseni udio, %									
	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Cr	Cu	Ti	Ni	Al
Uzorak	4,70	0,50	0,31	0,47	0,121	0,036	0,036	<0,05	<0,01	93,82
Atest materijala	4,74	0,55	0,35	0,22	0,13	0,072	0,033	0,022	0,010	ostatak

Iz dobivenih rezultata kemijske analize, aluminijska legura AA-5083 odgovara deklariranoj kvaliteti prema atestnoj dokumentaciji dostavljenoj od naručitelja.

#### 6.4. Elektrokemijska metoda ispitivanja korozije

Za ispitivanje korozije aluminijske legure AA – 5083 korištena je elektrokemijska metoda s tehnikom istosmjerne struje (eng. *DC – direct current technique*). Cilj ovakvoga mjerenja je snimanje krivulja polarizacije struja – napon. Na temelju anodnih i katodnih krivulja dobiva se korozijska slika o ponašanju legure u mediju koji je u ovom slučaju 3,5 % otopina natrijevog klorida.

U elektrokemijsku ćeliju postavljene su četiri elektrode: radna elektroda (ispitivana legura), referentna (zasićena kalomel elektroda) i dvije pomoćne elektrode (ugljične elektrode). Referentna elektroda služi kao standard prema kojem se mjeri potencijal radne elektrode, a pomoćna elektroda je vodič koji zatvara strujni krug, ali ne sudjeluje u polarizaciji. Na slici 42 prikazana je elektrokemijska ćelija s uronjenim elektrodama.



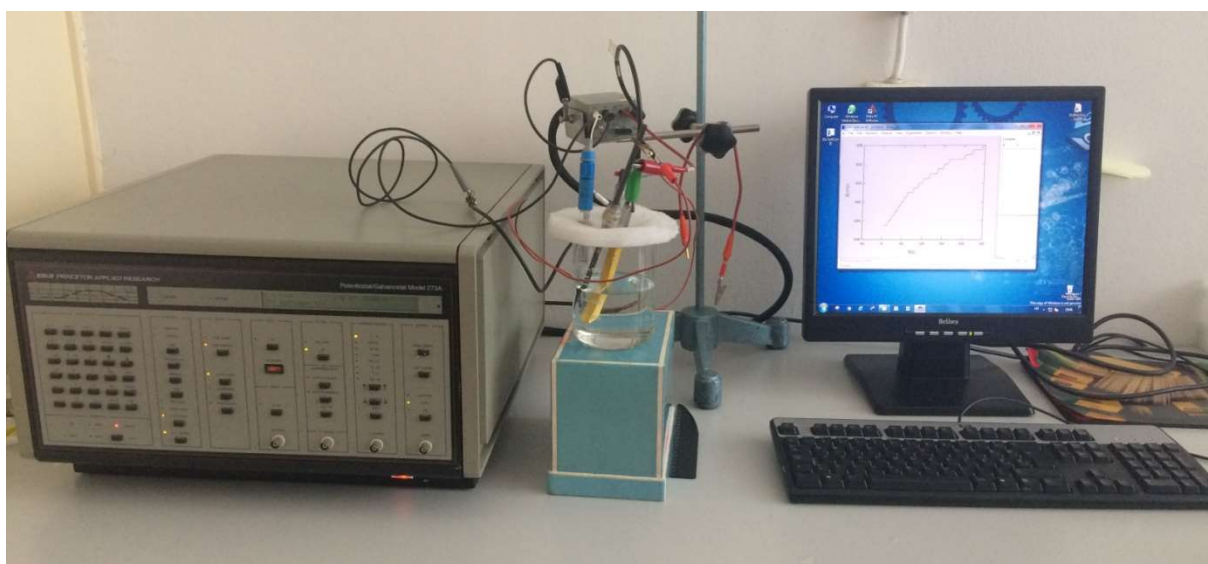
Slika 42. Elektrokemijska ćelija s uronjenim elektrodama

Elektrode se spajaju na potenciostat (elektronički uređaj pomoću kojega se kontrolira električni napon) ili galvanostat (uređaj za kontrolu toka električne struje). Polivalentan uređaj koji je korišten prilikom izvođenja eksperimenta dan je na slici 43.



Slika 43. Potenciostat/galvanostat (model 273 EG&E)

Kako bismo predočili rezultate ispitivanja na potenciostatu/galvanostatu korišten je SoftCorr III programski paket. Cjelokupna oprema prikazana je na slici 44.



Slika 44. Potenciostat/galvanostat, elektrokemijska ćelija s uronjenim elektrodama te računalo za praćenje rezultata ispitivanja

U programskom paketu SoftCorr III za ispitivanje korozijske postojanosti aluminijske legure AA – 5083 u 3,5 % otopini NaCl – a korištene su četiri metode:

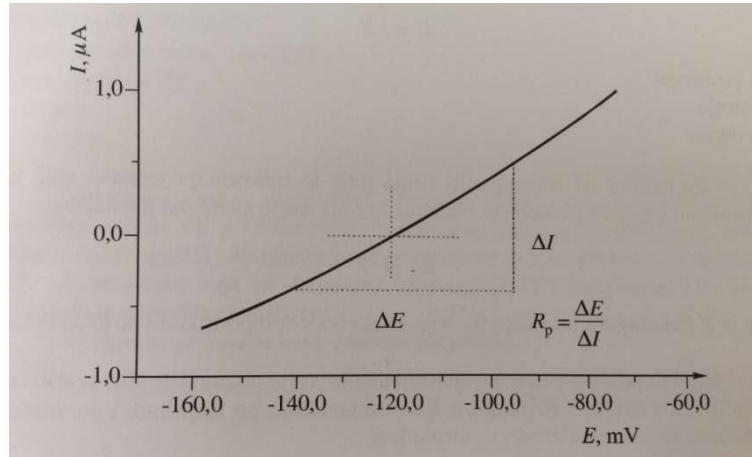
- Određivanje potencijala otvorenog strujnog kruga,  $E_{kor}$  metoda
- Linearna polarizacija
- Tafelova ekstrapolacija
- Ciklička polarizacija.

$E_{kor}$  metoda – Prije provedbe svake polarizacije potrebno je bilo sustav metal – elektrolit dovesti u stanje stabilnosti. To znači da se nakon uranjanja u elektrolit električni krug između radne i pomoćne elektrode drži otvorenim, a kao posljedica reakcije između legure i elektrolita dobiva se potencijal otvorenog strujnog kruga. Iznos tog potencijala se ne može direktno mjeriti nego se uspoređuje s potencijalom reference, a tome upravo služi zasićena kalomel elektroda čiji je potencijal poznat i iznosi 0,244 V pri temperaturi od 25 °C. Razlika potencijala između radne i referentne elektrode prati se kao funkcija vremena, a krivulje u dijagramu E-t ovise o vrsti materijala koji se ispituje. [21]

Nakon određenog vremena uspostavlja se približno stacionarno stanje na nekoj vrijednosti potencijala koji je jednak potencijalu otvorenog strujnog kruga  $E_{ok}$  ili korozijskom potencijalu  $E_{kor}$ . Praćenjem vremenskih promjena stacionarnog potencijala otvorenog strujnog kruga  $E_{ok}$  dobiva se kao rezultat korozijsko ponašanje ispitivanog materijala:

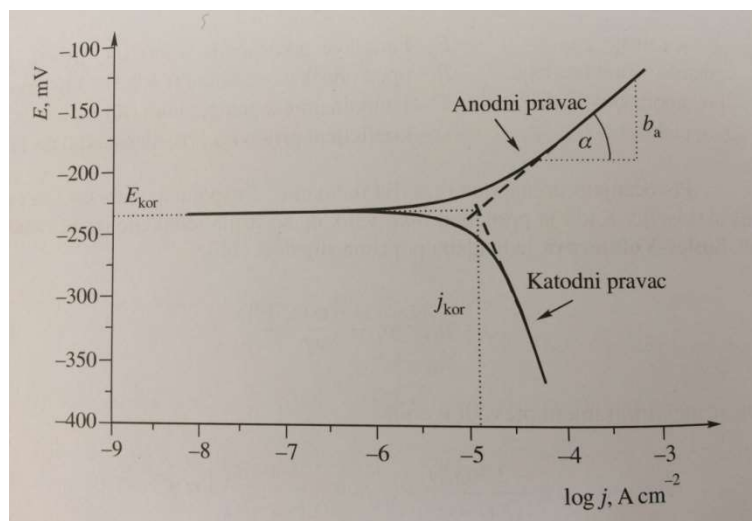
- pozitivne vrijednosti  $E_{ok}$  ukazuju na stabilnost elektrode (imunost na medij)
- negativne vrijednosti  $E_{ok}$  ukazuju na nestabilnost (koroziju)
- ukoliko se vrijednosti potencijala mijenjaju od negativnih prema pozitivnim tada dolazi do spontane pasivacije (privremeno stanje kemijske otpornosti).

