

# Utjecaj mikrostrukture na korozijsko ponašanje niskolegiranog čelika

---

Uljar, Mirta

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:016133>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-08**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni diplomski studij strojarstva

Diplomski rad

**UTJECAJ MIKROSTRUKTURE NA KOROZIJSKO  
PONAŠANJE NISKOLEGIRANOG ČELIKA**

Rijeka, rujan 2023.

Mirta Uljar

0069075496

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni diplomski studij strojarstva

Diplomski rad

**UTJECAJ MIKROSTRUKTURE NA KOROZIJSKO  
PONAŠANJE NISKOLEGIRANOG ČELIKA**

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Sunčana Smokvina Hanza

Rijeka, rujan 2023.

Mirta Uljar

0069075496

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET  
POVJERENSTVO ZA DIPLOMSKE ISPITE

Rijeka, 13. ožujka 2023.

Zavod: **Zavod za materijale**  
Predmet: **Zaštita materijala**  
Grana: **2.11.03 proizvodno strojarstvo**

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Mirta Uljar (0069075496)**  
Studij: **Sveučilišni diplomski studij strojarstva**  
Modul: **Inženjerstvo materijala**

Zadatak: **Utjecaj mikrostrukture na korozijsko ponašanje niskolegiranog čelika /  
Effect of Microstructure on the Corrosion Behavior of Low-Alloy Steel**

### Opis zadatka:

Opisati korozijske procese. Prikazati vrste korozije prema geometriji korozijskog razaranja, njihove uzroke te metode zaštite. Analizirati unutrašnje i vanjske čimbenike korozije, sa naglaskom na utjecaj mikrostrukture na korozijsko ponašanje niskolegiranog čelika. Analizirati metode elektrokemijskih korozijskih ispitivanja.

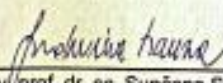
U eksperimentalnom dijelu rada provedi elektrokemijsko ispitivanje korozije niskolegiranog čelika. Opisati materijal, postupak ispitivanja, korištenu opremu i pribor. Rezultate ispitivanja kritički analizirati. Dati odgovarajuće zaključke.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.




Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

Mentor:

  
Izv. prof. dr. sc. Sunčana Smokvina Hanza

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:

  
Izv. prof. dr. sc. Igor Bonefačić

## **IZJAVA**

Ovim izjavljujem da sam samostalno izradila svoj diplomski rad koristeći svoje akademsko znanje stečeno tijekom studija, uz podršku mentora, prateći pravilnu metodologiju izrade stručnih i znanstvenih radova.. Također, izjavljujem da tuđe stavove, spoznaje, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući navela u diplomskom radu na uobičajen, standardan način citirala sam i povezala s korištenim bibliografskim jedinicama, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

## ZAHVALA

Zahvaljujem se svojoj mentorici izv. prof. dr. sc. Sunčani Smokvina Hanza na stručnom vodstvu u izradi ovog diplomskog rada te na utrošenom vremenu, pruženoj podršci i strpljenju. Također, zahvaljujem se i asistentu Dariju Kvrgiću te izv. prof. dr. sc. Dariju Iljkiću na smjernicama i vodstvu prilikom izrade eksperimentalnog dijela diplomskog rada.

Zahvale upućujem i svojim roditeljima ,Ani i Dariju, koji su bili moj dragocjeni oslonac tijekom cjelokupnog obrazovanja te dečku Vitu na profesionalnoj podršci i neizmjerljivoj dobroti.

# SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. KOROZIJSKI PROCESI .....	2
2.1 Općenito o koroziji.....	2
2.2 Kemijska korozija metalnih materijala.....	4
2.3 Elektrokemijska korozija metalnih materijala .....	6
2.3.1 Daniellov članak (galvanski članak) .....	7
2.3.2 Standardni elektrodni potencijal materijala .....	8
2.4 Brzina elektrokemijske korozije .....	9
3. KLASIFIKACIJA KOROZIJE PREMA OBLIKU KOROZIJSKOG RAZARANJA .....	15
3.1 Opća (jednolika) korozija .....	16
3.2 Lokalna korozija.....	17
3.2.1 Rupičasta (pitting) korozija .....	17
3.2.2 Potpovršinska korozija .....	19
3.2.3 Korozija u procijepu.....	21
3.2.4 Galvanska korozija .....	22
3.3 Selektivna korozija .....	23
3.3.1 Decinkacija .....	23
3.3.2 Grafitizacija .....	24
3.4 Interkristalna korozija.....	24
3.5 Posebni oblici elektrokemijske korozije.....	24
3.5.1 Biološka korozija .....	25
3.5.2 Korozija uz mehaničko djelovanje.....	26
3.5.3 Korozija djelovanjem lutajućih struja .....	30
4. METODE ZAŠTITE METALA OD KOROZIJE .....	32
4.1 Odabir materijala.....	32
4.2 Konstrukcijsko-tehnološke mjere.....	33
4.3 Elektrokemijska zaštita.....	34

4.4	Zaštita inhibitorima .....	36
4.5	Zaštita prevlačenjem.....	36
4.5.1	Metalne prevlake .....	37
4.5.2	Anorganske prevlake .....	37
4.5.3	Organske prevlake .....	38
5.	EKSPERIMENTALNI DIO .....	39
5.1	Materijali za ispitivanje .....	39
5.2	Toplinska obrada uzoraka .....	41
5.3	Elektrokemijsko ispitivanje brzine korozije .....	43
5.4	Rezultati ispitivanja .....	47
5.4.1	Rezultati ispitivanja uzorka u normaliziranom stanju .....	47
5.4.2	Rezultati ispitivanja uzorka nakon toplinske obrade kaljenjem .....	49
5.4.3	Rezultati ispitivanja uzorka nakon toplinske obrade popuštanjem na 400°C .....	51
5.4.4	Rezultati ispitivanja uzorka nakon toplinske obrade popuštanjem na 600°C .....	53
5.5	Usporedba dobivenih rezultata ispitivanja.....	56
6.	ZAKLJUČAK.....	59
	LITERATURA .....	61
	POPIS SLIKA .....	63
	POPIS TABLICA .....	65
	SAŽETAK.....	66
	ABSTRACT .....	67



## 1. UVOD

Korozija predstavlja nepoželjno, odnosno nenamjerno trošenje materijala. Korozija je spontani i prirodni proces koji se pojavljuje kao posljedica težnje metalnog materijala da se vrati u spojeve u kojima se nalazi u prirodi, odnosno u stabilno ionsko stanje nižeg sadržaja energije. Poznavanjem korozijskih procesa moguće je smanjiti ili spriječiti djelovanje istih.

Ovaj diplomski rad naslova „Utjecaj mikrostrukture na korozijsko ponašanje niskolegiranog čelika“ sastoji se iz dva dijela – teorijskog i eksperimentalnog. U teorijskom dijelu ovog rada objasnit će se sami procesi korozije i način njihovog djelovanja, klasificirat će se isti prema mehanizmu korozijskog djelovanja i prema obliku korozijskog razaranja te će navesti i opisati metode zaštite metala od korozije.

U eksperimentalnom dijelu ovog diplomskog rada bit će prikazano elektrokemijsko ispitivanje brzine korozije četiriju uzoraka niskolegiranog čelika 51CrV4 u 3,5%-tnoj otopini NaCl-a, od kojih jedan nije toplinski obrađen, već je u normaliziranom stanju. Preostala tri obrađena su različitim postupcima toplinske obrade: kaljenjem te kaljenjem i popuštanjem (poboljšavanjem). Rezultati ispitivanja će biti prikazani u obliku dijagrama s krivuljama stacionarnog potencijala otvorenog strujnog kruga i Tafelovih krivulja pomoću kojih je moguće dobiti uvid u korozijsko ponašanje uzoraka u navedenom elektrolitu.

Na kraju rada bit će izneseni zaključci o utjecaju mikrostrukture na korozijsko ponašanje čelika 51CrV4 u 3,5%-tnoj otopini NaCl-a.

## 2. KOROZIJSKI PROCESI

### 2.1 Općenito o koroziji

Podrijetlo pojma korozija dolazi iz latinskog jezika, gdje riječ "corrodere" označava proces grickanja ili postupno propadanje. Danas se pod pojmom korozija u općem jeziku podrazumijeva propadanje materijala uslijed kemijskog djelovanja, a posebno metalnih materijala djelovanjem vlage, kisika i drugih agresivnih tvari.

Korozija predstavlja nepoželjno, odnosno nenamjerno trošenje materijala. To je proces koji razara metal uslijed kemijskog ili elektrokemijskog međudjelovanja istoga s okolinom. Proces korozije, prema normi HRN EN ISO 8044, definiran je kao fizikalno-kemijsko međudjelovanje metala i okoliša u kojem se metal nalazi koje uzrokuje promjenu uporabnih svojstava metala te može dovesti do oštećenja funkcije metala, tehničkog sustava koji oni čine ili okoliša. [1]

Korozija je spontani i prirodni proces koji nastaje kao posljedica težnje metala da se vrati u spojeve u kojima se nalazi u prirodi, odnosno u stabilno ionsko stanje nižeg sadržaja energije. Tako je za metale koji su podložniji koroziji potrebno dovesti veću količinu energije pri njihovoj ekstrakciji. Djelovanjem korozije materijal gubi svoje karakteristike te propada djelovanjem različitih reakcija (kemijskih, elektrokemijskih i slično) te se njegova mikrostruktura, mehanička svojstva i izgled nepovratno narušavaju. Na slikama 2.1 i 2.2 prikazane su štete na lopaticama turbine i cijevima izazvane procesom korozije.



*Slika 2.1 Šteta izazvana korozijom na rotorskim lopaticama turbine [1]*



*Slika 2.2 Korodirana cijev iz sustava brodskog cjevovoda [1]*

Za nastanak korozije potreban je afinitet između metala i okoline, odnosno težnja tvari za međusobnom spontanom reakcijom. Tok i brzina korozije ovise o afinitetu te o otporima koji se opiru procesu korozije. Na spomenuti afinitet i otpore korozijskom procesu utječu čimbenici koji se dijele na unutrašnje i vanjske. U unutrašnje čimbenike ubrajaju se karakteristike materijala kao što su sastav materijala, stanje površine, zaostala naprezanja, kristalna građa, oblik predmeta i slično. Vanjski čimbenici podrazumijevaju karakteristike okoline kao što su sastav medija, temperatura, tlak i ostala mehanička opterećenja, prisutnost krutih čestica u mediju, relativna brzina gibanja medija u odnosu na materijal te kontakt s drugim konstrukcijskim materijalom. Brzina korozije se ne odvija konstantno u većini slučajeva te njezin tok nije linearan.

Procesi korozije mogu se dijeliti s obzirom na razne kriterije te se tako razlikuju podjele korozijskih procesa s obzirom na mehanizam korozije, vrstu korozivne okoline, geometrijski oblik korozijskog oštećenja i slično. S obzirom na mehanizam korozije razlikuju se dvije vrste korozije; kemijska i elektrokemijska korozija. Podjela korozijskih procesa s obzirom na geometrijski oblik korozijskog oštećenja je na opću, selektivnu, lokalnu i interkristalnu koroziju. Postojeće podjele korozijskih procesa prikane su na slici 2.3.



Slika 2.3 Klasifikacija korozijskih procesa [2]

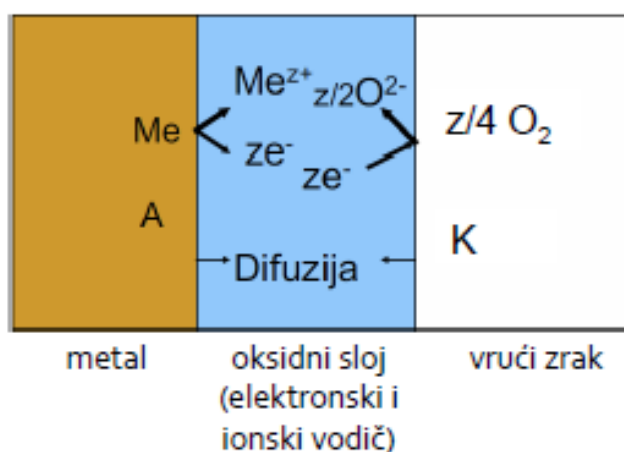
Klasifikacija korozijskih procesa prema mehanizmu djelovanja temelji na električnoj vodljivosti medija u kojem se materijal nalazi te koji istovremeno sudjeluje u korozijskom procesu, a smatra se osnovnom klasifikacijom korozije koja je ujedno i najvažnija.

## 2.2 Kemijska korozija metalnih materijala

Kemijska korozija nastaje reakcijom atoma metala s električki nevodljivom okolinom pri povišenoj temperaturi. Tijekom takve reakcije izravno nastaju molekule spoja te su ti spojevi najčešće oksidi i sulfidi. U električki nevodljive okoline većinski se ubrajaju vrući suhi plinovi poput para vodika, klora, kisika, sumporovodika, klorovodika i dušičnih oksida te organske tekućine koje ne sadrže vodu kao što su benzin, benzen i nafta. Kemijska se korozija najčešće odvija oksidacijom metala kisikom iz zraka te rezultira nastajanjem metalnog oksida kao korozijskog produkta. Do takve reakcije u metala često dolazi prilikom različitih postupaka

toplinske obrade te kovanja, valjanja, zavarivanja i u ostalim slučajevima kada je metalni materijal izložen visokim temperaturama. [2]

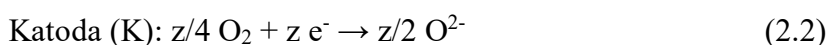
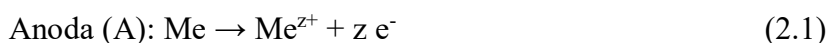
Prema teoriji C. Wagnera, mehanizam kemijske korozije metala elektrokemijskog je karaktera u slučaju odvijanja procesa putem difuzije iona metala i iona reaktanata iz okoline, kao i elektrona ili pozitivnih šupljina kroz sloj korozijskih produkata koji posjeduju poluvodička svojstva (slika 3.1). Tada površina metala djeluje kao anoda, gdje se odvija oksidacija (ionizacija metala), dok cijela površina korozijskog produkta djeluje kao katoda. Na katodi dolazi do redukcije reaktanta iz okoline (primjerice kisika). Takva reakcija rezultira stvaranjem posebnog korozijskog članka u kojem je produkt korozije istovremeno metalni i elektrolitički vodič. Oksidni sloj prikazan na slici 2.4. [3]

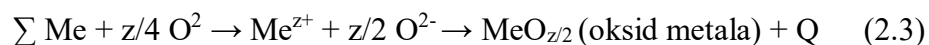


Slika 2.4 Mehanizam kemijske korozije [2]

Ovisnost nastajanja kemijske korozije o termodinamičkim uvjetima može se objasniti pomoću Gibbsove energije,  $\Delta G$ , koja predstavlja oslobođenu energiju povrativog procesa kod konstantne temperature i tlaka. Spontane će se reakcije korozije odvijati sve dok vrijedi  $\Delta G < 0$  jer u trenutku kada je vrijednost  $\Delta G$  jednaka nuli uspostavlja se ravnoteža. U slučajevima kada je  $\Delta G > 0$  ne postoje reakcije te se tada radi o inertnom sustavu što je slučaj u metala poput zlata i platine.

Kemijska korozija metala odvija se dvjema odvojenim reakcijama: oksidacijom metala na anodi koja se odvija između metala i oksidnog sloja te redukcijom kisika na katodi koja se odvija između oksidnog sloja i zraka prema izrazima 2.1, 2.2 i 2.3:





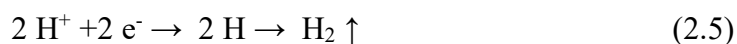
Dakle, u procesu kemijske korozije atomi metala na površini izloženoj korozivnoj okolini oksidacijom gube elektrone iz vanjske ljuske te nastaju pozitivno nabijeni ioni metala odnosno kationi te se ta reakcija odvija na anodi. Na katodi molekule kisika primaju elektrone te nastaju anioni kisika. Kationi metala i anioni kisika međusobno reagiraju uz stvaranje korozijskog produkta u obliku metalnog oksida.

### 2.3 Elektrokemijska korozija metalnih materijala

Elektrokemijska korozija se, za razliku od kemijske, odvija u elektrolitima, odnosno u medijima koji provode električnu struju. Elektrokemijska korozija je redoks proces koji nastaje na metalnom materijalu. Djelovanjem elektrokemijske korozije atomi metala se oksidiraju kao reducensa (elektron donor) u slobodni kation uz istodobno reduciranje nekog oksidansa koji se naziva depolarizatorom (elektron akceptor). Dakle, kod elektrokemijske korozije razlikuju se dva procesa – anodni i katodni. Korozijski članak nastaje na površini metala uronjenog u elektrolit kao posljedica razlike potencijala katodnih i anodnih mjesta. Razlikuju se dva procesa korozijskog članka, a to su oksidacija i redukcija. Oksidacija se odvija na anodi te tim procesom metal gubi valentne elektrone te s time raste oksidacijski broj prema reakciji prikazanoj izrazom 2.4:



Na katodi se odvija redukcija pri kojoj tvar prima otpuštene elektrone te se smanjuje oksidacijski broj. Na katodi se ostvaruju procesi vodikove depolarizacije ili kisikove depolarizacije prilikom koje depolarizator ( $\text{H}^+$  ili  $\text{O}_2$ ) veže elektrone koji su prethodno oslobođeni na anodi. Proces koji se odvija na katodi ovisi o kemijskom sastavu elektrolita u kojem se nalazi metal i o njegovoj pH vrijednosti te se prema tome razlikuju vodikova te kisikova depolarizacija. Vodikova depolarizacija odnosno redukcija  $\text{H}^+$  iona odvija se prema izrazu 2.5:



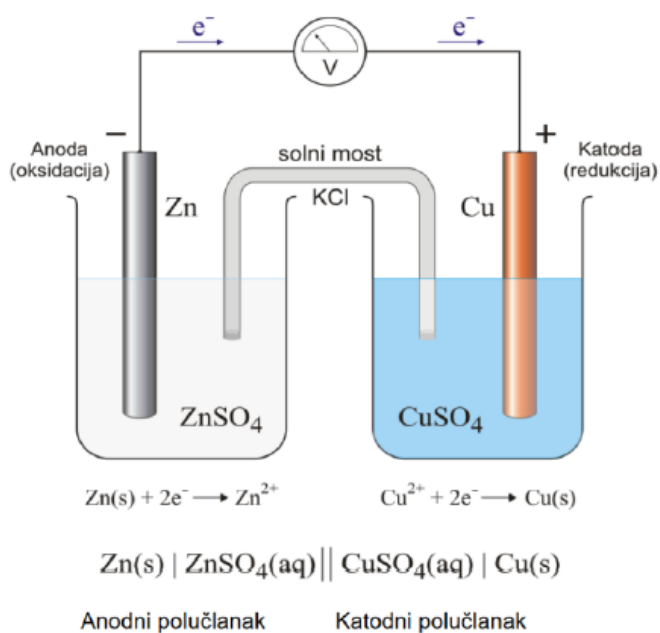
Do vodikove depolarizacije, osnovnog katodnog procesa, dolazi pri koroziji metalnih materijala u kiselim otopinama. Elektroni koji dolaze na katodu privlače vodikove ione tvoreći vodikove atome koji se vežu u molekule vodika koje izlaze iz otopine u obliku mjehurića plina. Kisikova depolarizacija jest redukcija kisika otopljenog u vodi te do nje najčešće dolazi iz razloga što elektroliti sadržavaju u različitim mjerama otopljeni kisik zbog kontakta s atmosferom. Afinitet nastanka korozije uz kisikovu depolarizaciju veći je od afiniteta za koroziju uz vodikovu

depolarizaciju te je zato elektrokemijska korozija uz kisikovu depolarizaciju vrlo česta. U slučaju kada se u vodi ne nalazi kisik, na katodi je moguća samo redukcija vodika. [4] Anodna i katodna reakcija se odvijaju istovremeno, ali se ne nalaze na istom mjestu površine materijala koji korodira.