Metodom linearne polarizacije mjeri se polarizacijski otpor  $R_p$ . Polarizacijski otpor je mjera otpora metala prema koroziji i definiran je nagibom krivulje potencijal – struja u neposrednoj blizini korozijskog potencijala ( $E = E_{kor} \pm 15 \text{ mV}$ ). Prema Florianu Mansfeldu<sup>1</sup> odnos struje i potencijala je u tom području linearan, a polarizacijski otpor računa se kako je prikazano na slici 45.



Slika 45. Određivanje polarizacijskog otpora prema F. Mansfeldu [22]

Tafelova ekstrapolacija – mjeri se korozijska struja  $i_{kor}$  pomoću koje se određuje brzina korozije  $v_{kor}$ . U Tafelovoj metodi izračunavaju se tako zvane Tafelove konstante koje predstavljaju nagibe anodnog i katodnog dijela krivulje  $\beta_A$  i  $\beta_K$ . Ekstrapolacijom anodnih i katodnih pravaca u njihovom sjecištu određuju se vrijednosti gustoće korozijske struje i potencijala. Rezultati dobiveni anodnom i katodnom polarizacijom u širokom području od korozijskog potencijala ( $E = E_{kor} \pm 250 \text{ mV}$ ) prikazuju se grafički u polulogaritamskom obliku ( $E - j \log$ ). Princip Tafelove ekstrapolacije prikazan je na slici 46.



Slika 46. Princip Tafelove ekstrapolacije [22]

<sup>1</sup> Florian Mansfeld je američki profesor emeritus koji je radio na Fakultetu u Južnoj Kaliforniji na Zavodu kemijskog inženjerstva i materijala, a uža specijalnost mu je elektrokemija i istraživanje korozije.

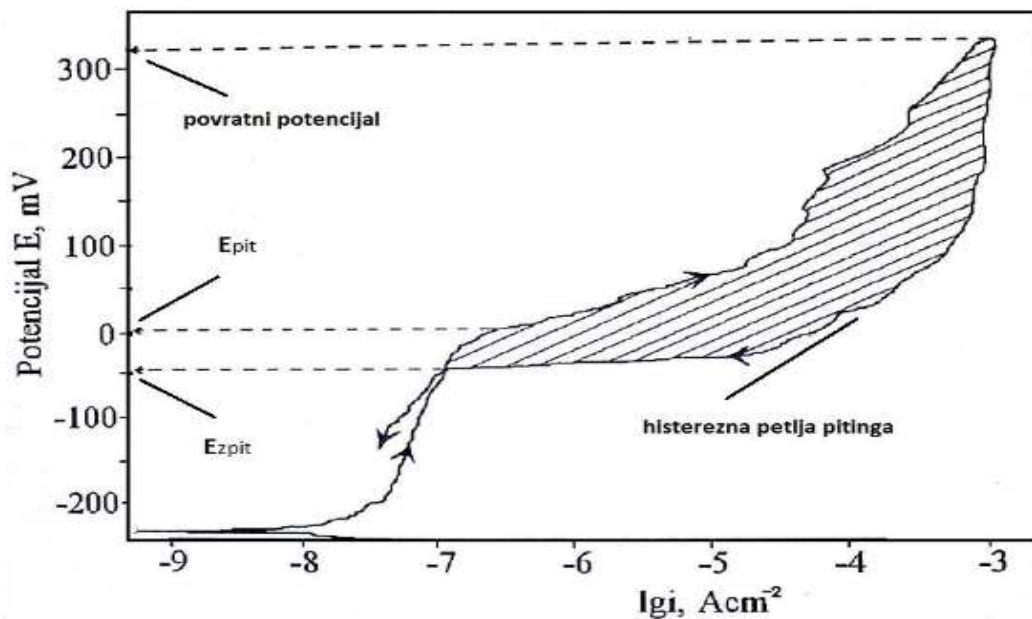
Cikličkom polarizacijom određuje se tendencija materijala prema rupičastoj koroziji, odnosno pittingu. Potencijal uzorka se kontinuirano kreće u anodnom pravcu sve dok se ne postigne određena jačina struje između radne i pomoćne elektrode, a zatim se potencijal vraća u katodnom pravcu do kraja anodnog područja što tada predstavlja područje kružnog kretanja potencijala. U dijagramu se prikazuje odnos potencijala radne elektrode i logaritma neto struje koja protječe između radne i pomoćne elektrode. Potencijal pittinga, ukoliko do pojave pittinga dolazi, razaznaje se po skoku vrijednosti struje koja se zapaža u fazi kretanja potencijala u anodnom pravcu.

Pri kretanju potencijala u katodnom pravcu, ukoliko dolazi do pittinga, nastaje histerezo odstupanje vrijednosti struje u odnosu na anodni pravac. Veće histerezo odstupanje ukazuje na veću sklonost rupičastoj koroziji.

Potencijal gdje se histerezo petlja zatvara predstavlja potencijal repasivacije ili potencijal za zaštitu od pitting korozije ( $E_{zpit}$ ).

Za vrijednosti potencijala koje su negativnije u odnosu na vrijednost potencijala repasivacije, metal neće podleći pittingu.

Ukoliko je zaštitni potencijal uzorka ( $E_{zpit}$ ) pozitivniji od potencijala pittinga ( $E_{pit}$ ) tendencija ka rupičastoj koroziji ne postoji. U suprotnom slučaju, doći će do pittinga ispitnog uzorka. Na slici 47 dan je primjer izgleda dijagrama cikličke polarizacije.



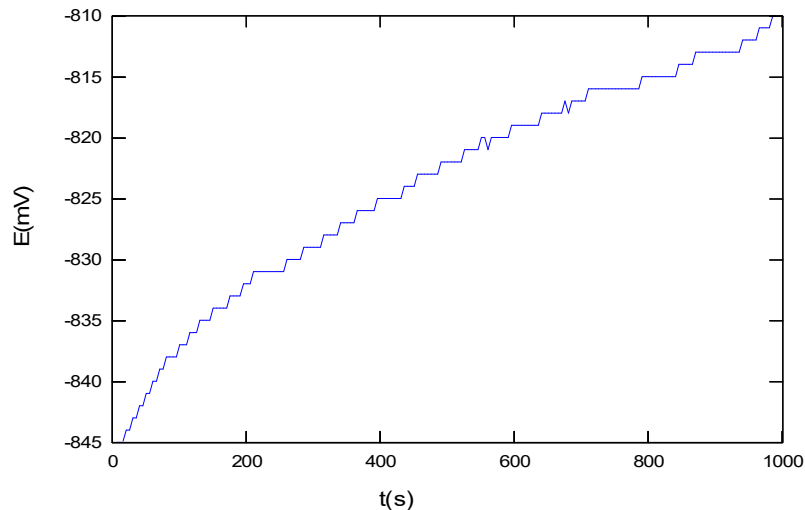
Slika 47. Izgled dijagrama cikličke polarizacije u slučaju kada je materijal sklon pittingu [21]



### 6.4.1. Provedba eksperimenta pri sobnoj (25°C) temperaturi

#### 6.4.1.1. Mjerenje potencijala otvorenog strujnog kruga prije linearne polarizacije

Slika 48 prikazuje rezultate mjerenja potencijala otvorenog strujnog kruga aluminijske legure AA - 5083 pri sobnoj temperaturi u 3,5% otopini NaCl –a prije provedbe linearne polarizacije.

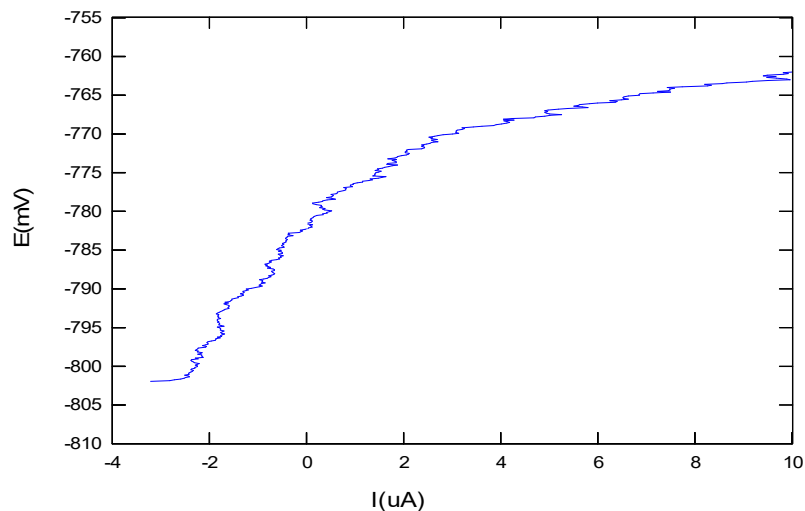


Slika 48. E – t dijagram uzorka prije linearne polarizacije pri 25°C

Promjena potencijala od negativnih prema pozitivnim vrijednostima ukazuje na spontanu pasivaciju ispitanog uzorka.

#### 6.4.1.2. Linearna polarizacija

Na slici 49 dan je dijagram linearne polarizacije uzorka pri sobnoj temperaturi.

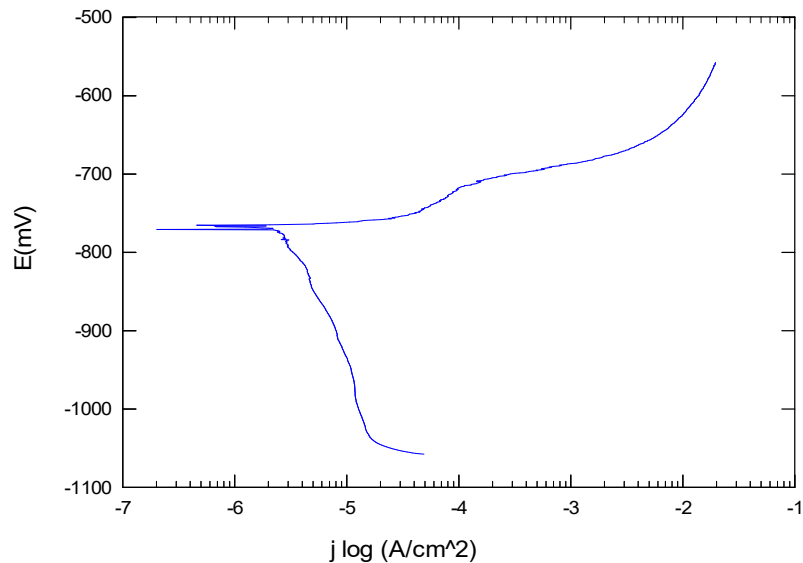


Slika 49. Linearna polarizacija legure AA – 5083 pri 25°C

Rezultati ispitivanja dani su u tablici 5.

### 6.4.1.3. Tafelova ekstrapolacija

Na slici 50 dan je dijagram Tafelove ekstrapolacije uzorka pri sobnoj temperaturi.

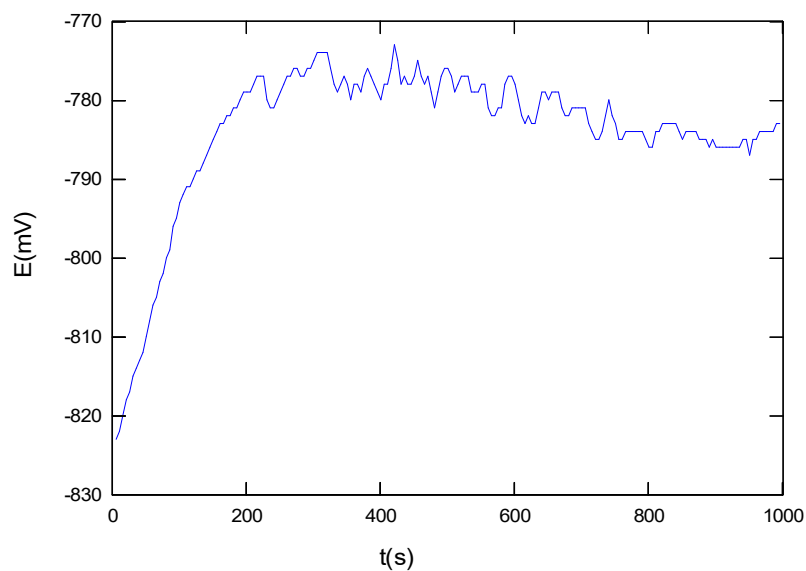


Slika 50. Tafelova ekstrapolacija legure AA - 5083 pri 25°C

Rezultati ispitivanja dani su u tablici 5.

### 6.4.1.4. Mjerenje potencijala otvorenog strujnog kruga prije cikličke polarizacije

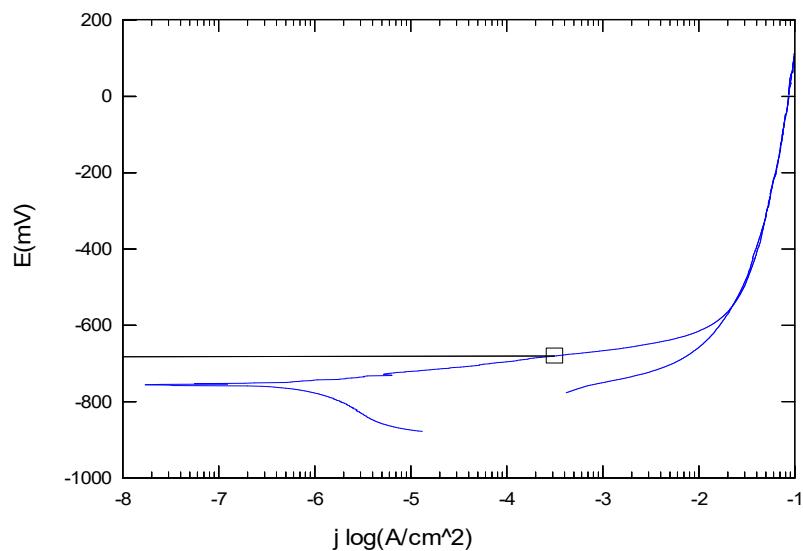
Slika 51 prikazuje rezultate mjerenja potencijala otvorenog strujnog kruga aluminijske legure AA - 5083 pri sobnoj temperaturi u 3,5% otopini NaCl –a prije provedbe cikličke polarizacije.



Slika 51. E – t dijagram uzorka prije cikličke polarizacije pri 25°C

#### 6.4.1.5. Ciklička polarizacija

Na slici 52 dan je dijagram cikličke polarizacije uzorka pri sobnoj temperaturi.



Slika 52. Ciklička polarizacija legure AA – 5083 pri 25°C

Rezultati ispitivanja dani su u tablici 5.

#### 6.4.1.6. Očitane vrijednosti i površina uzorka

U tablici 5 dani su rezultati ispitivanja uzorka aluminijske legure AA - 5083 pri sobnoj (25 °C) temperaturi u 3,5% otopini NaCl - a.

Tablica 5. Rezultati DC ispitivanja za leguru AA – 5083 pri 25 °C

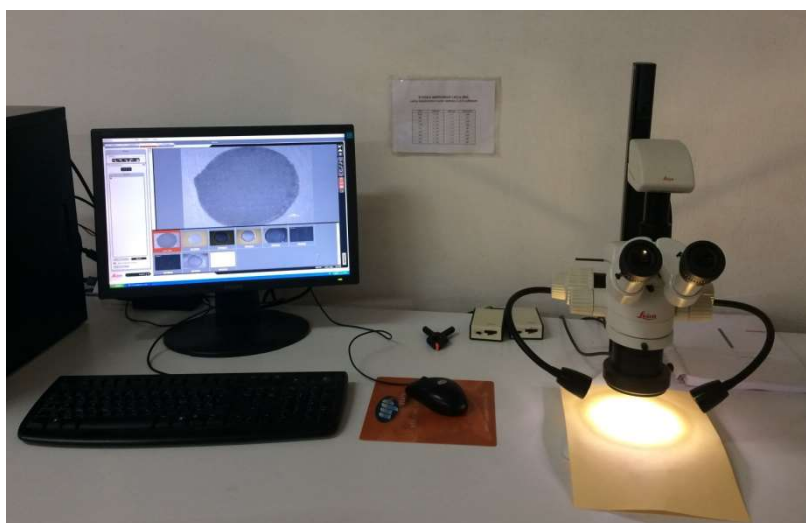
T [°C]	$E_{kor}$ vs ZKE [mV]	$I_{kor}$ [μA]	$\beta_A$ [V/dek]	$\beta_C$ [V/dek]	$v_{kor}$ [mm/god]	$R_p$ [kOhm]	$E_{pit}$ [mV]	$\Delta E$ [mV]
25	-810	3,369	$33,77 \cdot 10^{-3}$	$383,5 \cdot 10^{-3}$	$37,77 \cdot 10^{-3}$	12,26	-678	132

Određena brzina korozije za aluminijsku leguru AA – 5083 u 3,5 % otopini NaCl - a pri 25°C iznosi  $37,77 \cdot 10^{-3}$  mm/god.

Uzorci su prije i poslije polarizacija snimljeni mikroskopom Leica M26 (Slika 53 i 54) u Laboratoriju za zaštitu materijala.