Za odvijanje procesa elektrokemijske korozije potrebna su tri uvjeta, anoda i katoda te metal u kontaktu s elektrolitom. U slučaju kada jedan od triju uvjeta nije zadovoljen elektrokemijska korozija se neće odvijati te se pri zaštiti metala od elektrokemijske korozije primjenjuje sprječavanje korozije ispunjavanjem jednog od uvjeta.

### 2.3.1 Daniellov članak (galvanski članak)

Daniellov članak predstavlja primjer proizvodnje električne struje putem elektrokemijskih reakcija. Na slici 2.5 prikazane su anoda izrađena od cinka te katoda od bakra koje su uronjene u kiselu sulfatnu otopinu svojih iona i spojene na voltmetar pomoću vodiča. Otopine su povezane putem solnog mosta. [5] Kroz metalni vodič elektroni se gibaju u smjeru katode, a ioni se kreću preko solnog mosta. Rezultat proizvodnje struje jest trošenje anode (Zn). Otpuštanjem elektrona anoda odnosno cink postaje pozitivnije nabijena, a pritom katoda (bakar) zbog primanja elektrona postaje negativnije nabijena.



Slika 2.5 Daniellov članak [5]

### 2.3.2 Standardni elektrodni potencijal materijala

Ranije je spomenuto da korozijski članci nastaju kao posljedica razlike potencijala anodnih i katodnih mjesta, a to se odnosi na standardni elektrodni potencijal metala ( $E^\circ$ ) koji predstavlja mjeru za tendenciju oslobađanja elektrona u redoks sustavu te se utvrđuje pomoću standardne vodikove elektrode (S.H.E.) u otvorenom strujnom krugu. Dakle, razlikom elektrodnog potencijala metala i referentnog potencijala standardne vodikove elektrode dobije se iznos standardnog potencijala metala. Iznos  $E^\circ$  standardne vodikove elektrode jednak je nuli. Na slici 2.6 prikazan je  $E^\circ$  različitih metala pri standardnim uvjetima odnosno pri tlaku od 1 bara i temperaturi iznosa 25 °C.

Metal	Oksidacija (ionizacija)	Standardni elektrodni potencijal, $E^\circ$ VRIJEDI ZA: $p = 101325 \text{ Pa}$ , $\vartheta = 25^\circ\text{C}$
Kalij	$\text{K} \rightarrow \text{K}^+ + \text{e}^-$	-2,924
Natrij	$\text{Na} \rightarrow \text{Na}^+ + \text{e}^-$	-2,714
Magnezij	$\text{Mg} \rightarrow \text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^-$	-2,363
Aluminij	$\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3\text{e}^-$	-1,662
Cink	$\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,763
Krom	$\text{Cr} \rightarrow \text{Cr}^{3+} + 3\text{e}^-$	-0,744
Željezo	$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,440
Kadmij	$\text{Cd} \rightarrow \text{Cd}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,403
Kobalt	$\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,277
Nikal	$\text{Ni} \rightarrow \text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,250
Kositar	$\text{Sn} \rightarrow \text{Sn}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,136
Olovo	$\text{Pb} \rightarrow \text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,126
VODIK	$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	0,000
Bakar	$\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^-$	+0,340
Srebro	$\text{Ag} \rightarrow \text{Ag}^+ + \text{e}^-$	+0,800
Platina	$\text{Pt} \rightarrow \text{Pt}^{2+} + 2\text{e}^-$	+1,200
Zlato	$\text{Au} \rightarrow \text{Au}^{3+} + 3\text{e}^-$	+1,420

Slika 2.6 Standardni elektrodni potencijal metala [4]



U kratko spojenom Daniellovom članku dolazi do spontanog odvijanja redoks reakcija te je standardna elektromotorna sila Daniellovog članka  $E_{MF} > 0$ . Pritom je ona jednaka razlici standardnih elektrodnih potencijala redoks sustava odnosno razlici elektrodnog potencijala katode i anode. Katoda je metal pozitivnijeg  $E^\circ$ , a anoda metali negativnijeg  $E^\circ$ . Dakle, ako se radi o galvanskom članku Zn – Cu, elektromotorna sila galvanskog članka iznosi (izraz 2.6):

$$E_{MF} = E_{Cu} - E_{Zn} = 0,340 - (-0,763) = 1,103 \text{ V} \quad (2.6)$$

Bakar ima pozitivniji  $E^\circ$  te je iz toga razloga katoda, a cinkov  $E^\circ$  je negativniji što znači da je skloniji koroziji te on predstavlja anodu galvanskog članka.

## 2.4 Brzina elektrokemijske korozije

Spontana oksidacija i redukcija pri elektrokemijskoj koroziji odvijat će se do trenutka kada se uspostavi ravnotežno stanje uslijed polarizacije koja zaustavlja korozijski proces. Pomoću polarizacije se smanjuje razlika elektrodnih potencijala katode i anode te dolazi do povećavanja električnog otpora korozijskog članka zbog čega dolazi do težeg protoka elektrona. Ako se za primjer uzme cink i bakar koji su uronjeni u elektrolit, na početku će posjedovati svoje standardne elektroodne potencijale koji iznose za cink -0,763 V, a za bakar +0,340 V. Tijekom redoks procesa, cink (anoda) će postajati sve pozitivniji kao posljedica oksidacije, dok će bakar (katoda) postajati sve negativniji zbog primanja elektrona, odnosno redukcije. Tako se smanjuje razlika potencijala katode i anode, tj. elektromotorna sila galvanskog članka.

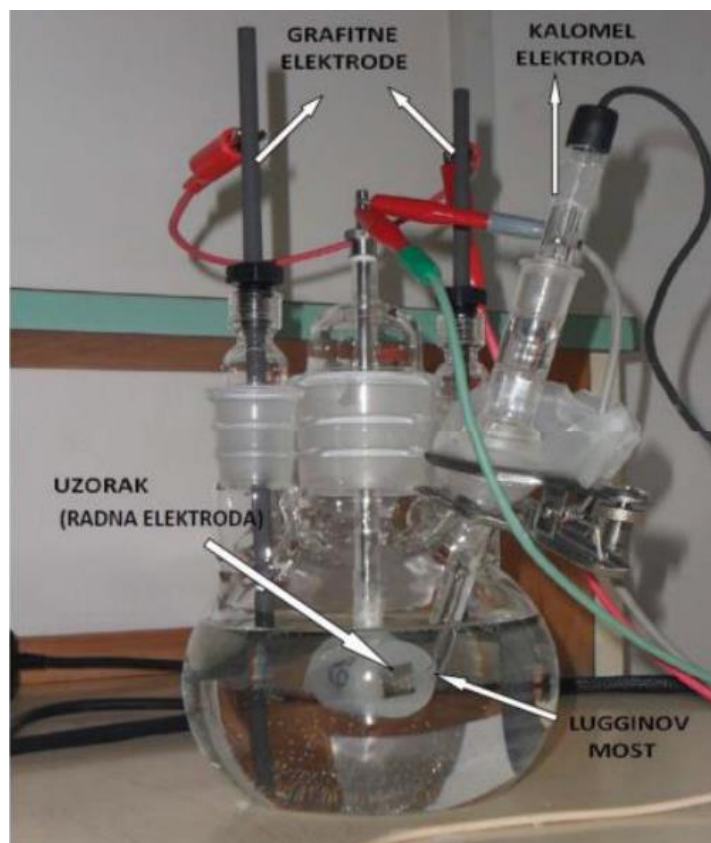
Pod brzinom elektrokemijske korozije podrazumijeva se brzina „gubitka“ materijala na anodi u jedinici vremena. Čimbenici koji najviše utječu na brzinu elektrokemijske korozije jesu elektroodni potencijal materijala koji korodira, kiselost ili lužnatost medija u kojem se metal nalazi, vrsta iona, vodljivost, temperatura te difuzija. Za utvrđivanje brzine elektrokemijske korozije koriste se dvije metode – gravimetrijska te elektrokemijska metoda.

Gravimetrijsko ispitivanje korozije je najraširenija kvantitativna metoda ispitivanja te je izravna, a vrši se određivanjem gubitka mase vaganjem uzorka, pomoću precizne laboratorijske vage (slika 2.7), prije izlaganja djelovanju korozije te nakon korozije i uklanjanja nastalih produkata korozije. Nedostatak ove metode je dugotrajnost ispitivanja koje može trajati nekoliko mjeseci te mogućnost primjene samo kod opće (jednolike) korozije.



*Slika 2.7 Precizna laboratorijska vaga za gravimetrijsko ispitivanje korozije [6]*

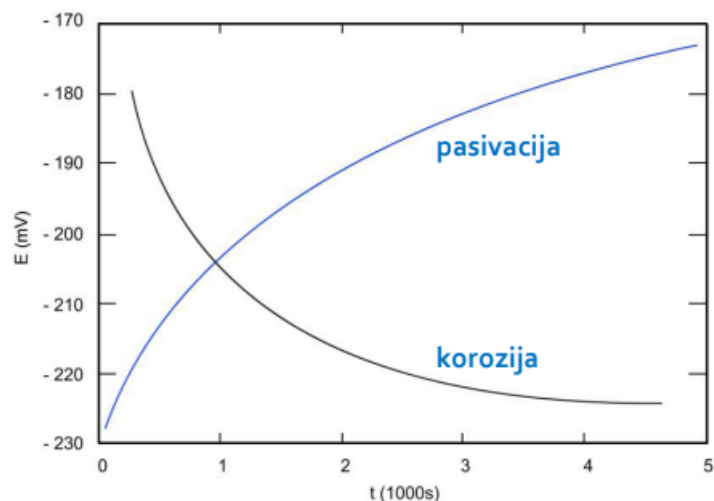
Elektrokemijsko ispitivanje korozije u odnosu na gravimetrijsko ispitivanje traje kraće vrijeme te se iz toga razloga često koristi elektrokemijsko ispitivanje. Osim kraćeg vremena trajanja ispitivanja, prednosti elektrokemijskog ispitivanja jesu i velika točnost i kontinuirano ispitivanje. Ovom vrstom ispitivanja dobivaju se podaci ponašanja materijala uslijed korozije u određenom vremenskom periodu i elektrolitu. Oprema potrebna za ovakvu vrstu ispitivanja uključuje potenciostat, računalo s odgovarajućim programom, standardnu peterogrlenu ispitnu tikvicu u kojoj su postavljene radna, referentna te pomoćne elektrode. Uloga potenciostata je na radnoj elektrodi uspostavljanje određenog potencijala te mjerenje struje odziva sustava. Radna elektroda je ispitni uzorak cilindričnog oblika koji se postavlja u držač. Referentna elektroda predstavlja elektrodu čiji je potencijala unaprijed poznat te ona ne sudjeluje u strujnom krugu, već služi mjerenju potencijala radne elektrode. Referentna elektroda je zasićena kalomel elektroda koja nije direktno umočena u elektrolit, već se uz pomoć Luggingovog mosta približava radnoj elektrodi. Pomoćne se elektrode sastoje od dvije grafitne poluelektrode što ih čini korozijski postojanima te nevodljivima za električnu struju. [5,6] Na slici 2.8 je prikazana peterogrlena ispitna ćelija sa sastavnim dijelovima.



Slika 2.8 Peterogrlena ispitna ćelija [6]

Elektrokemijskim ispitivanjem korozije najčešće se za rezultate dobivaju krivulja potencijala otvorenog strujnog kruga ovisno o vremenu te Tafelova krivulja.

Krivulja potencijala otvorenog strujnog kruga u ovisnosti o vremenu dobiva se praćenjem vremenske promjene stacionarnog potencijala otvorenog strujnog kruga,  $E_{OC}$ , te se kao rezultat dobivaju podaci o korozijskom ponašanju uzorka u elektrolitu. Za dobivanje takve krivulje mjeri se potencijal otvorenog strujnog kruga između radne i protuelektrode te su dobiveni rezultati potencijala otvorenog strujnog kruga prikazani u dijagramu u ovisnosti o vremenu (E-t). Promjena vrijednosti potencijala u vremenu daje podatak o korozijskom ponašanju materijala koji se ispituje u željenom elektrolitu. U slučaju prisutnosti pozitivnog trenda krivulje stacionarnog potencijala otvorenog strujnog kruga uspostavlja se stabilnost uzorka u elektrolitu, odnosno dolazi do postizanja pasivacije. Ako se radi o situaciji kada vrijednosti stacionarnog potencijala otvorenog strujnog kruga padaju prema negativnim vrijednostima, uzorak je nestabilan odnosno dolazi do pojave korozije. [7] Slika 2.9 prikazuje krivulje dvaju različitih materijala od kojih je kod jednog postignuta pasivacija (plava krivulja), a kod drugog dolazi do korozije (crna krivulja).



Slika 2.9 Krivulje stacionarnog potencijala otvorenog strujnog kruga u ovisnosti o vremenu u slučaju korozije i pasivacije [6]

Na slici 2.10 je prikazana krivulja potencijala otvorenog strujnog kruga u ovisnosti o vremenu aluminijske legure AlSi7Mg u tri različita elektrolita – pitkoj vodi, 3,5 %-tnoj otopini NaCl te u morskoj vodi. Vidljivo je da je plava krivulja iznad crvene i zelene krivulje zato jer ona prikazuje koroziju uzorka navedenog materijala u pitkoj vodi u kojoj uzorak ima pozitivnije vrijednosti potencijala otvorenog strujnog kruga od uzorka ispitivanog u 3,5%-tnoj otopini NaCl (zelena krivulja) te od uzorka ispitivanog u morskoj vodi (crvena krivulja). Razlog tome je što su ova dva medija elektroliti koji bolje provode električnu struju u odnosu na pitku vodu. Također, vidljivo je da se sve tri krivulje prema kraju ispitivanja kreću prema pozitivnijim vrijednostima što znači da dolazi do pasivacije.



Slika 2.10 Krivulje potencijala otvorenog strujnog kruga AlSi7Mg u različitim elektrolitima [6]

Nakon mjerenja stacionarnog potencijala otvorenog strujnog kruga slijedi ispitivanje anodne i katodne polarizacije kako bi se dobile Tafelove krivulje. Polarizacija je pojava djelovanja korozivskih produkata na sprječavanje protoka elektrona, odnosno struje, u korozivskom procesu. To smanjenje protoka struje rezultira manjim radnim naponom članka od njegove elektromotorne sile, a samim time i manjom brzinom korozije. Katodnom i anodnom polarizacijom u području gdje potencijal iznosi  $\pm 250$  mV u odnosu na  $E_{OC}$  dobiveni su rezultati koji se grafički prikazuju u polulogaritamskom obliku. Ekstrapolacijom katodnih i anodnih Tafelovih pravaca u sjecištu istih određuju se vrijednosti gustoće korozivske struje ( $j_{kor}$ , [ $\mu\text{A cm}^{-2}$ ]) i korozivskog potencijala ( $E_{kor}$ , [mV]). Iz vrijednosti gustoće struje korozije te poznate ekvivalentne mase materijala ( $EW$ , [g]) te gustoće materijala ( $\rho$ , [ $\text{g cm}^{-3}$ ]), moguće je izračunati brzinu korozivskog procesa prema izrazu 2.7 [6]:

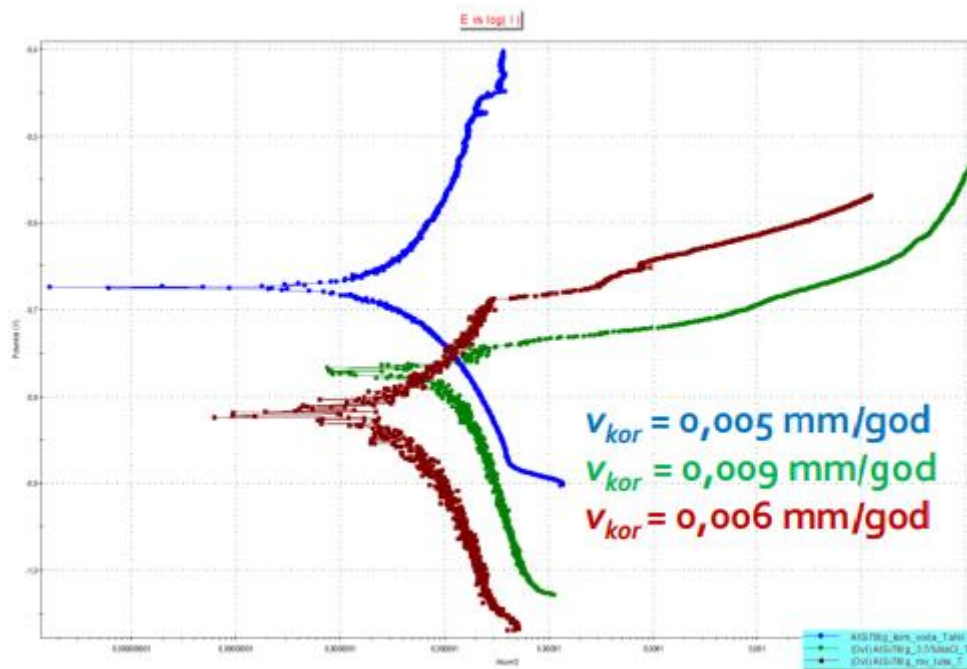
$$v_{kor} = \frac{0,0033 \times j_{kor} \times EW}{\rho} \text{ [mm/god]} \quad (2.7)$$

Ekvivalentna masa predstavlja masu tvari koja, u redoks procesu, troši 1 mol elektrona. Ta se masa izračunava prema sljedećem izrazu 2.8 [6]:

$$EW = \sum_{i=1} \frac{f_i \times M_{ri}}{n_i} \text{ [g]} \quad (2.8)$$

U navedenom izrazu  $f_i$  predstavlja maseni udio  $i$ -tog elementa,  $M_{ri}$  je relativna atomska masa  $i$ -tog elementa, a  $n_i$  označava broj otpuštenih elektrona.