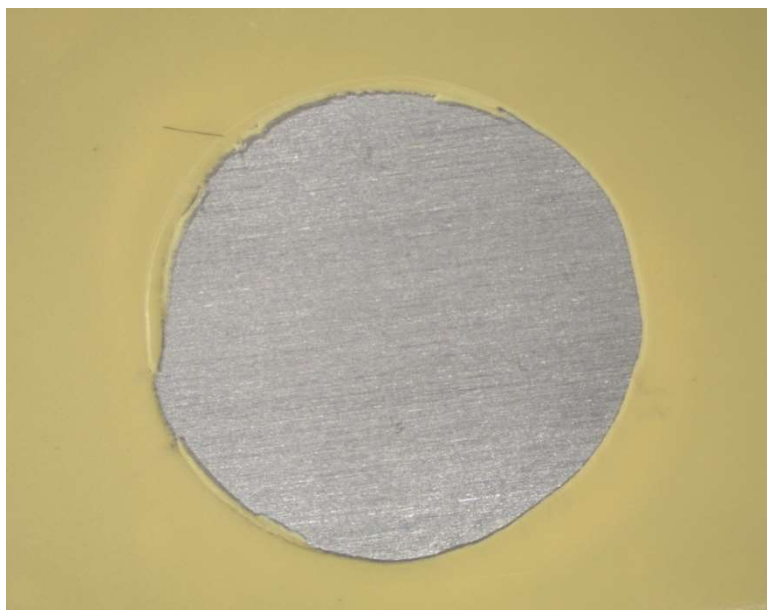


Slika 53. Mikroskop Leica M26



Slika 54. Mikroskop Leica M26 i računalo s pripadajućim programom za analizu površine uzorka

Na slikama 55 i 56 prikazana je površina uzorka prije, odnosno poslije Tafelove ekstrapolacije.

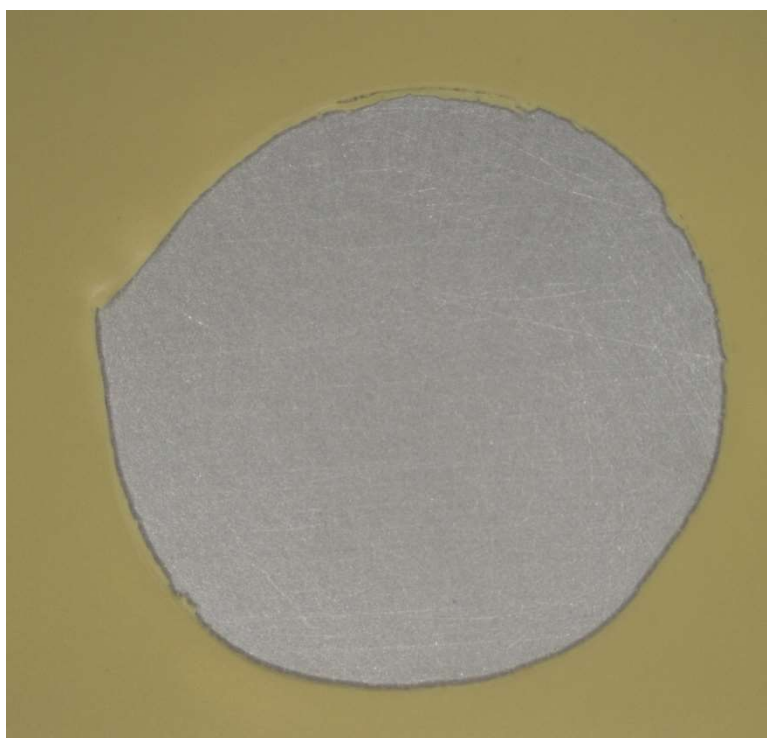


Slika 55. Površina uzorka prije Tafelove ekstrapolacije

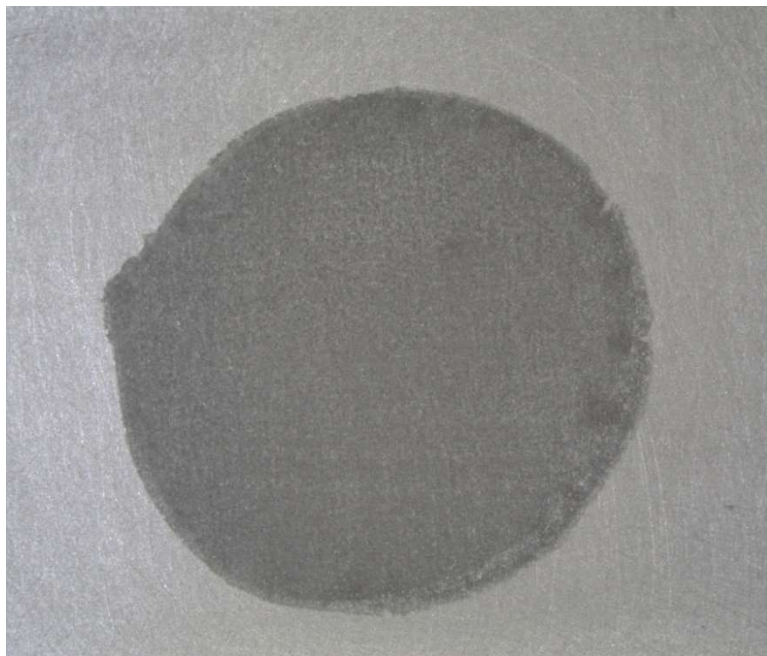


Slika 56. Površina uzorka poslije Tafelove ekstrapolacije; vidljiva rupičasta korozivna oštećenja

Na slikama 57 i 58 prikazana je površina uzorka prije, odnosno poslije cikličke polarizacije.



Slika 57. Površina uzorka prije cikličke polarizacije

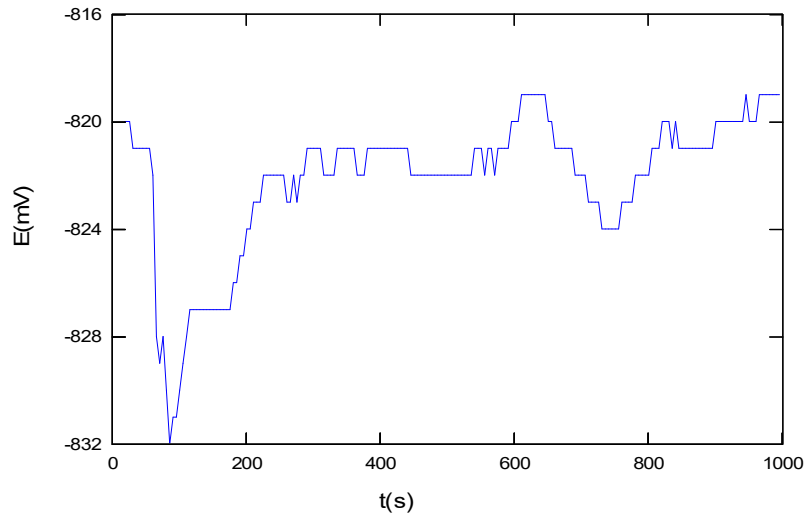


Slika 58. Površina uzorka poslije cikličke polarizacije; vidljivo je intenzivno korozijsko razaranje po čitavoj ispitanoj površini

## 6.4.2. Provedba eksperimenta pri povišenoj (40 °C) temperaturi

### 6.4.2.1. Mjerenje potencijala otvorenog strujnog kruga prije linearne polarizacije

Slika 59 prikazuje rezultate mjerenja potencijala otvorenog strujnog kruga aluminijske legure AA - 5083 pri povišenoj temperaturi u 3,5% otopini NaCl –a prije provedbe linearne polarizacije.

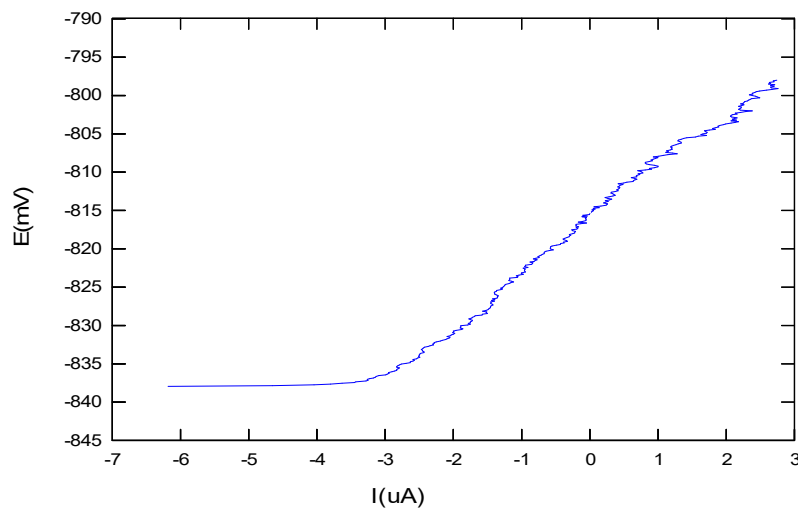


Slika 59. E – t dijagram uzorka prije linearne polarizacije pri 40°C

Dijagram pokazuje nestabilnost ispitivanog uzorka u 3,5% otopini NaCl - a.

### 6.4.2.2. Linearna polarizacija

Na slici 60 dan je dijagram linearne polarizacije uzorka pri povišenoj temperaturi.