Primjer Tafelove krivulje aluminijeve legure AlSi7Mg u različitim elektrolitima prikazan je slikom 2.11.

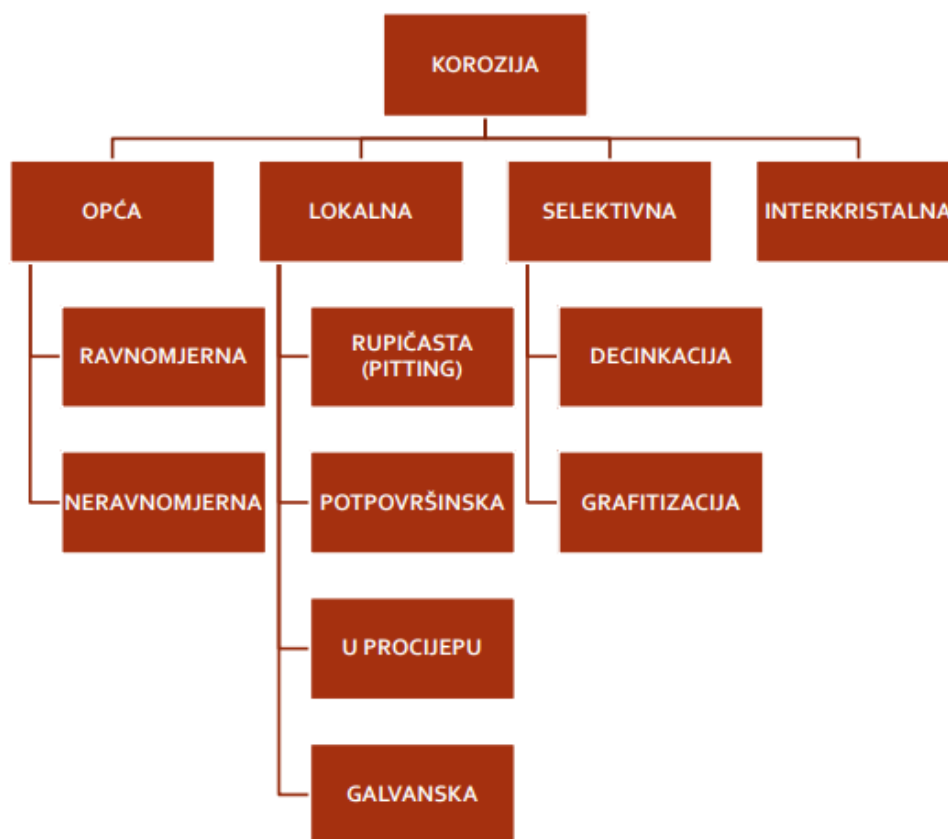


Slika 2.11 Tafelove krivulja AlSi7Mg u različitim elektrolitima [6]

Uzorak navedenog materijala za kojeg je provedeno ispitivanje u pitkoj vodi prikazan je krivuljom plave boje, u 3,5%-tnoj otopini NaCl zelenom bojom, a uzorak ispitan u morskoj vodi crvenom krivuljom. Na temelju podataka dobivenih pomoću Tafelove krivulje ( $j_{kor}$  i  $E_{kor}$ ) izračunate su i brzine korozije te je jasno vidljivo da je brzina korozije u pitkoj vodi najmanja.

### 3. KLASIFIKACIJA KOROZIJE PREMA OBLIKU KOROZIJSKOG RAZARANJA

Prema obliku korozijskog razaranja koroziju je moguće podijeliti na opću, lokalnu, selektivnu te interkristalnu koroziju. [8] Opću je koroziju, nadalje, moguće podijeliti na ravnomjernu i neravnomjernu, a lokalnu koroziju na rupičastu, potpovršinsku, galvansku te koroziju u procijepu. Selektivna korozija za primjere ima decinkaciju i grafitizaciju. Na slici 3.1 je predočena podjela korozije prema obliku korozijskog razaranja.



Slika 3.1 Klasifikacija geometrijskih oblika korozijskog razaranja metala [8]

### 3.1 Opća (jednolika) korozija

Opća korozija, prikazana na slici 3.2, iako je najčešći oblik korozije, je najmanje opasan oblik korozije metala zato što prilikom djelovanja zahvaća cijelu površinu materijala izloženog agresivnoj okolini. Jedan od primjera opće korozije je hrđanje metalnog materijala koji je izložen djelovanju atmosfere. Na povećanje vjerojatnosti pojavljivanja i brzinu razvoja ovog oblika korozije utječe povećanje koncentracija ugljikovog dioksida. [5] Opću koroziju karakterizira ravnomjerno smanjenje debljine materijala bez prisustva značajnije lokalizirane korozije. Također, dolazi do zamjene anodnih i katodnih mjesta što za posljedicu ima razaranje metala relativno jednoliko po cijeloj površini. Opću se koroziju može podijeliti na ravnomjernu i neravnomjernu opću koroziju.



*Slika 3.2 Opća korozija čeličnog spremnika [8]*

Ravnomjernu opću koroziju karakterizira ravnomjerno oštećivanje materijala te se ona može lako pratiti što omogućuje predviđanje popravka ili zamjene određenog dijela zahvaćenoga istom. Ovaj tip opće korozije je mjerodavan za odabir materijala prilikom projektiranja. Brzina ravnomjerne opće korozije definirana je dubinom prodiranja korozije u materijal u određenom vremenskom periodu te se izražava u mm/godini. Za konstrukcije se upotrebljivim materijalom smatra onaj čija brzina korozije iznosi manje od 0,1 mm/god.

Neravnomjerna opća korozija djeluje neravnomjerno, a samim time otežano je predviđanje korozijskog ponašanja i njenog prodiranja budući da će određeni dijelovi površine biti jače oštećeni te time narušiti stabilnost konstrukcije prije predviđenog vremena. Ovaj tip opće korozije češći je i opasniji je od ravnomjerne korozije iz razloga što prosječna dubina prodora u materijal ne daje uvid u stvarno stanje postojanosti konstrukcije.

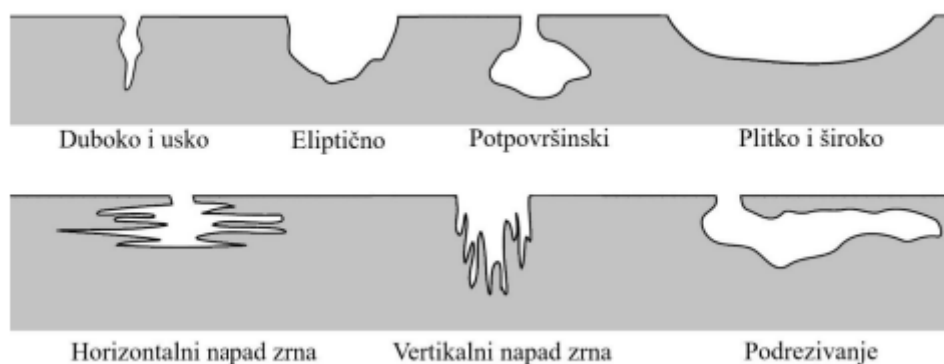


## 3.2 Lokalna korozija

Lokalna korozija djeluje na manji dio površine metala, odnosno zahvaća usko lokalizirana područja te je opasnija od opće korozije jer oštećenja izazvana istom su konkretnija i pogubnija za materijal. Uvjeti odvijanja ove vrste korozije jesu povišena temperatura, prisustvo kloridnih iona i oksidansa, nepovoljna pH vrijednost okoline, naprezanja unutar materijala te prisustvo uključaka i različitih faza. U lokalnu koroziju ubrajaju se rupičasta (pitting) korozija, potpovršinska korozija, korozija u procijepu te galvanska korozija. [5, 8]

### 3.2.1 Rupičasta (pitting) korozija

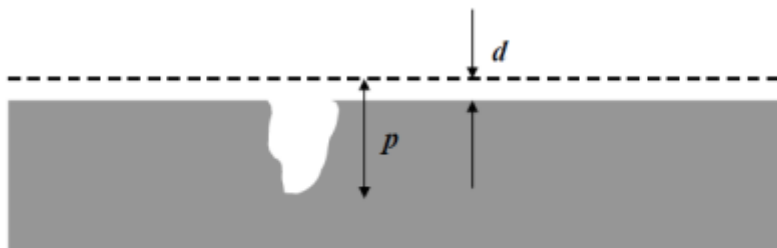
Rupičasta je korozija vrlo jaka i usko lokalizirani oblik korozije približno kružnog oblika. Dubina prodiranja rupičaste korozije je veća nekoliko puta od širine iste. Ova vrsta lokalne korozije najčešće nastaje u vodenim otopinama s kloridnim ionima ( $\text{Cl}^-$ ) koji unutar nastale rupice razaraju pasivni film te dolazi do nakupljanja metalnih kationa i klorida uz sve manji udio otopljenog kisika. Kloridni je medij unutar rupice veoma agresivan te onemogućuje repasivaciju, a potiče rast rupice. Postoje različiti oblici oštećenja materijala nastali djelovanjem pitting korozije te su isti prikazani na slici 3.3.



Slika 3.3 Različiti oblici oštećenja rupičaste korozije [8]

Stupanj opasnosti rupičaste korozije određuje se pomoću pitting faktora koji je jednak omjeru dubine najdublje rupice i prosječne dubine prodiranja korozije. Na slici 3.4 oznaka p predstavlja

maksimalnu dubinu rupice, a slovom  $d$  je označena prosječna dubina jednolike korozije određena gubitkom mase. [8, 9]



*Slika 3.4 Ocjena rupičaste korozije faktorom rupičaste korozije  $p/d$  [8]*

Rupičasta korozija česta je pojava u nehrđajućih čelika (slika 3.5) kao posljedica zavarivanja jer se u području spoja koji je zavaren formira oksidni sloj bez zaštitnog djelovanja čiji su kemijski sastav i struktura različiti od zaštitnog pasivnog sloja.



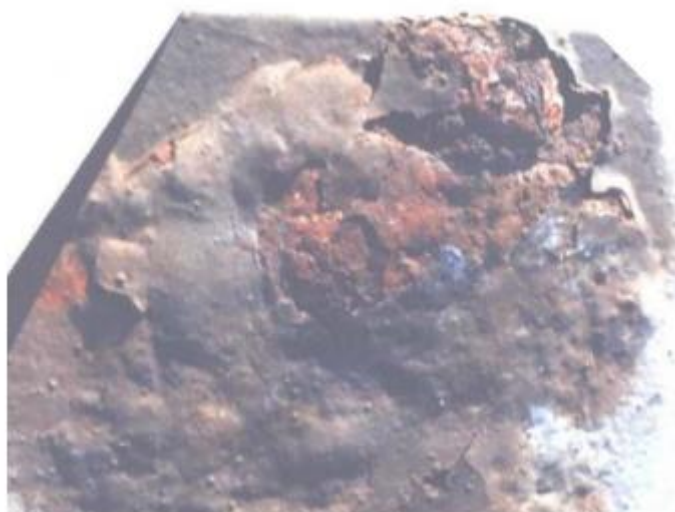
*Slika 3.5 Rupičasta korozija čelika [8]*

Najčešći uzroci nastajanja rupičaste korozije jesu nehomogena struktura metala (npr. uključci), lokalno djelovanje mikroorganizama te lokalna mehanička ili kemijska oštećenja zaštitnog pasivnog filma na površini metalnog materijala. [8]

### 3.2.2 Potpovršinska korozija

Potpovršinska korozija uzrokuje pojavu bubrenja i listanja produkata korozije koji se nalaze ispod površine oksidnog sloja. Tri su oblika razaranja uzrokovana potpovršinskom korozijom, to su bubrenje, eksfolijacija (listanje, raslojavanje) te filiformna korozija. [8]

Bubrenje nastaje kada korozijski produkti imaju veći volumen od volumena korodiranog metalnog materijala. Izgled čelika kod pojave bubrenja prikazan je slikom 3.6.



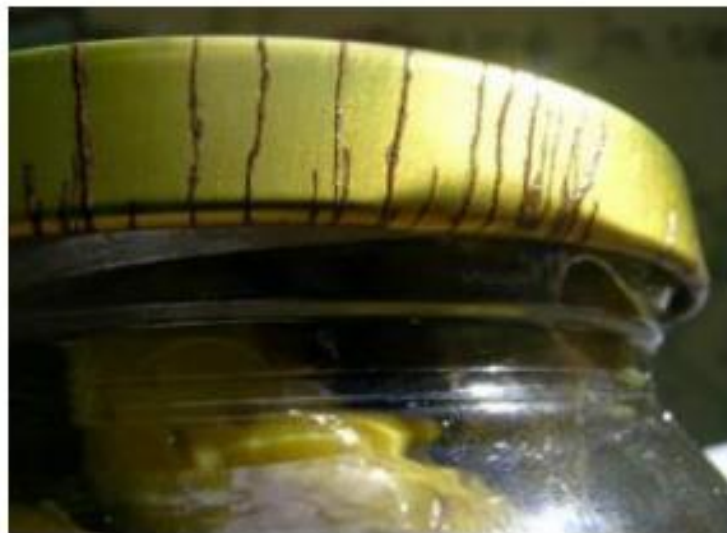
*Slika 3.6 Pojava bubrenja čelika [8]*

Eksfolijacija (slika 3.7) oblik je interkristalne korozije pri kojoj dolazi do širenja paralelno sa površinom granica zrna, počevši sa zrnima najbližima površini metala. Metal zahvaćen ovim oblikom korozije lista se u slojeve te se mrvi. Eksfolijacija najčešće zahvaća metale koji su prethodno oblikovani valjanjem odnosno čija su kristalna zrna određenom vrstom obrade deformirana te se posebno često pojavljuje kod aluminija i aluminijevih legura. [8,9]



*Slika 3.7 Eksfolijacija aluminijeve legure [8]*

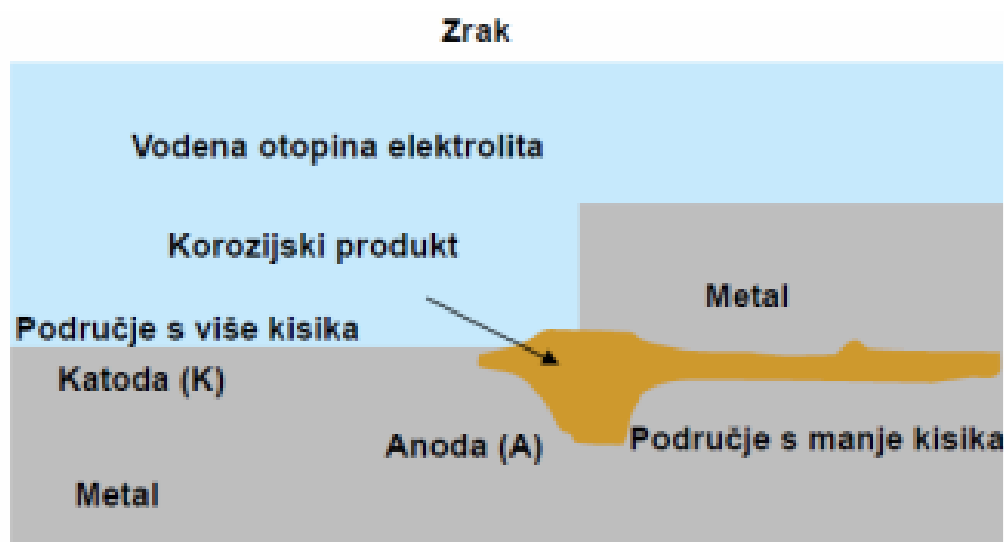
Filiformna korozija se najčešće povezuje s magnezijevim i aluminijevim legurama koje su zaštićene organskim prevlakama, primjerice na poklopcima staklenki za hranu ispod zaštitnih prevlaka na mjestima gdje je došlo do njihovih lokalnih oštećenja. Površina zahvaćena ovim tipom korozije ima po sebi nitaste filamente ispod prevlake, a korozijski produkt uzrokuje ispupčenja prikazana na slici 3.8. [5, 8]



*Slika 3.8 Filiformna korozija [8]*

### 3.2.3 Korozija u procijepu

Ova vrsta lokalne korozije je slična rupičastoj, a razlikuje se po tome što je inicijator korozije prisutnost procijepa umjesto klice jamice. Korozija u procijepu nastaje u procijepima ili u uskim površinskim pukotinama konstrukcije izrađene od materijala čiji su korozijski potencijali jednaki te na mjestima gdje se nakuplja voda i nečistoća te dolazi do smanjenja pH vrijednosti i povećanja koncentracije agresivnih tvari. Također, ova vrsta korozije može nastati uslijed razlike koncentracije kisika u elektrolitu. Zbog ograničene difuzije kisika u procijepu dolazi do stvaranja članka diferencijalne aeracije. U tom će slučaju unutar procijepa gdje je manjak kisika biti anoda, a izvan procijepa će, gdje je veća količina kisika, biti katoda. Dobar primjer korozije u procijepu je korozija navoja vijka i matice ili zakovični spojevi. [8, 10] Na slici 3.9 shematski je prikazana korozija u procijepu.



Slika 3.9 Shema korozije u procijepu [8]

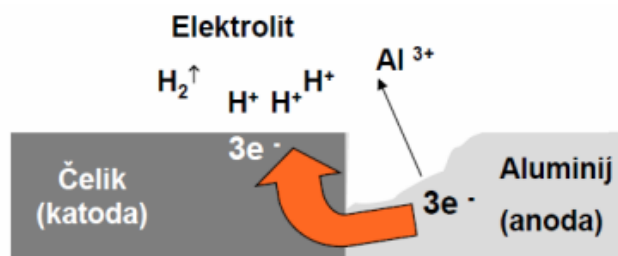
Na slici 3.10 je prikazan primjer oštećenja metala uslijed djelovanja korozije u procijepu.



Slika 3.10 Oštećenje metala uslijed korozije u procijepu [8]

### 3.2.4 Galvanska korozija

Galvanska korozija je lokalna korozija koju se još naziva kontaktnom ili bimetalnom korozijom. Ova vrsta lokalne korozije nastaje na mjestu kontakta dvaju metala različitih elektrodnih potencijala uz prisutnost elektrolita, odnosno formiranjem galvanskoga članka. Metal nižeg elektrodnog potencijala bit će anoda galvanskoga članka te će korodirati. Ovo je veoma opasan oblik korozije zato što anodni materijal korodira velikom brzinom. Na galvansku koroziju utječu veličine anode i katode. Ako je anoda velika, a katoda mala, katoda zbog manje površine za redukciju te manje gustoće korozijske struje ima mali utjecaj na anodu. U suprotnom slučaju, kada je katoda velika, a anoda mala, anoda ubrzano korodira jer je utjecaj katode na anodu velik. Shematski primjer galvanske korozije čelika i aluminija prikazan je na slici 3.11.



Slika 3.11 Shema galvanske korozije čelika i aluminija [8]

Da bi se vjerojatnost nastanka galvanske korozije smanjila treba izbjegavati korištenje metala čiji su elektrodni potencijali značajno različiti.

### 3.3 Selektivna korozija

Razlikuju se dva oblika selektivne korozije – grafitizacija korozija te decinkacija korozija. Kod selektivne korozije korodira samo jedna faza višefaznog materijala, i to ona koja je neplemenitija, ili jedna komponenta višekomponentnog i jednofaznog materijala. Pri ovoj vrsti korozije dolazi do pretvaranja duktilnog i čvrstog metala u slabi i krhki metal podložan lomu bez velikih promjena dimenzija te je iz toga razloga opasna.

#### 3.3.1 Decinkacija

Proces decinkacije rastvara cink iz legure koja ga sadrži te koja se nalazi u vodenoj okolini. Decinkacija može biti samo površinska, ali može i prodrijeti duboko u materijal. Ova vrsta selektivne korozije je komponentna, a često se pojavljuje kod mjedi (legura bakra i cinka. Nakon takvog procesa struktura je slabe mehaničke otpornosti zbog narušene čvrstoće, a površina je prekrivena crvenim mrljama. Bakrene legure s manje od 15 % cinka i mjedi inhibirane arsenom ili antimonom otporne su na decinkaciju u vodenoj okolini ili tlu. [8, 11] Na slici 3.12 je prikazana decinkacija brodskog propelera.



Slika 3.12 Decinkacija brodskog propelera [8]

### 3.3.2 Grafitizacija

Proces selektivnog otapanja željeza iz sivog lijeva čija se željezna matrica (ferit i perlit) otapa, a spužvasti grafit prožet hrđom ostaje naziva se grafitizacija. Grafitizacija je fazna selektivna korozija, a razvija se u slanoj vodi, razrijeđenim kiselinama te u određenim vrstama tla (ponajviše u onima bogatim sulfatima). Grafit je u odnosu na željezo katodan, a struktura sivog lijeva razvija galvanski članak te iz tog razloga dolazi do selektivnog otapanja.

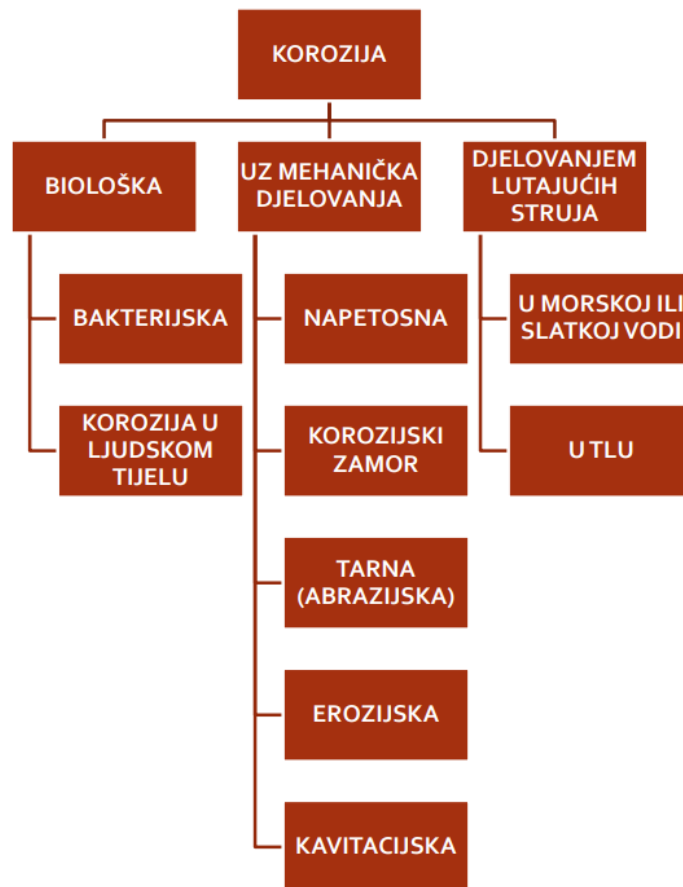
### 3.4 Interkristalna korozija

Interkristalna korozija je vrsta korozije koja nevidljivo napreduje duž granica kristalnih zrna ili u neposrednoj blizini granica zrna. Ova vrsta korozije razara metalnu vezu između zrna dok središte kristalnog zrna ostaje uglavnom netaknuto te se čvrstoća i žilavost zahvaćenog materijala naglo smanjuju. Interkristalna je korozija povezana sa senzibilizacijom uslijed dovođenja topline (zavarivanje ili toplinska obrada) pri čemu se po granicama kristalnih zrna izlučuju kromovi karbidi, a dijelovi uz granice kristalnih zrna posjeduju manje kroma ( $Cr < 12\%$ ) pa više nisu postojani na koroziju. Najčešće zahvaćeni materijali ovom korozijom jesu nehrđajući čelici (austenitne i feritne mikrostrukture) i legure na bazi aluminija i nikla. [5,8]

### 3.5 Posebni oblici elektrokemijske korozije

U posebne oblike elektrokemijske korozije ubrajaju se korozija uz mehaničko djelovanje, biološka korozija te korozija djelovanjem lutajućih struja čije su podvrste prikazane u dijagramu na slici 3.13. U biološku koroziju ubrajaju se bakterijska korozija te korozija u ljudskom tijelu. Korozija uz mehaničko djelovanje može se podijeliti na erozijsku koroziju, korozijski zamor, napetosnu koroziju, kavitacijsku koroziju te tarnu koroziju. Korozija djelovanjem lutajućih struja dijeli se na koroziju u slatkoj vodi ili koroziju u morskoj vodi te koroziju u tlu.





Slika 3.13 Posebni oblici elektrokemijske korozije [8]

### 3.5.1 Biološka korozija

Biološka se korozija dijeli na bakterijsku koroziju i koroziju u ljudskom tijelu. Bakterijska korozija nastaje uslijed oštećenja metalnog materijala pri metaboličkoj aktivnosti mikroorganizama, a pojavljuje se u cjevovodima i spremnicima vode, plina i nafte, otpadnih voda, rashladnim sustavima (rashladni tornjevi, izmjenjivači topline), kondenzatorima nuklearnih i termoelektrana, dokovima, tankovima za gorivo u vozilima te vodenim strukturama u zoni zapljuskivanja i niske plime. Koroziju ugljičnih i nehrđajućih čelika te legura aluminija i bakra u vodi i tlu, pH vrijednosti od 4 do 9 te pri temperaturi između 10 °C i 50 °C uzrokuje oko deset poznatih bakterija, a najpoznatiji je primjer sulfatreducirajuća bakterija (SRB) koja za metaboličke reakcije koristi kisik iz sulfatnog iona te reducira sulfate do sulfida. Na slici 3.14 je prikazan primjer ugljičnog čelika oštećenog djelovanjem bakterijske korozije. [8]



*Slika 3.14 Bakterijska korozija ugljičnog čelika [8]*

Pod korozijom u ljudskom tijelu podrazumijeva se korozija implantata u ljudskom tijelu koja uzrokuje bol kod pacijenata te dovodi do loma implantata kojeg je radi loma potrebno zamijeniti. Na ovaj tip korozije utječu koncentracija iona, pH fluida (tjelesnih tekućina), brzina fluida, vrsta materijala, mehanička naprežanja, tjelesna temperatura te način i kvaliteta izrade implantata.

### 3.5.2 Korozija uz mehaničko djelovanje

U koroziju uz mehaničko djelovanje ubrajaju se napetosna korozija, korozijski zamor, tarna (abrazijska), erozijska te kavitacijska korozija.

Do pojave napetosne korozije dolazi na metalnim materijalima i legurama uz djelovanje korozivne okoline i vlačnih naprežanja koja mogu biti vanjska ili zaostala, a posljedica su hladne deformacije, toplinske obrade, zavarivanja i slično. Za posljedicu ova vrsta korozije ima lom metalnog materijala. Do napetosne korozije dolazi na nehrđajućim čelicima, austenitnu i martenzitu, koji se nalaze u elektrolitima čija je pH-vrijednost visoka ili koji sadrže sumporovodik pri temperaturama iznad 55 °C. Također, ova vrsta korozije zahvaća i ugljične i niskolegirane čelike koji su u dodiru sa sumporovodikom gdje u reakciji željeza i sumporovodika dolazi do stvaranja atomarnog vodika koji difundira u rešetku željeza. Ovakva reakcija uzrokuje distorziju i napetosti rešetke što rezultira stvaranjem mikropukotina. Pukotine se mogu širiti interkristalno po granicama kristalnih zrna ili transkristalno preko kristalnih zrna, a način na koji se pojedina pukotina širi ovisi o vrsti materijala. Na slici 3.15 je prikazan primjer loma uslijed djelovanja napetosne korozije.



*Slika 3.15 Lom uslijed djelovanja napetosne korozije [8]*

Do korozijskog zamora (eng. corrosion fatigue) dolazi na metalnim materijalima i legurama pri utjecaju korozivne okoline i cikličkih dinamičkih naprezanja što dovodi do bržeg oštećenja metala i loma, nego u slučaju kada bi korozivna okolina i ciklička naprezanja djelovala zasebno. Korozijski zamor često uzorkuje lom materijala. Primjer loma vratila uslijed djelovanja korozijskog zamora u morskoj vodi prikazan je slikom 3.16.



*Slika 3.16 Lom vratila nastao kao posljedica korozijskog zamora u morskoj vodi [8]*

Do tarne korozije (eng. fretting corrosion) koja se još naziva i abrazijskom korozijom ili tribokorozijom dolazi na kontaktnoj površini materijala koji su pod opterećenjem djelovanja korozivne okoline, klizanja te vibracija. Ova korozija može se prepoznati po žljebovima i rupicama. Primjer oštećenja tarnom korozijom prikazan je na slici 3.17.



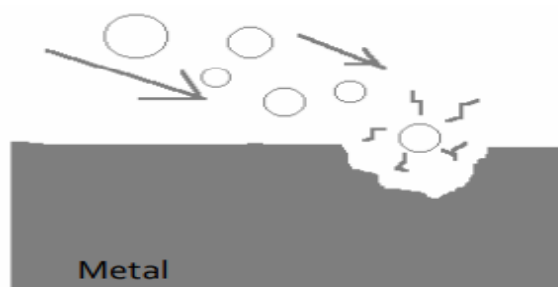
*Slika 3.17 Primjeri oštećenja tarnom korozijom [8]*

Do erozijske korozije dolazi djelovanjem korozije i erozije (gubitka materijala uzrokovanog međudjelovanjem površine i medija), najčešće u sustavima za prijenos tekućina. Fluid, koji protiče velikom brzinom, skida zaštitne slojeve metala što rezultira konstantnim i ponovnim izlaganjem metala djelovanju korozije. Erozijska korozija je posebno štetna u cijevima zbog oštećenja stijenki cijevi te isticanja fluida. Ugljični čelici, stvarajući debele zaštitne slojeve koji slabo prijanjaju pa su uz bakar i njegove legure, najpodložniji erozijskoj koroziji. Brzina protoka fluida vrlo je važan čimbenik koji utječe na erozijsku koroziju. Na slici 3.18 je prikazano oštećenje cijevi nastalo djelovanjem erozijske korozije.



*Slika 3.18 Oštećenje cijevi nastalo djelovanjem erozijske korozije [8]*

Do kavitacijske korozije dolazi djelovanjem korozivskih procesa i kavitacije na površini metalnog materijala koja je u kontaktu s medijem koji provodi električnu struju te razlika tlakova u elektrolitu oslobađa mjehuriće pare koji se zabijaju u površinu metala te prilikom toga implodiraju, time uzrokujući lokalne deformacije te kavitacijsku koroziju metalnog materijala. Kavitacija je pojava nastajanja mjehurića pare unutar kapljevine koja struji te njihovo iščezavanje uz pojavu udarnih tlakova. Mjehurić pare nošen je strujom fluida u područje viših tlakova gdje dolazi do njihove implozije uz nastajanje visokih, udarnih tlakova. Kavitacija je shematski prikazana na slici 3.19.



*Slika 3.19 Kavitacija [8]*

Na mjestima gdje je kavitacija bila najviše izražena dolazi do nastajanja velikih oštećenja zbog čega se smanjuje debljina materijala, površina postaje hrapava. Na slici 4.20 prikazano je oštećenje lopatice turbine uslijed kavitacijske korozije.

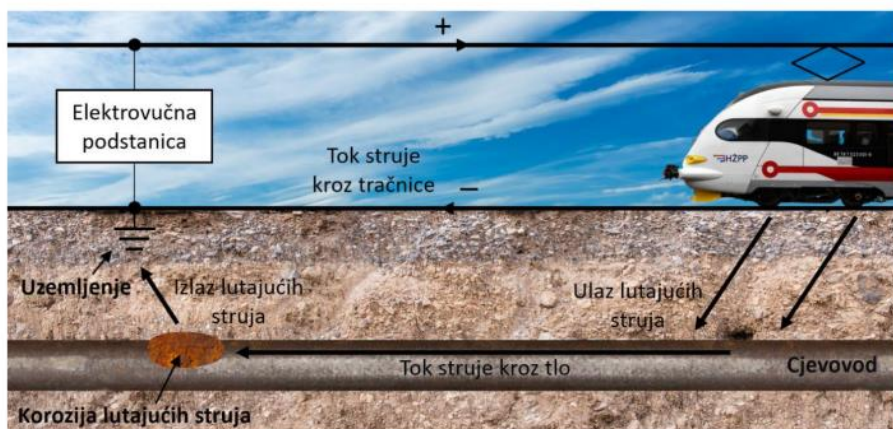




Slika 3.20 Oštećenje lopatice turbine uslijed kavitacijske korozije [8]

### 3.5.3 Korozija djelovanjem lutajućih struja

Lutajuće struje mogu biti istosmjerne ili izmjenične. Uzemljeni električni vodovi i ostali uređaji istosmjerne struje kojima je jedan vod uzemljen uzrokuju stvaranje istosmjerne lutajuće struje. Lutajuća struja teče kroz stijenke cjevovoda i stvara korozijski članak na način da je mjesto gdje lutajuća struja izlazi iz cjevovoda – anoda, isto je prikazano na slici 3.21.



Slika 3.21 Mehanizam korozije djelovanjem lutajućih struja [8]

Ova vrsta korozije najčešće se pojavljuje u morskoj ili slatkoj vodi na brodovima koji se nalaze u luci te u tlu na raznim objektima koji su smješteni ispod zemljine površine, posebno cjevovodima, ali i na poluukopanim spremnicima ne zaštićenim katodnom zaštitom. Na slici 3.22 prikazana je šteta nastala uslijed korozije djelovanjem lutajućih struja.



*Slika 3.22 Oštećenje uslijed korozije djelovanjem lutajućih struja [8]*

## 4. METODE ZAŠTITE METALA OD KOROZIJE

Korozija predstavlja jedan od većih problema većina industrija te se iz toga razloga javila potreba za zaštitom materijala od korozije. Za zaštitu materijala od djelovanja korozije potrebno je primijeniti načela zaštite od korozije, odnosno, smanjiti ili zaustaviti pokretačku silu (uzrok oštećivanja) ili povećati otpore koji se odupiru djelovanju pokretačke sile. Povećanje otpora koji se odupiru djelovanju pokretačke sile može se postići promjenom unutrašnjih ili vanjskih čimbenika oštećivanja ili odvajanjem konstrukcijskog materijala od medija.

Životni vijek konstrukcije te samim time i smanjenje troškova postiže se primjenom raznih metoda zaštite od korozije. U metode zaštite od korozije ubrajaju se:

- konstrukcijsko-tehnološke mjere
- zaštita inhibitorima korozije
- odabir materijala
- zaštita prevlačenjem
- elektrokemijska zaštita.

### 4.1 Odabir materijala

Osnovna metoda zaštite od korozije je odabir materijala čija je kombinacija svojstava najbolje s obzirom na radnu okolinu, mehanička naprezanja i cijenu. Do šteta nastalih djelovanjem korozije najčešće dolazi zbog ne adekvatnog odabira materijala. Korozijska postojanost materijala predstavlja njegovu otpornost na djelovanje okolnog medija, ona se procjenjuje gubitkom mase i volumena, promjene mehaničkih i drugih svojstava tijekom korozijskog djelovanja i pojava površinskih oštećenja ili strukturnih promjena unutrašnjosti presjeka. Onaj materijal kod kojeg u jednakim vanjskim uvjetima dolazi do manje intenzivnog razaranja površine ili do manje neželjenih promjena mikrostrukture i svojstava materijala smatra se korozijski postojanijim od drugog materijala.

Korozijski postojani čelici ispunjavaju dva uvjeta:

- sadrže barem 12% kroma otopljenog u kristalu mješancu željeza što rezultira pasiviranjem površine stvaranjem tankog i gustog zaštitnog filma te eventualnom potpunom korozijskom postojanošću



- posjeduju homogenu monofaznu mikrostrukturu zbog sprječavanja nastajanja lokaliteta različitoih elektrodnih potencijala u odnosu na osnovnu masu čelika (sprječavanje nastanka mikrogalvanskih članaka u strukturi).

U slučaju kada bi čelici koji su korozijski postojani posjedovali samo feritnu, austenitnu ili martenzitnu mikrostrukturu bez karbida, oksida te ostalih intermetalnih faza, bilo bi moguće izbjeći nastajanje mikrogalvanskih članaka, odnosno pojavu korozije.

## 4.2 Konstrukcijsko-tehnološke mjere

Konstrukcijsko-tehnološkim mjerama moguće je uvelike usporiti koroziju i produljiti vijek trajanja materijala. Tehnološke mjere podrazumijevaju promjenu okoline na sljedeće načine:

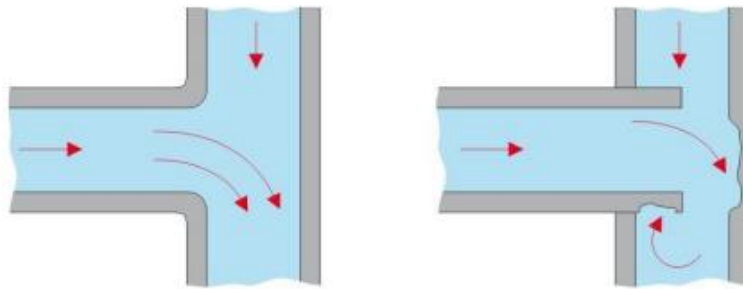
- snižavanjem temperature elektrolita (pri nižim temperaturama reakcije korozije su sporije)
- smanjenjem brzine strujanje elektrolita (pri većim brzinama strujanja korozijska reakcija je brža, erozijska i kavitacijska erozija su jače, izuzetci su nehrđajući čelici koji su otporniji pri većim brzinama elektrolita, a korodiraju u stagnirajućim uvjetima)
- smanjenjem koncentracije agresivnih plinova u radnoj okolini (npr. u tvornicama)
- deaeracijom, odnosno uklanjanjem zraka, a samim time i kisika iz radnih fluida.