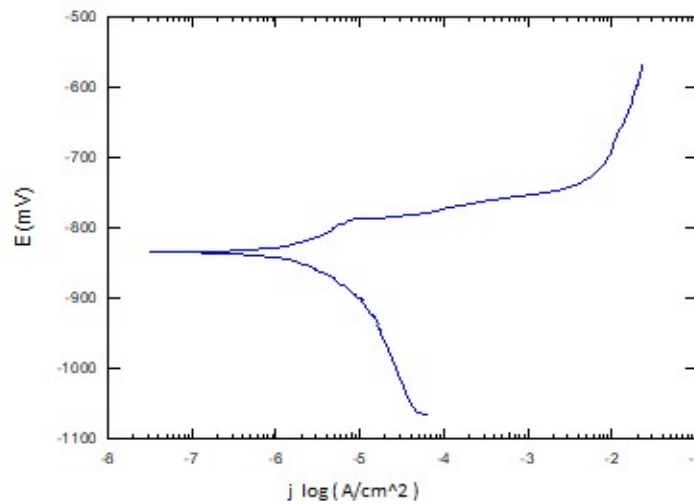


Slika 60. Linearna polarizacija legure AA – 5083 pri 40°

Rezultati ispitivanja dani su u tablici 6.

### 6.4.2.3. Tafelova ekstrapolacija

Na slici 61 dan je dijagram Tafelove ekstrapolacije uzorka pri povišenoj temperaturi.

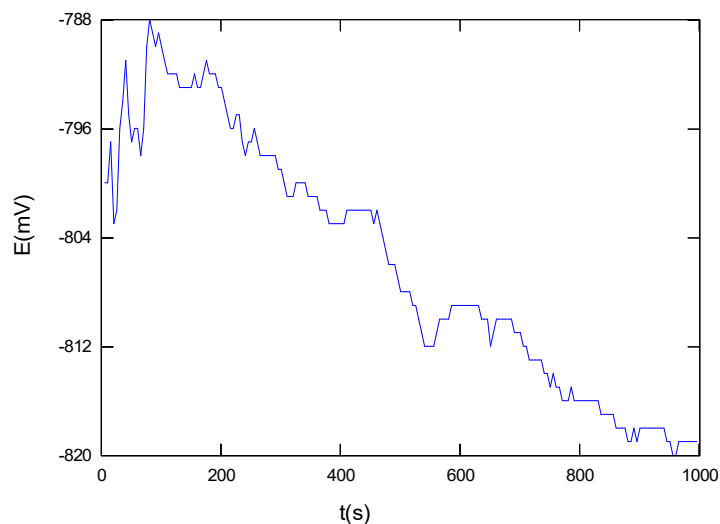


Slika 61. Tafelova ekstrapolacija uzorka pri 40°C

Rezultati ispitivanja su dani u tablici 6.

### 6.4.2.4. Mjerenje potencijala otvorenog strujnog kruga prije cikličke polarizacije

Slika 62 prikazuje rezultate mjerenja potencijala otvorenog strujnog kruga aluminijske legure AA - 5083 pri povišenoj temperaturi u 3,5% otopini NaCl –a prije provedbe cikličke polarizacije.

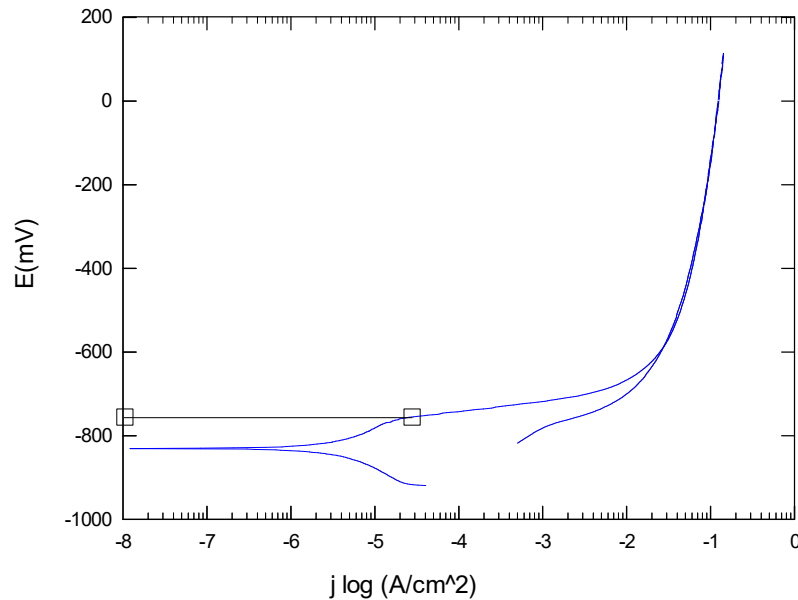


Slika 62. E – t dijagram uzorka prije cikličke polarizacije pri 40°C



#### 6.4.2.5. Ciklička polarizacija

Na slici 63 dan je dijagram cikličke polarizacije uzorka pri povišenoj temperaturi.



Slika 63. Ciklička polarizacija uzorka pri 40°C

Rezultati ispitivanja su dani u tablici 6.

#### 6.4.2.6. Očitane vrijednosti i površina uzorka

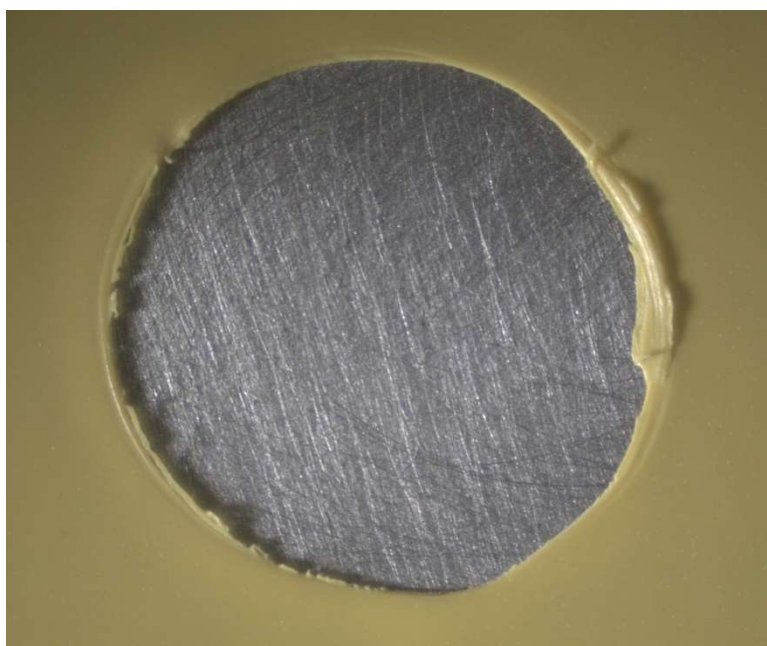
U tablici 6 dani su rezultati ispitivanja uzorka aluminijske legure AA - 5083 pri povišenoj (40°C) temperaturi u 3,5% otopini NaCl - a.

Tablica 6. Rezultati DC ispitivanja za leguru AA – 5083 pri 40 °C

T [°C]	$E_{kor}$ vs ZKE [mV]	$I_{kor}$ [ $\mu$ A]	$\beta_A$ [V/dek]	$\beta_C$ [V/dek]	$v_{kor}$ [mm/god]	$R_p$ [kOhm]	$E_{pit}$ [mV]	$\Delta E$ [mV]
40	-819	6,817	$203,6 \cdot 10^{-3}$	$279,1 \cdot 10^{-3}$	$76,43 \cdot 10^{-3}$	6,972	-757	62

Određena brzina korozije za aluminijsku leguru AA – 5083 u 3,5 % otopini NaCl - a pri 40°C iznosi  $76,43 \cdot 10^{-3}$  mm/god.

Na slikama 64 i 65 prikazana je površina uzorka prije, odnosno poslije Tafelove ekstrapolacije.