Konstrukcijske mjere odnose se na prilagodbu konstrukcijskog rješenja u svrhu izbjegavanja problema s korozijskim oštećenjima konstrukcije tijekom daljnjeg rada. Smjernice koje valja slijediti prilikom konstruiranja kako bi se postigla optimalna korozijska postojanost jesu [12]:

- konstrukciju oblikovati što jednostavnije u svrhu lakšeg čišćenje i kvalitetne zaštite prevlakama
- izbjegavati konstrukcijska rješenja koja dovode do nastanka različitih procijepa
- konstrukcijom onemogućiti nagomilavanje vode i agresivnih tekućina u svrhu lakog otjecanje pri eksploataciji ili čišćenju
- izbjegavati spajanje metala različitih stupnjeva plemenitosti radi izbjegavanja pojave galvanske korozije
- izbjegavati visoke temperature, tlakove, naprezanja i brzine gibanja medija ako to nije funkcionalno potrebno te izbjegavati lokalno intenzivno zagrijavanje
- izbjegavati oštre zavoje u cjevovodima u svrhu smanjenja opasnosti od erozijske korozije
- izbjegavati mehanička naprezanja radi smanjenja opasnosti od napetosne korozije

- ispravno izvedeni zavareni spojevi imaju prednost pred zakovičnim i vijčanim spojevima jer na taj način smanjuju opasnost od korozije u procijepu te smanjuju masu konstrukcije.

Na slici 4.1 je prikazano konstrukcijsko rješenje za smanjenje opasnosti od djelovanja erozijske korozije.

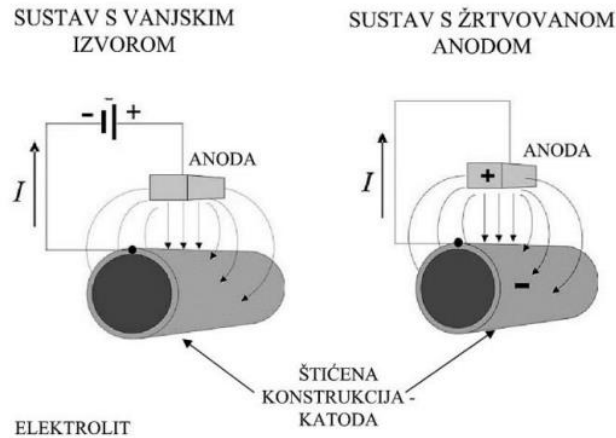


Slika 4.1 Smanjenje opasnosti od erozijske korozije [12]

### 4.3 Elektrokemijska zaštita

Ovakvom se vrstom zaštite metal provodi u pasivno ili imuno stanje u kakvom ne dolazi do pojave korozije. U elektrokemijsku zaštitu ubrajaju se katodna te anodna zaštita.

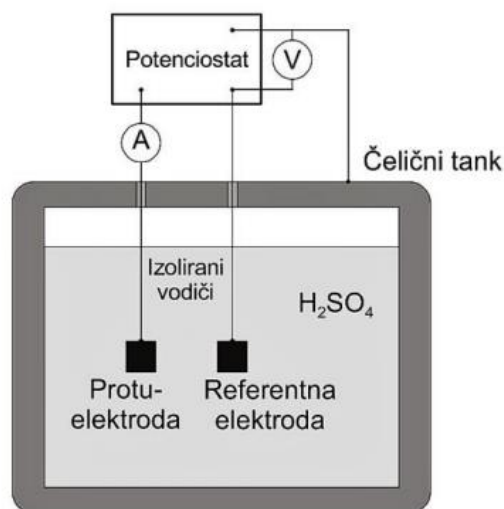
Katodna se zaštita vrši snižavanjem potencijala te se metal prevodi u imuno stanje. Ova se vrsta elektrokemijske zaštite može provesti žrtvovanom anodom ili vanjskim izvorom struje. Zaštita žrtvovanom anodom ostvaruje se tako da se metal veže na materijal koji ima negativniji elektrodni potencijal što kao posljedicu ima anodno rastapanje odnosno zaštitu katode. Zaštita vanjskim izvorom struje postiže se tako da se metal koji se štiti od korozije spoji na negativniji pol izvora istosmjerne struje. Navedene vrste katodne zaštite prikazane su na slici 4.2.



Slika 4.2 Vrste katodne zaštite [5]

Ovu vrste zaštite koristi se kod zaštite čelika i mjedi, olova, bakra i aluminija u tlu i većini vodenih otopina. Kombinacijom katodne zaštite i sustava premaza postižu se najbolji rezultati.

Anodna zaštita postiže se povećanjem potencijala metala te se metal dovodi u pasivno stanje. Anodna se zaštita može postići žrtvovanim katodama ili vanjskim izvorom struje. U oba navedena pristupa, metalna konstrukcija se ponaša kao anoda, uspostavljajući zaštitna svojstva. Nastale anode na taj način početno se otapaju sve dok materijal ne postane pasivan. Preporučljivo je da se vrijeme otapanja minimalizira kako bi zaštitni sloj mogao biti formiran čim prije. Princip anodne zaštite čeličnog spremnika prikazan je na slici 4.3.



Slika 4.3 Anodna zaštita [5]

Primjena anodne zaštite ograničena je te se iz tog razloga koristi samo u određenim slučajevima. Kod iste postoji opasnost da polarizacijski napon prijeđe gornju granicu prilikom čega dolazi do razaranja formiranog zaštitnog filma te nastupa intenzivna korozija metala. Uobičajeno se primjenjuje radi zaštite čeličnih konstrukcija u izuzetno korozivnom okruženju u kojem nema prisutnih iona koji djeluju kao aktivatori, odnosno kao tvari koje potiču ili ubrzavaju određene kemijske procese. Ova tehnika također ima primjenu u zaštiti čelika, titanija i njegovih legura, nikla, aluminija te ugljičnih čelika u otopinama nitrata i sulfata. [5, 12]

#### **4.4 Zaštita inhibitorima**

Inhibitori su tvari organskog ili anorganskog podrijetla koje se dodaju korozivnoj otopini u veoma malim koncentracijama čime se postiže smanjenje brzine korozije. Inhibitori reagiraju s površinom metala ili okolinom u kojoj se metal nalazi dajući joj određenu razinu zaštite, odnosno oni se adsorbiraju na površinu metala pritom stvarajući zaštitni film. Mehanizam djelovanja inhibitora može biti različit pa se razlikuju inhibitori koji proizvode ili olakšavaju nastajanje barijera, odnosno tankog filma ili sloja korozijskog produkta između okoline i metala te inhibitore koji umanjuju disocijaciju iona u korozivnoj otopini te na taj način smanjuju tok korozije, a to se može postići dodavanjem alkohola ili organskih spojeva u vodene otopine. Također, inhibitore se dijeli na anodne, katodne, mješovite te hlapive inhibitore. Anodni inhibitori koče ionizaciju metala te ih se dijeli na pasivatore koji prevode metala i legure u pasivno stanje i taložne koji s ionima metala daju netopive korozijske produkte. Katodni inhibitori koče katodnu reakciju ili djeluju jednako kao prethodno spomenuti taložni inhibitori. Mješoviti inhibitori koče katodnu i anodnu reakciju, hlapivi se koriste za zaštitu od atmosferske korozije.

#### **4.5 Zaštita prevlačenjem**

Zaštita metala od korozije putem prevlaka predstavlja ključni aspekt u očuvanju integriteta i trajnosti metalnih materijala u različitim okruženjima te je ovo najraširenija metoda zaštite od korozije. Prevlake metalu služe kao barijera prema agresivnom mediju, kao zaštita od mehaničkog trošenja, a mogu imati i dekorativnu ulogu. Efikasnost njihovog zaštitnog djelovanja ovisi o debljini i kompaktnosti prevlake te o njenoj čvrstoći prijanja o materijal. Prije nanošenja prevlake

površina se metala mora pripremiti mehaničkom predobradom, odmaščivanjem, kemijskom obradom te kemijskim i elektrokemijskim poliranjem. Razlikuju se metalne, anorganske te organske prevlake.

#### 4.5.1 Metalne prevlake

Metalnim se prevlakama metal štiti od korozije, ali je njima moguće postići i različiti svojstva površine metala kao što su čvrstoća, tvrdoća, sjaj i mnoga druga. U postupke nanošenja metalnih prevlaka ubrajaju se galvanizacija, vruće uranjanje te vruće prskanje. Vruće uranjanje i vruće prskanje spadaju u fizikalne postupke, a galvanizacija je kemijski postupak.

Galvanizacija se naziva još i elektroplatanje ili galvanostegija te se postiže propuštanjem električne struje kroz otopinu metalnih iona u koju je osnovni metal uronjen. Prilikom takvog postupka osnovni se materijal ponaša kao katoda koja na sebe privlači metalne ione iz otopine. Metalni materijali se galvaniziraju metalima kao što su aluminij, krom, nikal, olovo, cink te plemenitim metalima (srebro, zlato i platina).

Da bi se postupak vrućeg uranjanja proveo uspješno potrebno je zadovoljiti dva osnovna uvjeta:

- talište osnovnog materijala mora biti znatno više od metala prevlake
- međusobno otapanje mora osigurati legiranje metala, odnosno mora se postići tvorba kristala mješanaca ili intermetalnih spojeva kako bi se osigurala prionjivost.

Postupak vrućeg prskanja podrazumijeva štrcanje kapljica rastaljenog metala zračnim mlazom na podlogu te je za ovaj postupak potrebna hrapava površina radi prionjivosti. Vruće prskanje je primjenjivo na sve metale i legure, a temperatura podloge mora biti između 50 °C i 200 °C.

#### 4.5.2 Anorganske prevlake

Postupci nanošenja anorganskih prevlaka mogu biti fizikalni (prevlake emajla i betona) te kemijski (oksidne, kromatne, nitridne, fosfatne prevlake gdje osnovni metal sudjeluje u stvaranju prevlake).

Emajliranje je postupak nanošenja sloja alkalijsko-borosilikatnog stakla na površinu metalnog materijala. Istim se nanose slojevi mljevenog stakla koje se fiksira pečenjem te nastaje kompaktni sloj. Nedostatak emajliranja je krhkost površine. Upotreba emajliranja je prisutna u zaštiti metala

koji su izloženi izuzetno korozivnim okolinama. Oksidne se prevlake nanose na čelik, bakar i aluminij te legure istih. Bruniranje je postupak zaštite od korozije kojim se na površini čelika stvara oksidni sloj magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) crne boje čija debljina iznosi 2  $\mu\text{m}$  te je porozan. Bruniranje se koristi za zaštitu vanjskih dijelova oružja. Eloksiranje je postupak elektrolitičke oksidacije površine s ciljem stvaranja dobro prijanjajućeg oksidnog sloja veće debljine od onog koji nastaje prirodno. Ono je elektrokemijski proces gdje aluminij predstavlja anodu koja je uronjena u elektrolit, a električna struja koja prolazi kroz elektrolit pretvara površinu anode u aluminijev oksid dobre izdržljivosti. [5, 12]

#### 4.5.3 Organske prevlake

Organski premazi obuhvaćaju širok spektar materijala kao što su akrilati, epoksidi, poliuretani i mnogi drugi. Organski premazi zauzimaju ključno mjesto u antikorozivnoj zaštiti te se često primjenjuju radi svoje pristupačne cijene u usporedbi s ostalim tehnikama zaštite. Njihova svrha je stvoriti barijeru između metalne površine i potencijalno štetnih faktora iz okruženja. Stoga je od velikog značaja da ovi premazi budu otporni i dugotrajni tijekom čitavog perioda eksploatacije. Osim svoje zaštitne funkcije, organski premazi mogu pružiti i električnu izolaciju, svojstva koja su otporna na vatru ili se mogu koristiti u svrhu označavanja.

## 5. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu ovog diplomskog rada izvršeno je elektrokemijsko ispitivanje brzine korozije četiri uzorka čelika 51CrV4 u 3,5%-tnoj otopini NaCl-a od kojih je jedan uzorak ispitan prije toplinske obrade, a ostala tri uzorka nakon različitih postupaka toplinske obrade. Rezultati ispitivanja dobiveni su u obliku dijagrama s krivuljama stacionarnog potencijala otvorenog strujnog kruga i Tafelovih krivulja pomoću kojih je moguće dobiti uvid u korozijskog ponašanje uzoraka u navedenom elektrolitu.

### 5.1 Materijali za ispitivanje

U ovom su ispitivanju korišteni uzorci istog čelika oznake EN 51CrV4 (DIN 1.8159). Kemijski sastav čelika izmjeren je pomoću spektrometra te je prikazan u tablici 5.1, a u tablici 5.2 prikazana su mehanička svojstva istoga.

Tablica 5.1 Kemijski sastav čelika 51CrV4

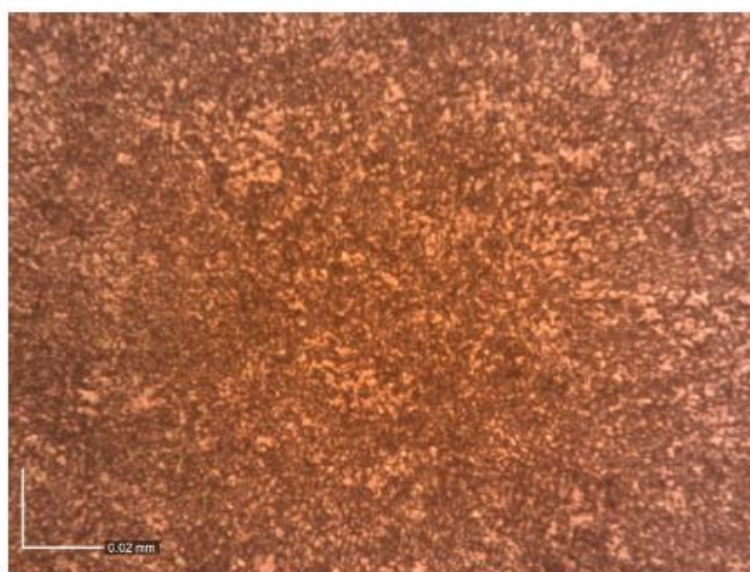
Kemijski element	Maseni udio kemijskih elementa [%]
Ugljik (C)	0,564
Silicij (Si)	0,299
Mangan (Mn)	0,865
Fosfor (P)	0,0153
Sumpor (S)	0,0162
Nikal (Ni)	0,0381
Krom (Cr)	1,15
Molibden (Mo)	0,0176
Bakar (Cu)	0,0260
Aluminij (Al)	0,0306
Vanadij (V)	0,139
Željezo (Fe)	96,8

Na temelju kemijskog sastava izračunata je ekvivalentna masa potrebna u daljnjem ispitivanju prema izrazu 2.7 te je dobivena vrijednost ekvivalentne mase od 27,714 g koja je izračunata na temelju 100%-tnog udjela željeza, uz relativnu masu željeza jednaku 55,854 i dva otpuštena elektrona u reakciji oksidacija. Gustoća čelika iznosi 7,85 g/cm<sup>3</sup>.

Tablica 5.2 Osnovna mehanička svojstva čelika EN 51CrV4 [13]

Vlačna čvrstoća, $R_m$ [MPa]	667
Granica tečenja, $R_{p0,2}$ [MPa]	412
Istezljivost materijala, $A$ [%]	23

EN 51CrV4 je čelik za poboljšavanje te se ubraja u opružne čelike, a isporučuje se u normaliziranom stanju. Ovaj čelik svoje posebne karakteristike postiže kaljenjem i poboljšavanjem. Navedenim toplinskim obradama ovog čelika moguće je postići veliku tvrdoću i čvrstoću, veliku otpornost na abraziju i udarce te veliku žilavost zbog čega se često primjenjuje za dijelove koji su izloženi udarima, vibracijama i stresu. Za zavarivanje ovog čelika potrebno je prethodno izvršiti zagrijavanje te smanjivanje naprezanja nakon zavarivanja. Ovaj se čelik često primjenjuje u strojnim dijelovima koji su izloženi velikom opterećenju (zupčanici, osovine...). [13, 14] Čelik 51CrV4 u normaliziranom stanju posjeduje feritno-perlitnu mikrostrukturu te je ona prikazana na slici 5.2.



Slika 5.1 Mikrostruktura uzorka čelika EN 51CrV4 [14]



## 5.2 Toplinska obrada uzoraka

Kao što je ranije spomenuto, ispitivanje se provodilo na četiri uzorka od kojih jedan nije toplinski obrađen, već je u normaliziranom stanju, a ostala tri jesu. Od ta tri uzorka jedan je uzorak kaljen, a druga dva su nakon kaljenja popušteni na različitim temperaturama. Uzorci su toplinski obrađeni u laboratorijima Tehničkog fakulteta u Rijeci.

Postupak kaljenja čelika 51CrV4 sastojao se iz zagrijavanja uzoraka na temperaturi austenitizacije od 850 °C (slika 5.3 i slika 5.4), držanja na toj temperaturi u trajanju od 15 minuta te gašenja u ulju (slika 5.5). Kaljeni uzorci imaju martenzitnu mikrostrukturu.



*Slika 5.2 Peć za toplinsku obradu*



*Slika 5.3 Vađenje uzoraka iz peći za toplinsku obradu*



*Slika 5.4 Ulje za gašenje uzoraka čelika*

Nakon kaljenja, dva od tri uzorka toplinski su obrađeni i popuštanjem. Jedan je uzorak popuštan na temperaturi od 400 °C, a drugi na temperaturi od 600 °C te je vrijeme popuštanja iznosilo 60 minuta. U tablici 5.3 su prikazani parametri toplinske obrade svih uzoraka.

Tablica 5.3 Parametri toplinske obrade za uzorke čelika 51CrV4

Toplinska obrada	Parametri toplinske obrade	Uzorak 1 (normalizirano stanje)	Uzorak 2 (kaljenje)	Uzorak 3 (poboljšavanje)	Uzorak 4 (poboljšavanje)
Kaljenje	Temperatura austenitizacije	-	850 °C	850 °C	850 °C
	Ukupno vrijeme ugrijavanja	-	15 min	15 min	15 min
Popuštanje	Temperatura popuštanja	-	-	400 °C	600 °C
	Vrijeme popuštanja	-	-	60 min	60 min

### 5.3 Elektrokemijsko ispitivanje brzine korozije

Prije elektrokemijskog ispitivanja površina uzoraka pripremljena je brušenjem te poliranjem na brusnim papirima. Najprije su uzorci brušeni na brusnom papiru tvrtke Presi finoće P320, a zatim P600, odnosno krenulo se s brusnim papirom većih (grubljih) abrazivnih čestica brusnog papira pa zatim manjih (finijih) kojim je ujedno izvršeno i poliranje. Prilikom brušenja potreban je i stalni dotok vode kako bi se odstranjene čestice uklonile s brusnog papira te ne bi grebale površinu uzorka. Korišteni brusni papiri prikazani su na slici 5.6.



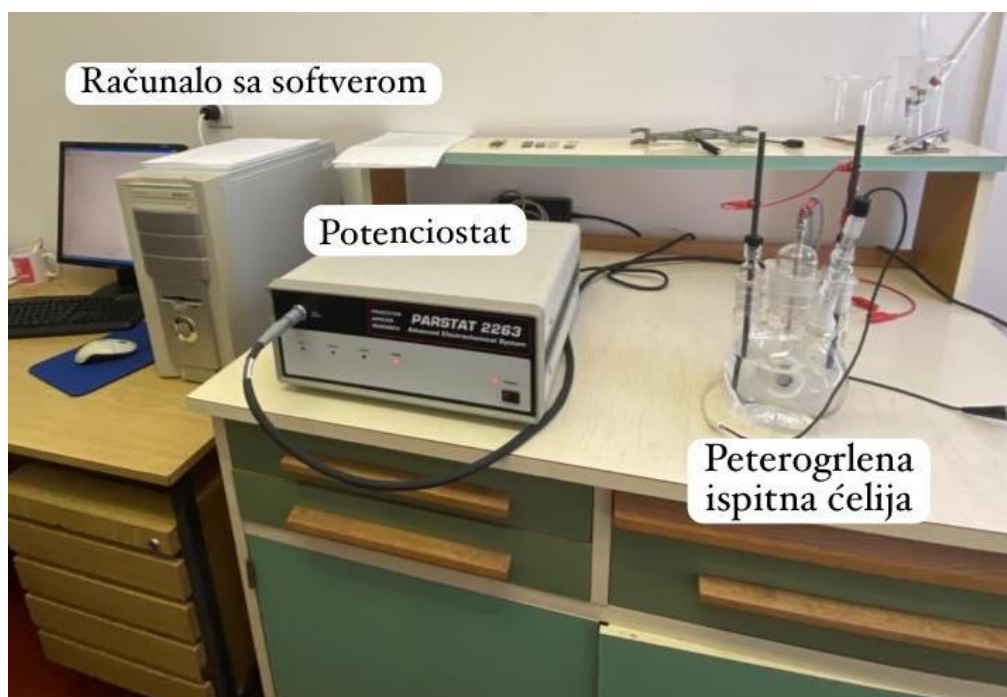
*Slika 5.5 Brusni papiri korišteni za brušenje i poliranje uzoraka*

Obje strane uzoraka su brušene i polirane te su nakon toga površine uzoraka glatke i zrcalne. Nakon brušenja uzorci su stavljeni u alkohol kako bi se uklonile masnoće nanese dodiranjem prstiju. Sva su se četiri uzorka ispitala u 3,5%-tnoj otopini NaCl-a koja je pripravljena miješanjem 26,25 grama NaCl-a i 0,75 l destilirane vode. Masa natrijeva klorida mjerena je pomoću precizne elektronske vage prikazane na slici 5.7.



*Slika 5.6 Precizna elektronska vaga*

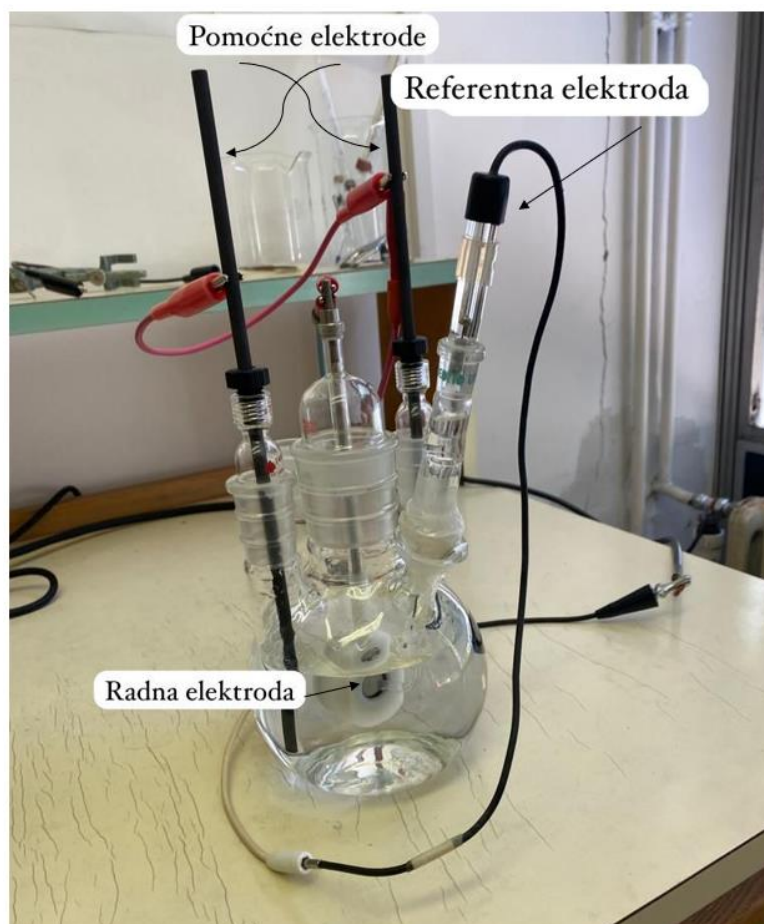
Korištena oprema za elektrokemijsko ispitivanje brzine korozije sastojala se iz računala koje mora posjedovati specijalizirani softver „PowerSuite“, potenciostata tvrtke Parrstat te peteroglene ispitne ćelije u koju se za svako ispitivanje uzoraka postavljaju radna, referentna te pomoćne elektrode (slika 5.8).



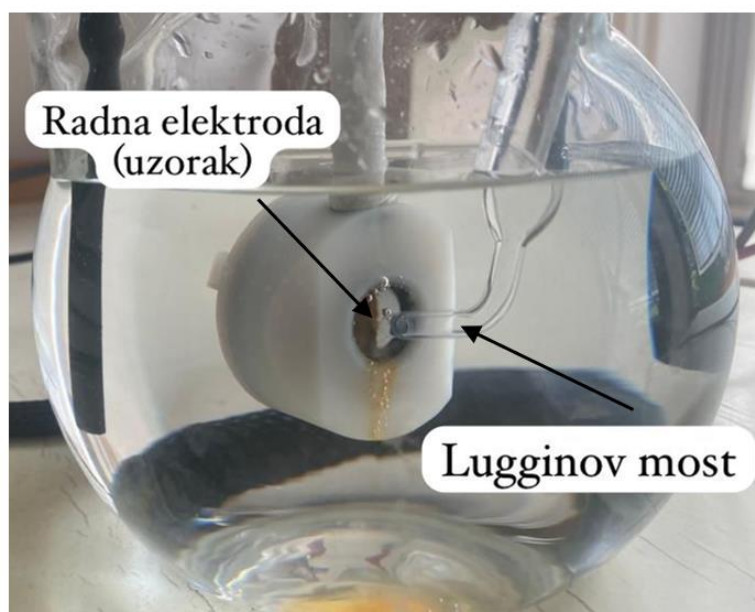
*Slika 5.7 Oprema korištena za elektrokemijsko ispitivanje*

Pripremljena se 3,5%-tna otopina NaCl-a pretočila u peteroglenu ispitnu ćeliju u koju se urone radna, referentna i pomoćne elektrode kako je prikazano na slici 5.9. Radnu elektrodu predstavlja ispitni uzorak koji je postavljen u posebni držač te povezan s referentnom elektrodom preko Lugginovog mosta kako je prikazano na slici 5.10.





Slika 5.8 Peterogrlena ispitna ćelija s radnom, referentnom i pomoćnim elektrodama



Slika 5.9 Lugginov most koji povezuje referentnu elektrodu s radnom elektrodom (uzorkom)

Nakon pripreme peteroglone ispitne ćelije provelo se, najprije, mjerenje ovisnosti potencijala otvorenog strujnog kruga o vremenu. U softver je bilo potrebno unijeti podatke o ekvivalentnoj masi materijala koji se ispituje, gustoći, površini uzorka izložene elektrolitu, vremenu trajanja ispitivanja te o vrsti referentne elektrode. Navedeni podaci i njihove vrijednosti prikazane su u tablici 5.4.

Tablica 5.4 Podaci potrebni softveru "PowerSuite" za ispitivanje

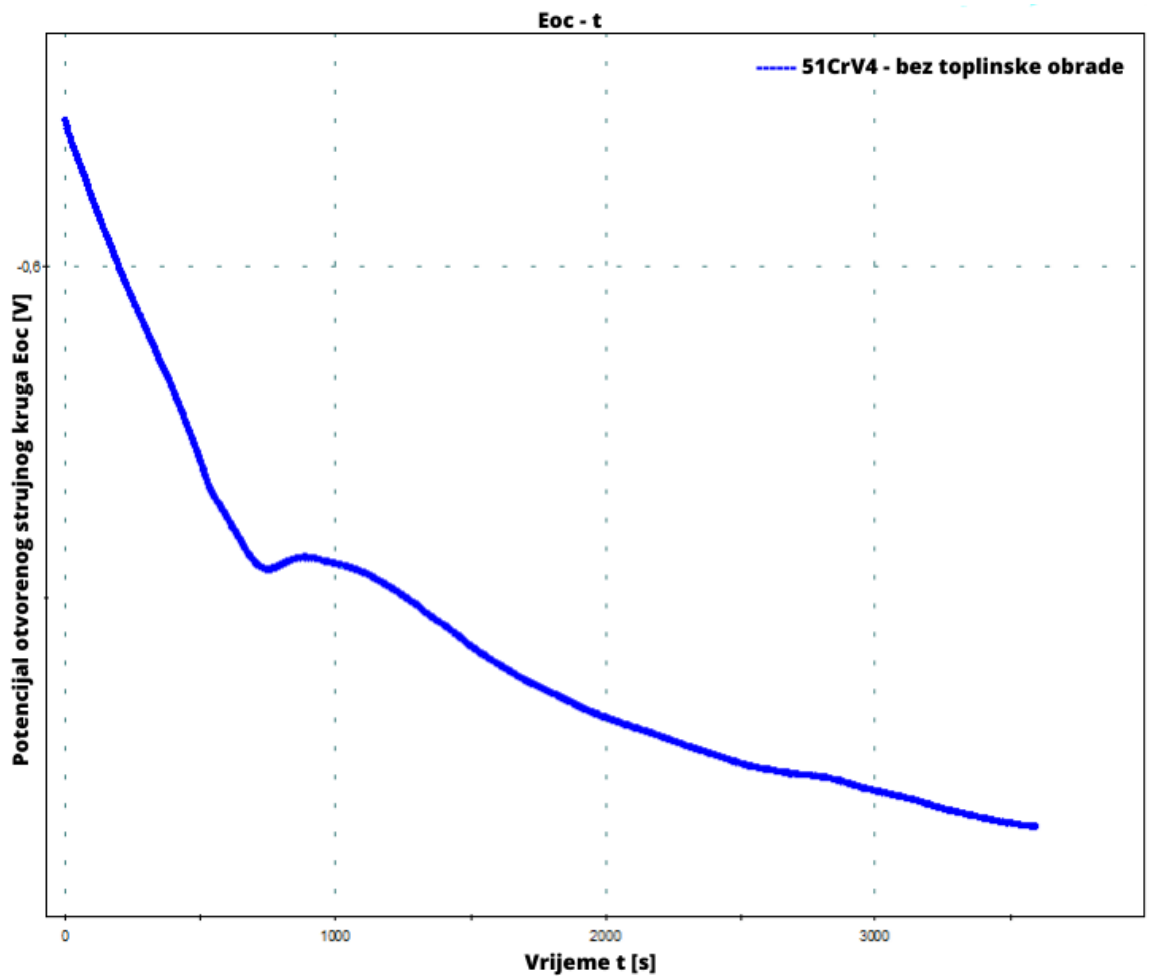
Traženi podatak	Vrijednost
Ekvivalentna masa materijala	27,714 g
Gustoća	7,85 g/cm <sup>3</sup>
Površina uzorka izložena elektrolitu	1 cm <sup>3</sup>
Vrijeme trajanja ispitivanja	3600 s
Vrsta referentne elektrode	Zasićena kalomel elektroda

Nakon što je izmjeren potencijal otvorenog strujnog kruga ( $E_{OC}$ ) slijede polarizacijska mjerenja s ciljem dobivanja krivulja anodne i katodne polarizacije u čijem području potencijal iznosi  $E_{OC} \pm 250$  mV. Nakon polarizacijskog mjerenja, dobivene krivulje anodne i katodne polarizacije potrebno je ekstrapolirati. U sjecištu tih pravaca očitava se gustoća korozijske struje  $j_{kor}$  i korozijski potencijal  $E_{kor}$ . Također, na temelju dobivenih podataka o gustoći korozijske struje i poznatih karakteristika ispitanog materijala prikazanih u tablici 5.4 moguće je izračunati brzinu korozije prema izrazu 2.6.

## 5.4 Rezultati ispitivanja

### 5.4.1 Rezultati ispitivanja uzorka u normaliziranom stanju

Prvi uzorak čelika 51CrV4 nije toplinski obrađen, a dobiveni rezultati mjerenja potencijala otvorenog strujnog kruga u ovisnosti o vremenu prikazani su na slici 5.11.

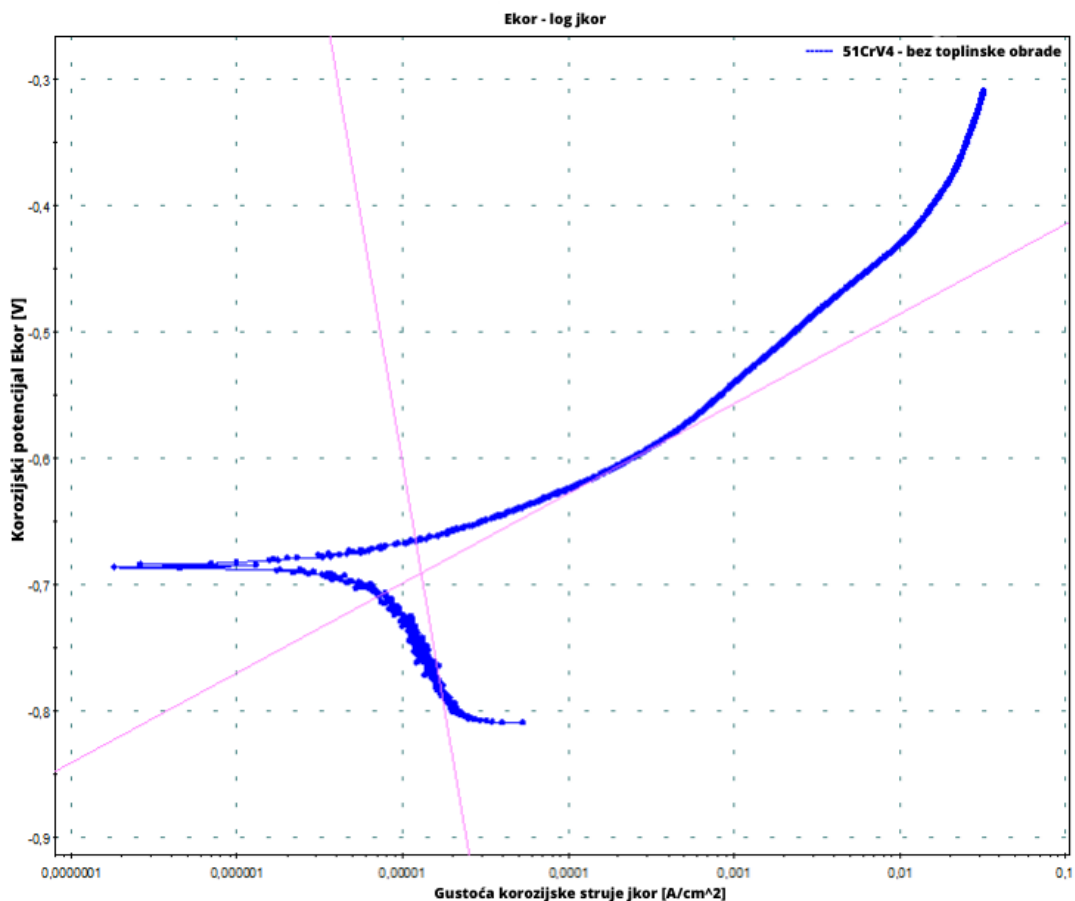


Slika 5.10 Ovisnost potencijala otvorenog strujnog kruga o vremenu uzorka čelika 51CrV4 u normaliziranom stanju

Iz dijagrama na slici 5.11 vidljivo je da potencijal pada prema negativnijim vrijednostima što upućuje na aktivno stanje površine i odvijanje korozijskog procesa.

Slika 5.12 prikazuje Tafelove krivulje, odnosno krivulje anodne i katodne polarizacije te njihove ekstrapolirane pravce iz čijeg su sjecišta očitani podaci o vrijednosti korozijskog potencijala i gustoće korozijske struje.





Slika 5.11 Tafelova krivulja uzorka čelika 51CrV4 u normaliziranom stanju

U tablici 5.5 su prikazani vrijednosti dobivene pomoću softvera za uzorak čelika 51CrV4 u normaliziranom stanju, odnosno bez toplinske obrade.