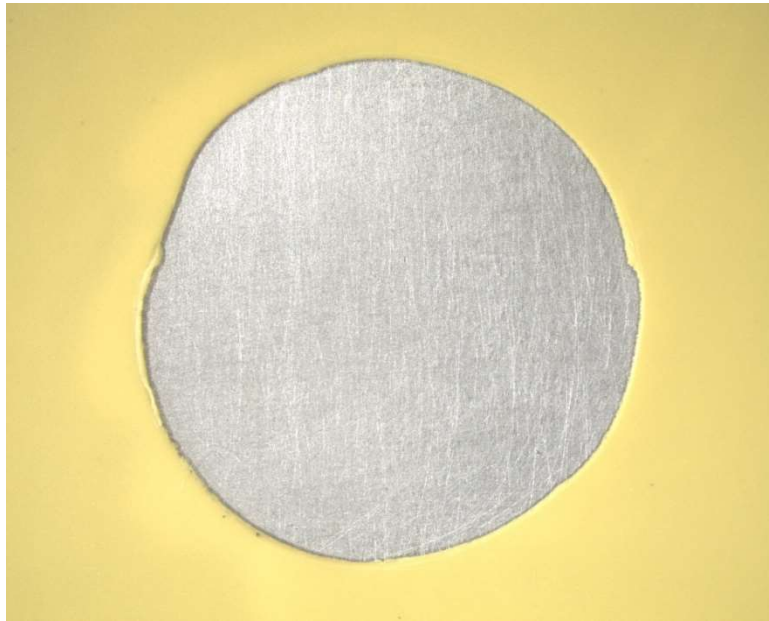


Slika 64. Površina uzorka prije Tafelove ekstrapolacije

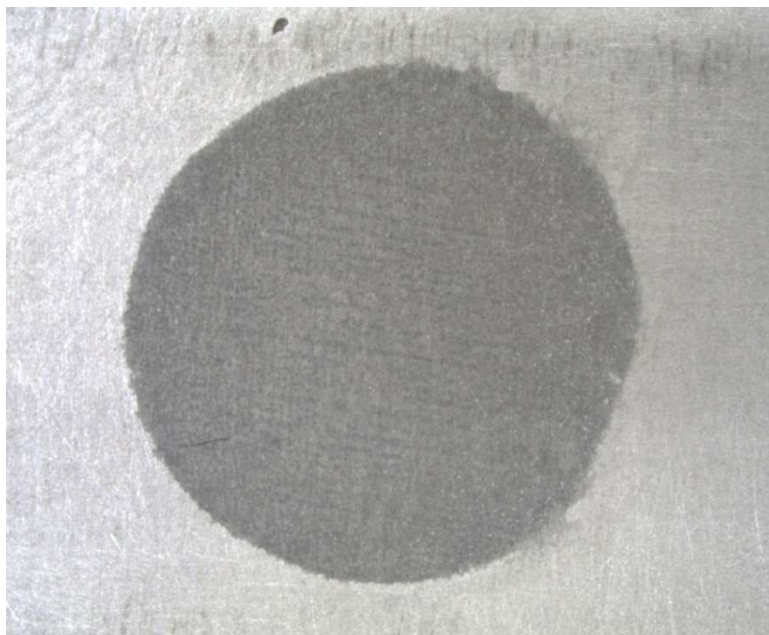


Slika 65. Površina uzorka poslije Tafelove ekstrapolacije; vidljiva rupičasta korozivna oštećenja

Na slikama 66 i 67 prikazana je površina uzorka prije, odnosno poslije cikličke polarizacije.



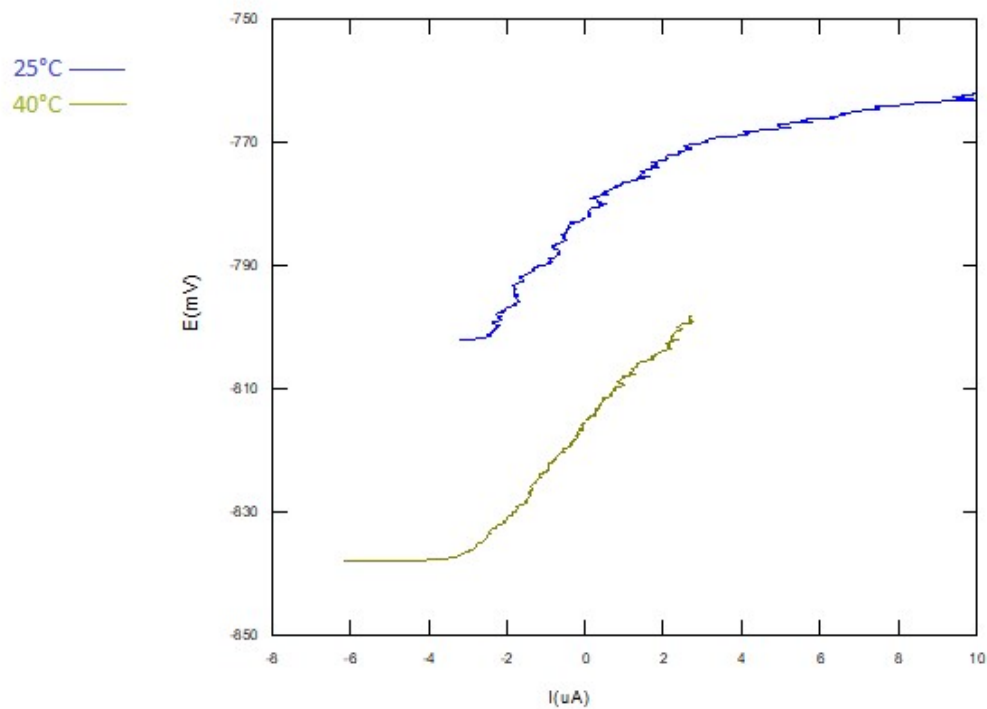
Slika 66. Površina uzorka prije cikličke polarizacije



Slika 67. Površina uzorka poslije cikličke polarizacije; vidljivo je intenzivno korozivno razaranje po čitavoj ispitanoj površini

### 6.5. Usporedba rezultata

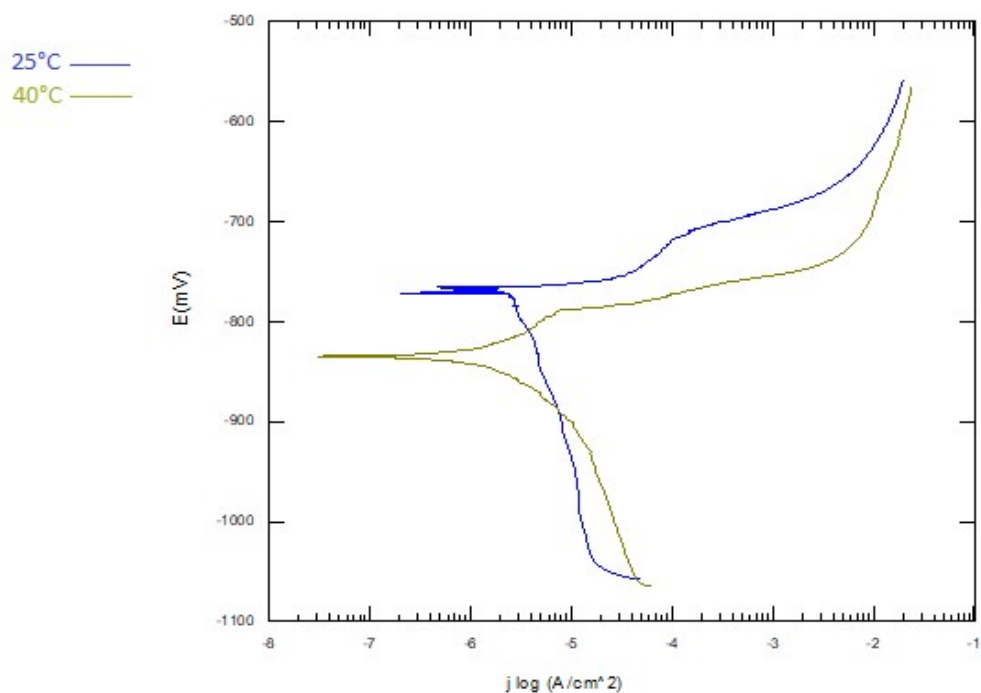
Na slici 68 dan je usporedni dijagram linearne polarizacije aluminijske legure AA – 5083 nakon provedbe eksperimenta pri sobnoj i povišenoj temperaturi.



Slika 68. Dijagram linearne polarizacije uzorka za sobnu i povišenu temperaturu

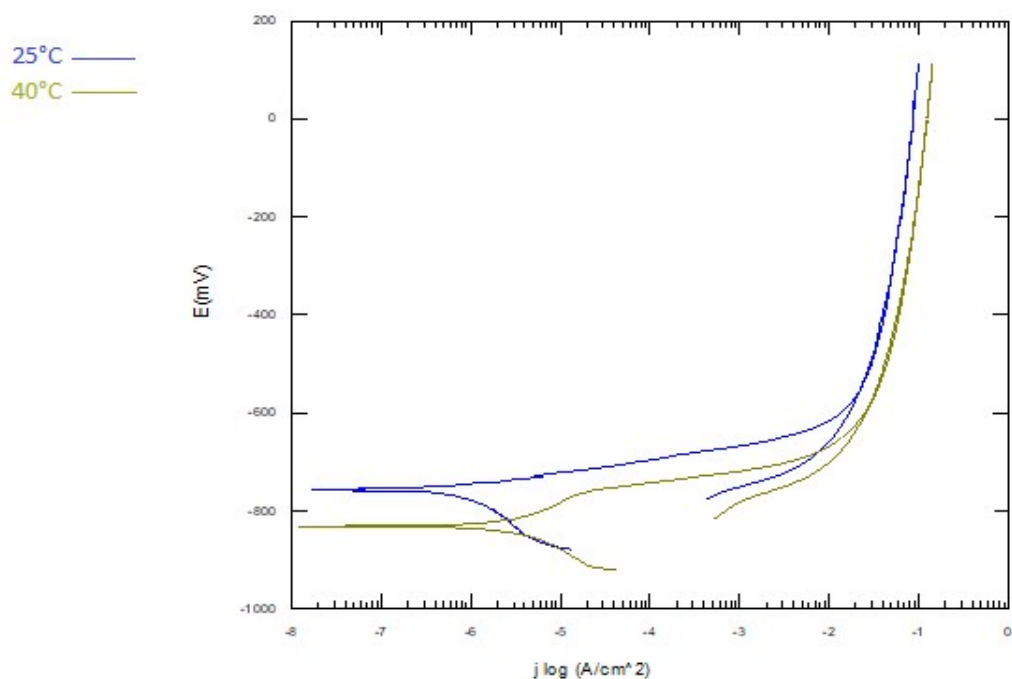
Negativniji korozijski potencijal aluminijske legure AA – 5083 pri 40°C ukazuje na manju korozijsku otpornost u 3,5 % otopini NaCl – a u odnosu na ispitivanje provedeno pri 25°C.