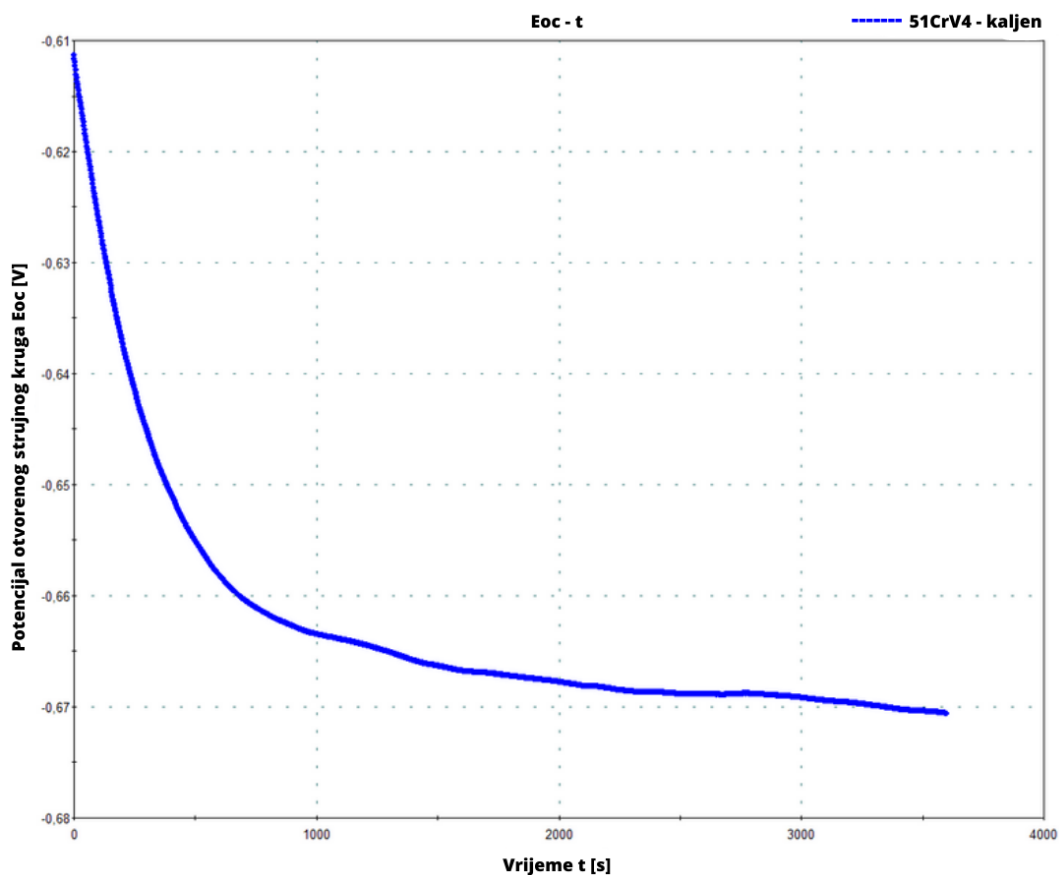
Tablica 5.5 Korozivna svojstva uzorak čelika 51CrV4 u normaliziranom stanju

Korozivski potencijal $E_{kor}$ [mV]	-690,588
Gustoća korozivne struje $j_{kor}$ [ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ]	13,01
Brzina korozije $v_{kor}$ [mm/god]	0,15

#### 5.4.2 Rezultati ispitivanja uzorka nakon toplinske obrade kaljenjem

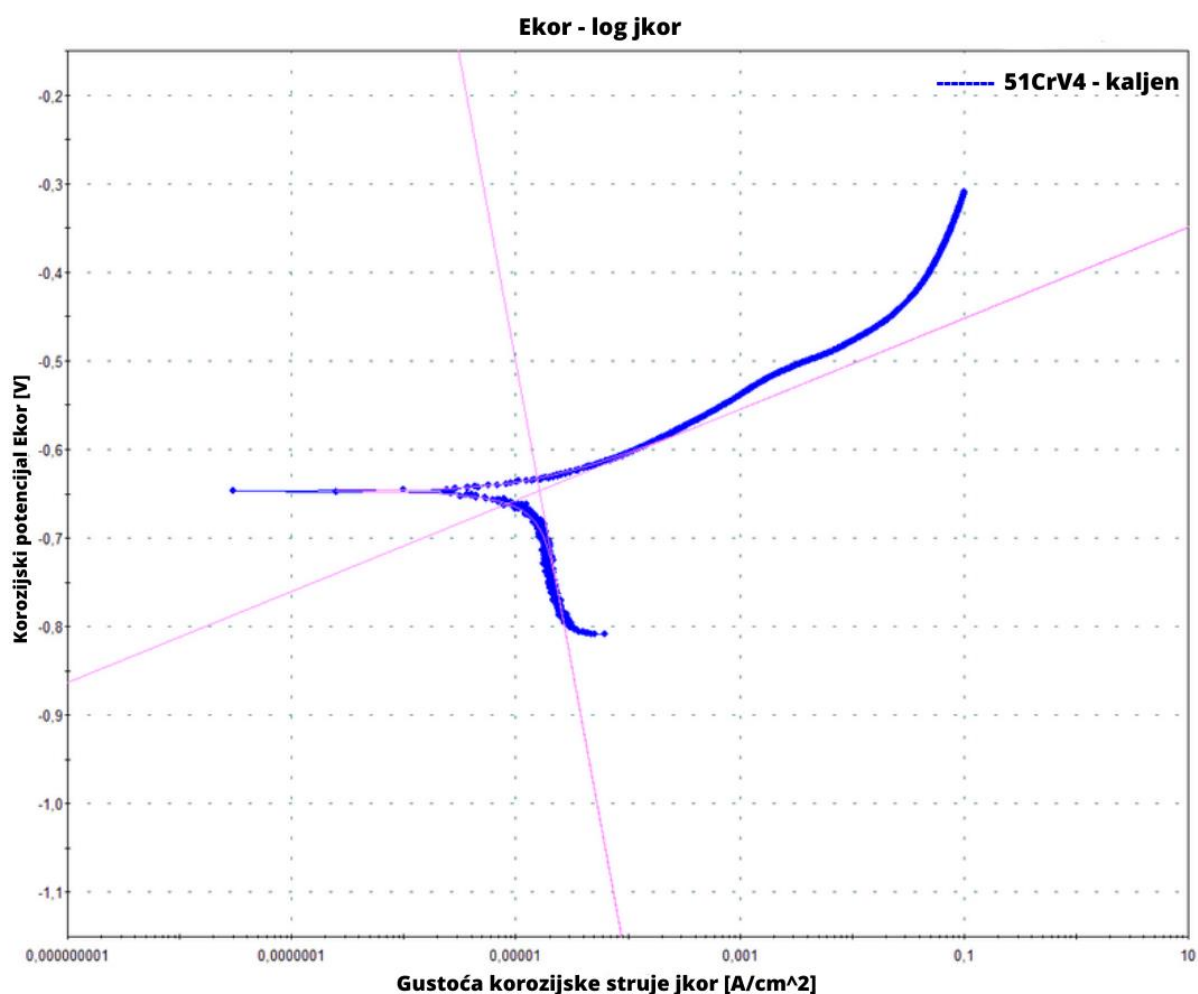
Za kaljeni uzorak vrijednosti krivulje ovisnosti potencijala otvorenog strujnog kruga o vremenu padaju prema negativnijima kao i kod prethodnog uzorka koji nije toplinski obrađen, ali s vremenom dolazi do relativnog ustaljenja potencijala što je prikazano na slici 5.13. Ovakav oblik

krivulje upućuje da je površina uzorka i dalje u aktivnom stanju, odnosno da se korozijski proces i dalje odvija.



Slika 5.12 Ovisnost potencijala otvorenog strujnog kruga o vremenu uzorka čelika 51CrV4 nakon kaljenja

Za isti se uzorak određuje Tafelova krivulja pomoću softvera te se iščitavaju vrijednosti korozijskog potencijala i gustoće korozijske struje na temelju kojih je potom izračunata brzina korozije. Tafelova krivulja uzorka nakon toplinske obrade kaljenjem prikazana je na slici 5.14, a dobiveni podaci prikazani su u tablici 5.6.



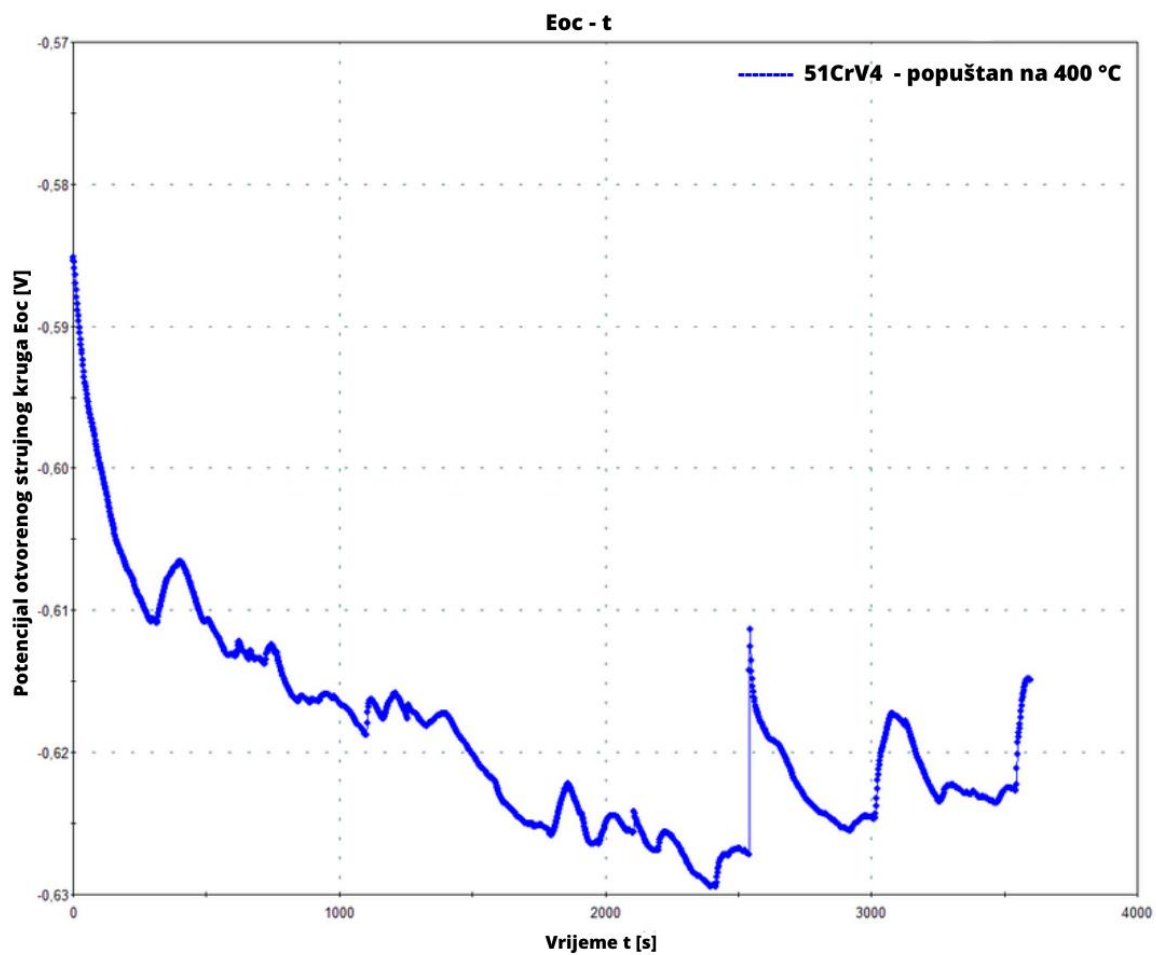
Slika 5.13 Tafelova krivulja uzorka čelika 51CrV4 nakon kaljenja

Tablica 5.6 Korozivna svojstva za uzorak čelika 51CrV4 nakon kaljenja

Korozivni potencijal $E_{kor}$ [mV]	-647,16
Gustoća korozivne struje $j_{kor}$ [ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ]	16,25
Brzina korozije $v_{kor}$ [mm/god]	0,19

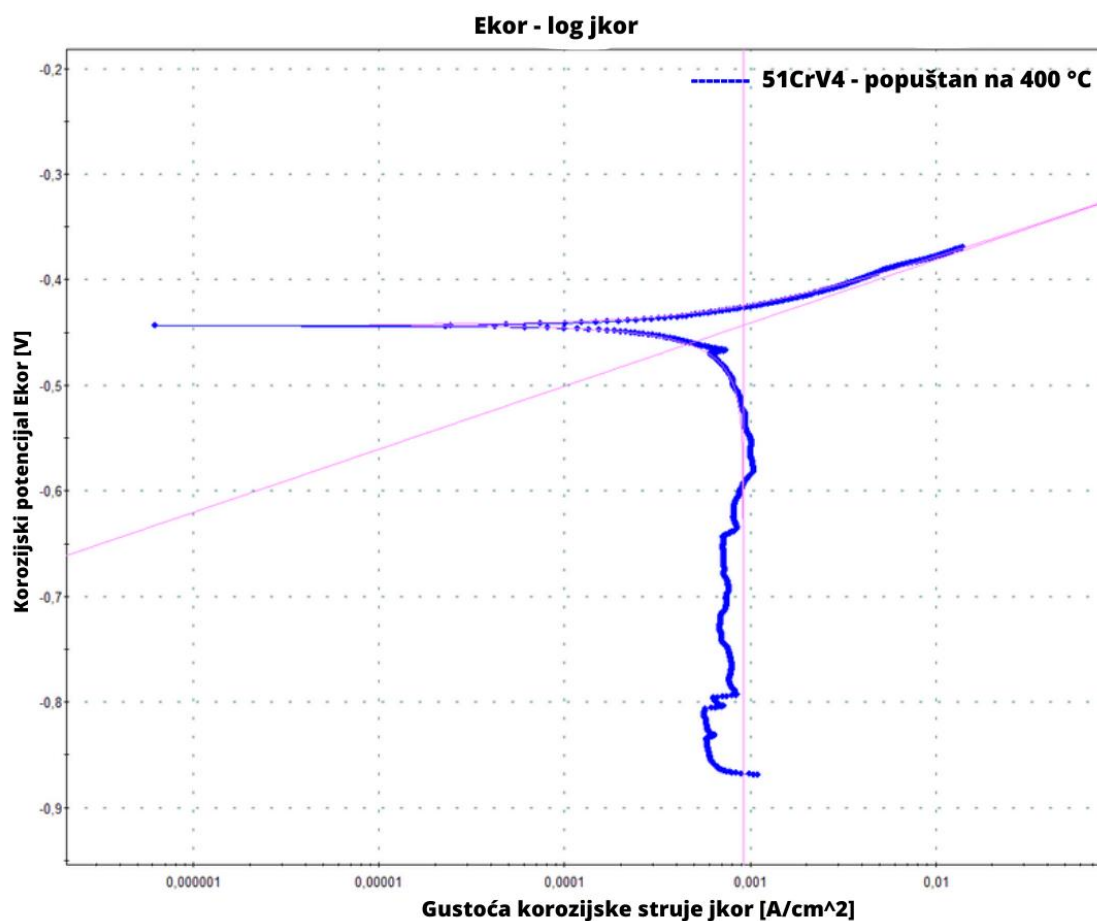
#### 5.4.3 Rezultati ispitivanja uzorka nakon toplinske obrade popuštanjem na 400°C

Kod uzorka čelika 51CrV4 popuštanog na temperaturi od 400 °C krivulja ovisnosti potencijala otvorenog strujnog kruga također ukazuje na koroziju jer vrijednosti krivulje ovisnosti potencijala otvorenog strujnog kruga o vremenu padaju prema negativnijima. Rezultati ispitivanja ovog uzorka prikazani su na slici 5.15.



Slika 5.14 Ovisnost potencijala otvorenog strujnog kruga o vremenu uzorka čelika 51CrV4 nakon popuštanja na 400 °C

Tafelova krivulja ovog uzorka prikazana je na slici 5.16.



Slika 5.15 Tafelova krivulja uzorka čelika 51CrV4 nakon popuštanja na 400 °C

U tablici 5.7 su prikazane vrijednosti dobivene pomoću softvera za uzorak čelika 51CrV4 nakon popuštanja na 400 °C.

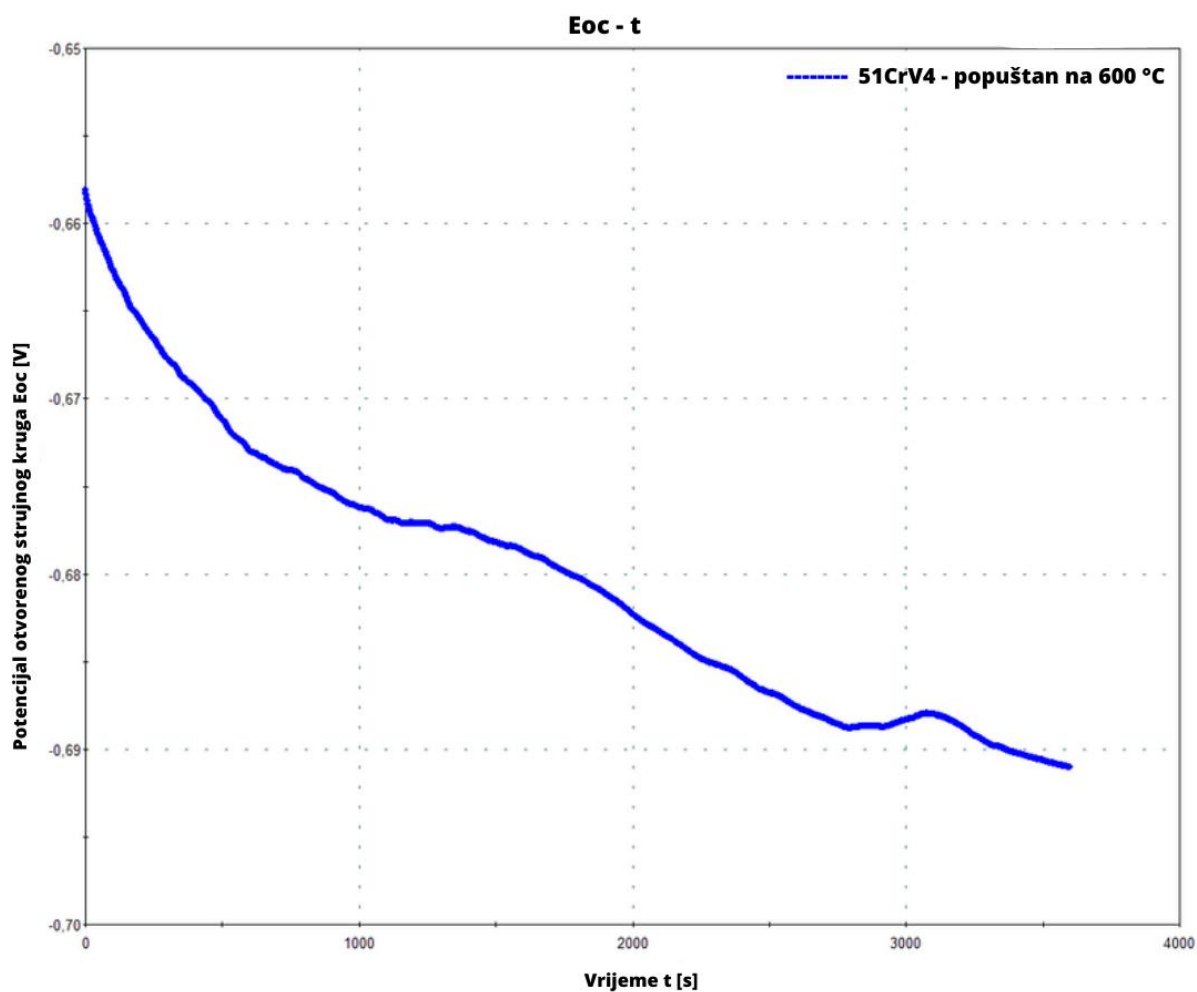
Tablica 5.7 Vrijednosti dobivene za uzorak čelika 51CrV4 nakon popuštanja na 400°C