Slika 69 prikazuje usporedni dijagram Tafelove ekstrapolacije aluminijske legure AA – 5083 nakon provedbe eksperimenta pri sobnoj i povišenoj temperaturi.



Slika 69. Dijagram Tafelove ekstrapolacije uzorka za sobnu i povišenu temperaturu

Slika 70 prikazuje usporedni dijagram cikličke polarizacije aluminijske legure AA – 5083 nakon provedbe eksperimenta pri sobnoj i povišenoj temperaturi.



Slika 70. Dijagram cikličke polarizacije uzorka za sobnu i povišenu temperaturu

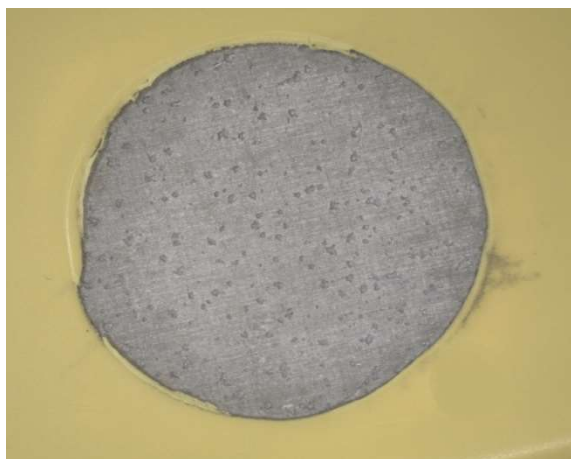
U tablici 7 dani su rezultati provedbe eksperimenta pri sobnoj i povišenoj temperaturi.

Tablica 7. Korozijske veličine aluminijske legure AA – 5083 uronjene u 3,5 % otopinu NaCl – a nakon ispitivanja na sobnoj (25°C) i povišenoj (40°C) temperaturi

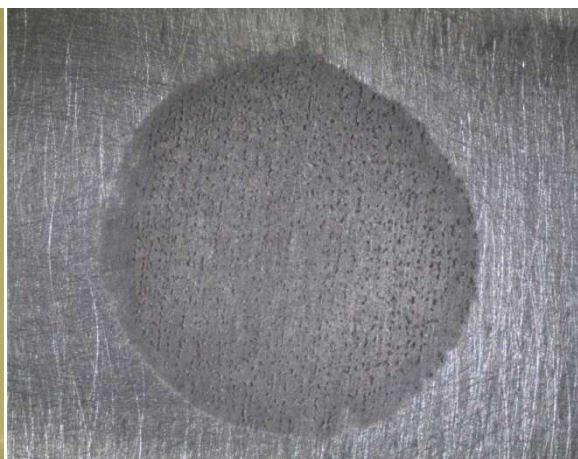
T [°C]	$E_{korVS ZKE}$ [mV]	$I_{kor}$ [ $\mu A$ ]	$\beta_A$ [V/dek]	$\beta_C$ [V/dek]	$v_{kor}$ [mm/god]	$R_p$ [kOhm]	$E_{pit}$ [mV]	$\Delta E$ [mV]
25	-810	3,369	$33,77 \cdot 10^{-3}$	$383,5 \cdot 10^{-3}$	$37,77 \cdot 10^{-3}$	12,26	-678	132
40	-819	6,817	$203,6 \cdot 10^{-3}$	$279,1 \cdot 10^{-3}$	$76,43 \cdot 10^{-3}$	6,972	-757	62

Brzina korozije aluminijske legure AA – 5083 je dvostruko veća pri povišenoj temperaturi nego pri sobnoj te je u skladu s time, polarizacijski otpor dvostruko manji u slučaju povišene temperature.

Na slikama 71 i 72 prikazana je površina uzorka legure AA – 5083 poslije Tafelove ekstrapolacije pri sobnoj i povišenoj temperaturi.



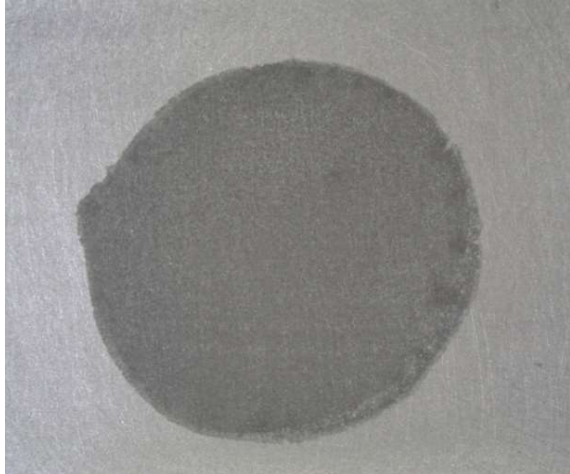
Slika 71. Površina uzorka poslije Tafelove ekstrapolacije pri sobnoj temperaturi



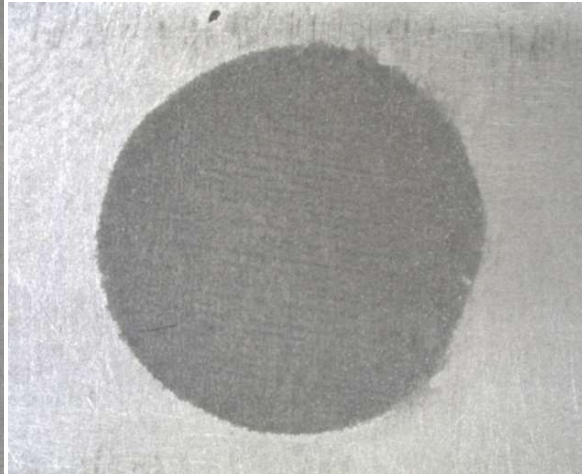
Slika 72. Površina uzorka poslije Tafelove ekstrapolacije pri povišenoj temperaturi

Poslije provedene Tafelove ekstrapolacije, vidljivo je kako su nastale rupice na površini uzorka mnogobrojnije nakon ispitivanja pri temperaturi od 40°C.

Na slikama 73 i 74 prikazana je površina uzorka legure AA – 5083 poslije cikličke polarizacije pri sobnoj i povišenoj temperaturi.



Slika 73. Površina uzorka poslije cikličke polarizacije pri sobnoj temperaturi



Slika 74. Površina uzorka poslije cikličke polarizacije pri povišenoj temperaturi

Poslije provedene cikličke polarizacije, u oba slučaja došlo je do otapanja uzorka no ono je opet izraženije nakon zagrijavanja 3,5 % otopine natrijevog klorida na temperaturu od 40°C.

Usporedbom izračunatih vrijednosti iz tablice 7 te vizualnom procjenom možemo zaključiti kako su nastala korozijska oštećenja na ispitanoj aluminijskoj leguri AA – 5083, znatno veća pri povišenoj temperaturi nego sobnoj.

Ipak, kako bi se stekao pravi dojam o korozijskim veličinama vezanim za aluminij, potrebno ih je usporediti s pripadajućim veličinama čelika, najčešće korištenog materijala za izradu brodskog trupa velikih brodova.

U tablici 8. dana je brzina korozije za aluminijsku leguru AA – 5083 te za opći konstrukcijski čelik nakon ispitivanja u 3,5 % otopini NaCl – a pri sobnoj temperaturi.