Korozivski potencijal $E_{kor}$ [mV]	-433,719
Gustoća korozivne struje $j_{kor}$ [ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ]	913,2
Brzina korozije $v_{kor}$ [mm/god]	10,64

#### 5.4.4 Rezultati ispitivanja uzorka nakon toplinske obrade popuštanjem na 600°C

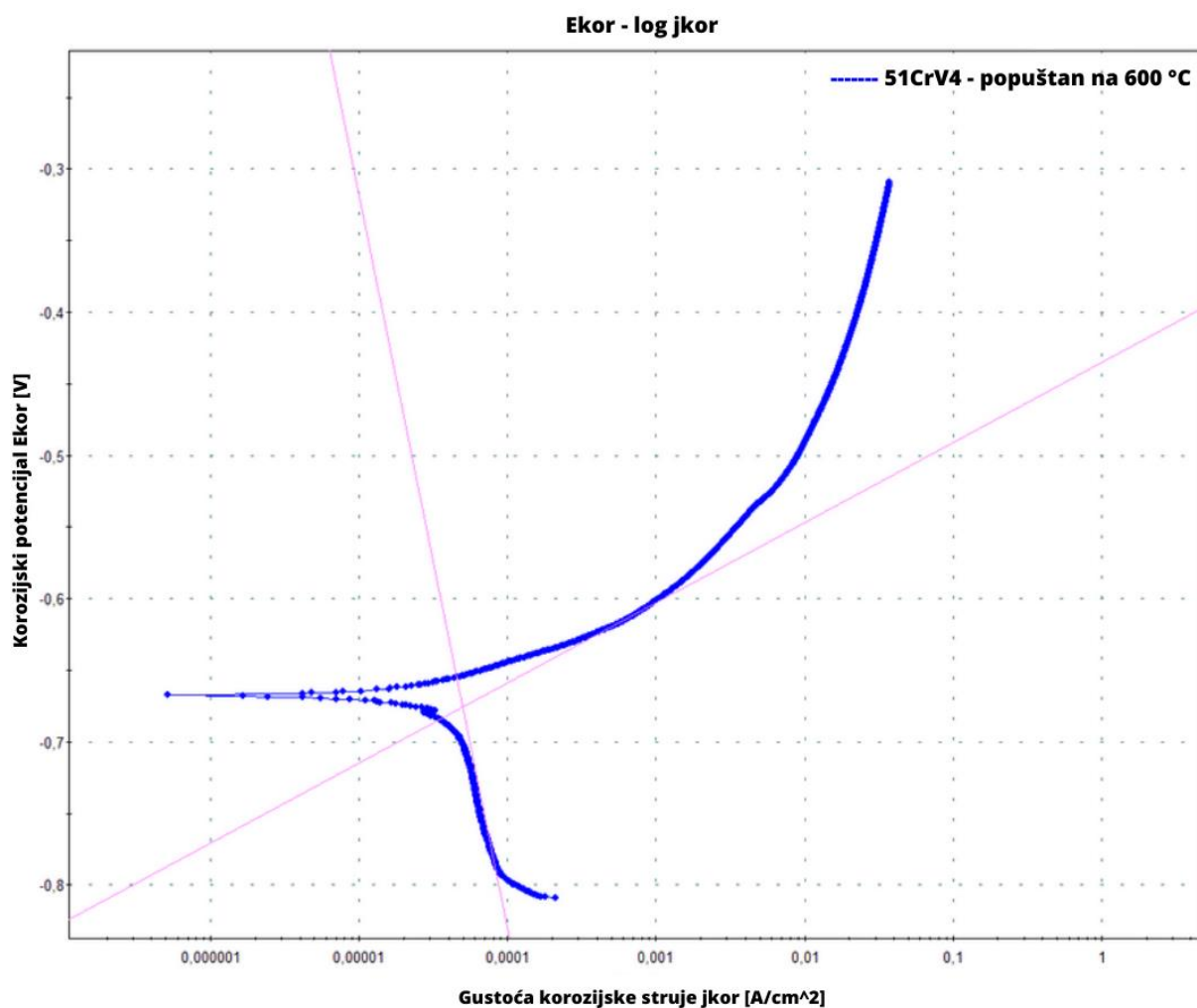
Kod uzorka čelika 51CrV4 popuštanog na temperaturi od 600 °C krivulja ovisnosti potencijala otvorenog strujnog kruga o vremenu se kreće prema negativnijim vrijednostima što znači da se

korozivni proces odvija te da je površina uzorka u aktivnom stanju, ali ne dolazi do izraženog ustaljenja potencijala. Rezultati ispitivanja ovog uzorka su prikazani na slici 5.17.



Slika 5.16 Ovisnost potencijala otvorenog strujnog kruga o vremenu uzorka čelika 51CrV4 nakon popuštanja na 600 °C

Tafelova krivulja uzorka popuštanog na temperaturi od 600 °C prikazana je na slici 5.16.



Slika 5.17 Tafelova krivulja uzorka čelika 51CrV4 nakon popuštanja na 600 °C

U tablici 5.8 su prikazani vrijednosti dobivene softverskim programom za uzorak čelika 51CrV4 nakon popuštanja na 600 °C.

Tablica 5.8 Vrijednosti dobivene za uzorak čelika 51CrV4 nakon popuštanja na 400°C

Korozivski potencijal $E_{kor}$ [mV]	-675,757
Gustoća korozivne struje $j_{kor}$ [ $\mu A/cm^2$ ]	49,87
Brzina korozije $v_{kor}$ [mm/god]	0,58

## 5.5 Usporedba dobivenih rezultata ispitivanja

Na slici 5.19 su prikazane dobivene krivulje ovisnosti potencijala otvorenog strujnog kruga o vremenu za četiri dana uzorka gdje je krivulja uzorka u normaliziranom stanju prikazana plavom bojom, krivulja uzorka koji je toplinski obrađen kaljenjem prikazana zelenom bojom, krivulja uzorka popušanog na temperaturi od 400 °C prikazana smeđom bojom, a krivulja uzorka popušanog na temperaturi od 600 °C prikazana crnom bojom.

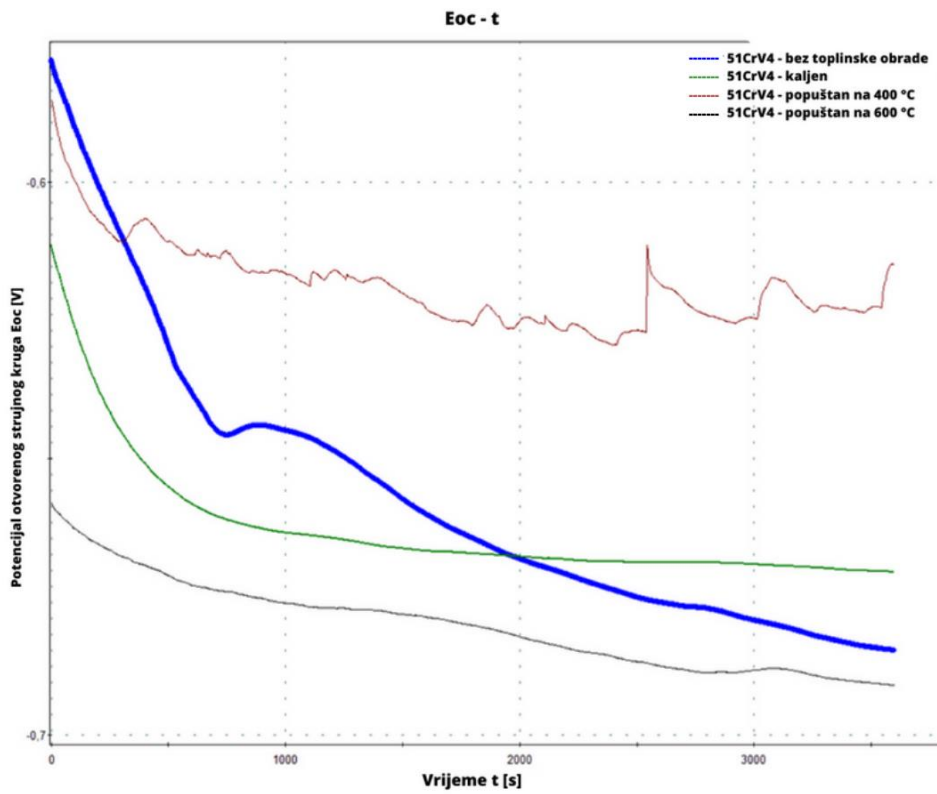
Uzorak toplinski obrađen popuštanjem na temperaturi od 400 °C, iako pokazuje najpozitivnije vrijednosti potencijala otvorenog strujnog, daje neuobičajene rezultate te neobičan oblik krivulje. Za objašnjenje dobivenih rezultata ovog uzorka potrebno bi bilo ponoviti ispitivanja te ih proširiti ispitivanjem i analizom mikrostrukture. Prilikom komentiranja rezultata iz navedenih razloga ovaj će se uzorak zanemariti.

Kod ostalih je uzoraka prisutan pad potencijala otvorenog strujnog kruga k negativnijim vrijednostima. Taj se pad pojavljuje radi odvijanja korozivskih procesa, odnosno aktivnog stanja površine uzoraka. Kod uzorka čelika 51CrV4 koji nije toplinski obrađen (plava krivulja) krivulja pokazuje relativne znakove stabilnog trenda tek pred kraj ispitivanja, dok se uzorak čelika toplinski obrađen kaljenjem (zeleno krivulja) i uzorak čelika koji je popušan na 600 °C pokazuju stabilan trend nakon približno 25 minuta te se nastavlja blagi pad krivulje do kraja ispitivanja.

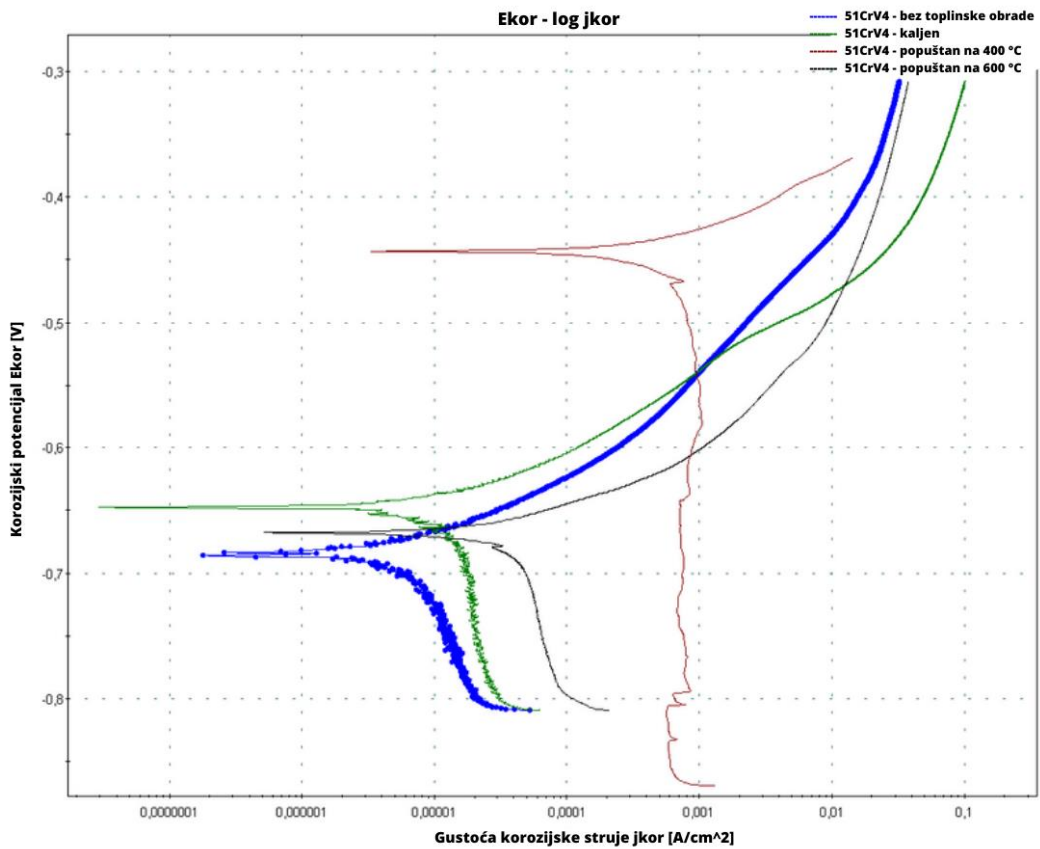
Uzorak kaljenog čelika prema kraju ispitivanja pokazuje pozitivnije vrijednosti potencijala u odnosu na uzorak koji nije toplinski obrađen, ali i odnosu na uzorak koji je toplinski obrađen popuštanjem.

Na slici 5.20 prikazane su zajedno Tafelove krivulje danih uzoraka za koje vrijede iste boje krivulja koje su ranije spomenute, a u tablici 5.9 prikazana je usporedba dobivenih vrijednosti rezultata svih četiriju ispitivanih uzoraka.





Slika 5.18 Ovisnost potencijala otvorenog strujnog kruga o vremenu svih četiriju uzoraka čelika 51CrV4



Slika 5.19 Tafelove krivulje svih četiriju uzoraka čelika 51CrV4

Tablica 5.9 Usporedba dobivenih vrijednosti rezultata svih četiriju ispitnih uzoraka

Dobivene vrijednosti	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 4
Korozijski potencijal, $E_{kor}$ [mV]	-690,588	-647,161	-675,787
Gustoća korozijske struje, $j_{kor}$ [ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ]	13,01	16,25	49,87
Brzina korozije, $v_{kor}$ [mm/god]	0,15	0,19	0,58

U tablici 6.7 je vidljivo da su vrijednosti korozijskog potencijala očekivane, odnosno korozijski je potencijal najnegativniji kod normaliziranog čelika čija je mikrostruktura feritno-perlitna, a najpozitivniji kod kaljenog čelika koji posjeduje martenzitnu mikrostrukturu.

Za brzine korozije dobivene su djelomično očekivane vrijednosti. Vrijednost brzine korozije kaljenog čelika skoro je četiri puta manja od brzine korozije poboljšanog čelika zato jer kaljeni čelik posjeduje martenzitnu mikrostrukturu, a poboljšani čelik prilikom toplinske obrade popuštanjem izlučuje karbide što za posljedicu može imati pojavu mikrogalvanskih članaka. Brzina korozije čelika u normaliziranom stanju je najmanja što je neočekivano.

## 6. ZAKLJUČAK

Korozija je spontani proces koji se neprekidno odvija te svojim djelovanjem utječe na stvaranje trajnih oštećenja na čvrstim materijalima. Metali, polimerni materijali, keramike i stakla neki su od materijala koji mogu biti izloženi razornom djelovanju okoline. Procesom korozije narušavaju se mehanička svojstva i mikrostruktura materijala, ali i estetski izgled. Prema osnovnoj podijeli, koja se odnosi na električnu vodljivost medija koji sudjeluje u procesu korozije, korozijski se procesi mogu podijeliti na kemijsku koroziju u neelektrolitima te na elektrokemijsku koroziju u medijima koji provode električnu struju, odnosno elektrolitima.

Kemijska korozija nastaje reakcijom atoma metala s električki nevodljivom okolinom pri povišenoj temperaturi. Kemijska se korozija najčešće odvija oksidacijom metala kisikom iz zraka te rezultira nastajanjem metalnog oksida kao korozijskog produkta. Elektrokemijska korozija se, za razliku od kemijske, odvija u elektrolitima. Djelovanjem elektrokemijske korozije atomi metala oksidiraju kao reducensa (elektron donor) u slobodni kation uz istodobnu redukciju nekog drugog oksidansa koji se naziva i depolarizatorom (elektron akceptor).

Prema obliku korozijskog razaranja koroziju je moguće podijeliti na opću, lokalnu, selektivnu te interkristalnu koroziju. Opću je koroziju, nadalje, moguće podijeliti na ravnomjernu i neravnomjernu, a lokalnu koroziju na rupičastu, potpovršinsku, galvansku te koroziju u procijepu. Selektivna korozija za primjere ima decinkaciju i grafitizaciju. U posebne oblike elektrokemijske korozije ubrajaju se korozija uz mehaničko djelovanje, korozija djelovanjem lutajućih struja te biološka korozija.

Zaštita materijala od djelovanje korozije ostvaruje se primjenom načela zaštite od korozije, odnosno, smanjivanje ili zaustavljanje pokretačke silu (uzrok oštećivanja) ili povećanje otpora koji se odupiru djelovanju pokretačke sile. U metode zaštite od korozije ubrajaju se odabir materijala, zaštita inhibitorima korozije, konstrukcijsko-tehnološke mjere, zaštita prevlačenjem te elektrokemijska zaštita.

Brzinom elektrokemijske korozije podrazumijeva brzinu „gubitka“ materijala na anodi jedinici vremena. Čimbenici koji najviše utječu na brzinu elektrokemijske korozije jesu elektrodni potencijal materijala koji korodira, kiselost ili lužnatost medija u kojem se metal nalazi, vrsta iona, vodljivost, temperatura te difuzija. Za utvrđivanje brzine elektrokemijske korozije koriste se dvije metode – elektrokemijska i gravimetrijska metoda. Ovom vrstom ispitivanja dobivaju se podaci o korozijskom ponašanju materijala u određenom vremenskom periodu i elektrolitu.

Elektrokemijskim se ispitivanjem korozije za rezultate dobivaju krivulja potencijala otvorenog strujnog kruga u ovisnosti o vremenu te Tafelova krivulja.

U eksperimentalnom dijelu ovog diplomskog rada izvršeno je elektrokemijsko ispitivanje brzine korozije četiriju uzorka čelika 51CrV4 u 3,5%-tnoj otopini NaCl-a od kojih je jedan uzorak ispitan prije toplinske obrade, a ostala tri uzorka nakon različitih toplinskih obrada. Od navedena tri uzorka, koja su toplinski obrađena, jedan uzorak je kaljen, a druga dva su nakon kaljenja popušteni, jedan uzorak je popuštan na 400 °C, a drugi na 600 °C.

Uzorak toplinski obrađen popuštanjem na temperaturi od 400 °C pokazuje neuobičajene rezultate i neobjašnjiv oblik krivulje. Za daljnje razumijevanje ovakvih rezultata potrebno je provesti dodatna ispitivanja, uključujući analizu mikrostrukture uzorka.

Svi uzorci pokazuju pad potencijala otvorenog