Tablica 8. Usporedba brzine korozije aluminijske legure AA – 5083 i općeg konstrukcijskog čelika nakon ispitivanja 3,5 % otopini NaCl – a pri sobnoj (25°C) temperaturi

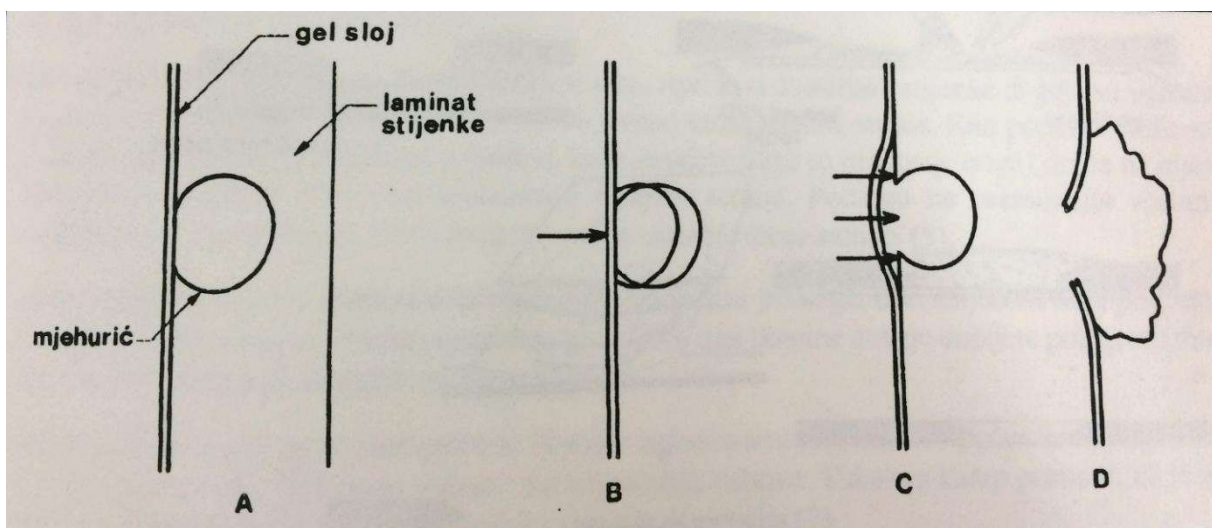
AA - 5083	Opći konstrukcijski čelik
$v_{kor} = 37,77 \cdot 10^{-3} \text{mm/god}$	$v_{kor} = 231 \cdot 10^{-3} \text{mm/god}$

Iz navedenog, vidljivo je da je brzina korozije aluminijske legure AA – 5083 šest puta manja od brzine korozije općeg konstrukcijskog čelika.

Tehnološki prihvatljiva brzina opće korozije konstrukcijskog materijala iznosi maksimalno 0,1 mm/god, stoga se može zaključiti kako je opći konstrukcijski čelik potrebno zaštititi premazima dok u slučaju primjene aluminija, to nije potrebno.

## 6.6. Osvrt na stakloplastične brodice

Kada je riječ o stakloplastičnim brodicama, kod njih je karakteristična pojava osmoze. Stakloplastična stijenka, gel sloj i laminat propuštaju molekule vode. Problem nastaje zbog toga što se voda skuplja u vrlo malim šupljinama te na tim mjestima kreće rastvarati lakše topive dijelove laminata, zbog drugačije gustoće stvara se i veći pritisak u šupljini što izaziva njezino povećanje i na kraju prskanje i probijanje gel sloja. Više takvih mjehurića oslabljuje laminat. Osim kad je osmoza već znatno zahvatila trup, prve kraterne teško je zapaziti jer ih prekriva podvodni antivegetativni premaz. [23] Na slici 75. prikazano je napredovanje procesa osmoze na stakloplastici; A – mjehurić zraka zaostao je u laminatu ili je stvoren djelovanjem hlapljivih sastojaka smole, B – voda prolazi kroz gel sloj i skuplja se u mjehuriću gdje kreće rastvarati lakše topive dijelove laminata, C – otopina u mjehuriću postaje sve veća pa kreće izdizanje gel sloja, D – gel sloj je naprsnuo i voda ima slobodan pristup do laminata koji se zatim postepeno raslojava.



Slika 75. Napredovanje osmoze na stakloplastici [23]



## 7. ZAKLJUČAK

Na temelju poznavanja svojstava aluminijskih legura te provedenog eksperimenta, može se zaključiti kako je izrada malih brodova od aluminijskih legura svakako pouzdana.

S korozijskog stajališta, u sredinama kakva su more, rijeka i jezera, čije je djelovanje neprijateljsko prema materijalima, otpornost prema koroziji najvažniji je kriterij. Ono određuje vijek trajanja opreme i njezinu operativnu sposobnost. Iskustvo pokazuje da velika plovila i mali čamci svih vrsta napravljeni od AA – 5083, AA – 5086, AA – 6005A i AA – 6061 legure, mogu ostati u uporabi nekoliko desetljeća bez pojavljivanja značajnije korozije. [3]

Sa stajališta održavanja, ono se svodi na minimum uz redovno premazivanje izloženih površina i zamjeni zaštitne anode.

Potreban je veći početni kapital za izradu aluminijskog broda i proizvodni proces je u koječemu osjetljiv (npr. mogućnost zavarivanja aluminijskih legura samo na zatvorenom), ali dugoročna isplativost je očita. Brodski trupovi od aluminijskih legura su 40 – 50 % lakši nego od čelika, odnosno 30 % lakši od stakloplastike, stoga, kao što je prethodno u radu navedeno, za istu snagu motora su brži. A osnovna je težnja svakog brodograditelja pri osnivanju broda odrediti formu trupa koja će pri plovidbi zadanim brzinom stvarati što je moguće manji otpor. To znači da će energija koju treba utrošiti na gibanje broda biti manja. [24]

Provedenim eksperimentalnim radom utvrđeno je da porastom temperature ispitnog medija, brzina korozije aluminijske legure AA - 5083 raste, zbog čega je potrebno voditi računa o eksploatacijskim uvjetima kod odabira konstrukcijskog materijala za izradu brodice.

Budući da temperatura mora uglavnom iznositi do 25°C, ispitivanjima je utvrđeno da se sa stajališta brzine korozije aluminijska legura AA - 5083 može koristiti za izradu trupa brodice.

Na brodovlasniku je da odluči kakav brod želi, ali zbog svojih naglašenih prednosti, svakako se aluminij treba uzeti u obzir.

## LITERATURA

- [1] Predavanja iz kolegija Tehnologija brodogradnje I, Neven Hadžić, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu
- [2] Tehnologija zaštite od korozije, I. Esih, Z. Dugi, Školska knjiga, Zagreb
- [3] Predavanja iz kolegija Konstrukcija broda I, Jerolim Andrić, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu
- [4] [www.nauticalweb.com/superyacht/494/moonen/84eng.htm](http://www.nauticalweb.com/superyacht/494/moonen/84eng.htm)
- [5] Korozija i zaštita premazima, I. Juraga, V. Alar, I. Stojanović, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, 2014.
- [6] Diplomski rad, Blaženka Huljev, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, Zagreb 2008.
- [7] Corrosion atlas, Third edition, Elsevier Science, 1997.
- [8] Kemijska postojanost metala, V. Alar, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, Zagreb 2015.
- [9] [www.clubmarine.co.nz/internet/clubnz.nsf/docs/MG19-5+Technical](http://www.clubmarine.co.nz/internet/clubnz.nsf/docs/MG19-5+Technical)
- [10] Kemijska i elektrokemijska korozija, V. Alar, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, Zagreb 2017.
- [11] Napetosa korozija, Horvat, Samardžić, Kondić, Veleučilište u Varaždinu; Strojarški fakultet u Slavanskom Brodu, 2011.
- [12] [www.citimarinestore.com/citiguide/michigan-propellers](http://www.citimarinestore.com/citiguide/michigan-propellers)
- [13] Mehanizmi zaštite od korozije, I. Juraga, V. Šimunović, I. Stojanović, V. Alar, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, 2012.
- [14] Zaštita broskoga trupa od korozije i obraštanja, I. Juraga, I. Stojanović, T. Noršić, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, 2007.
- [15] Održavanje i remont broda, Zoran Perić
- [16] [www.adesol-tego.com/blog/3-comment-ameliorer-votre-profile-grace-a-l-anodisation](http://www.adesol-tego.com/blog/3-comment-ameliorer-votre-profile-grace-a-l-anodisation)
- [17] Obraštanje broda i antivegetativni premazi, Branko Belamarić
- [18] [www.zavarivanje.info/cd/3563/zavarivanje-aluminija-literatura](http://www.zavarivanje.info/cd/3563/zavarivanje-aluminija-literatura)
- [19] [www.hempelyacht.hr/General-Painting-Advice/Antifoulings-application/paint](http://www.hempelyacht.hr/General-Painting-Advice/Antifoulings-application/paint)
- [20] [www.colnagomarine.com](http://www.colnagomarine.com)
- [21] Diplomski rad, Bruno Židov, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, 2012.

[22] Korozija i zaštita konstrukcijskih materijala, E. Stupniček – Lisac, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije u Zagrebu

[23] Održavanje i popravak malih brodova, Walter Turnšek, ZINA, Zagreb

[24] Predavanja iz kolegija Otpor i propulzija broda, Nastia Degiuli, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu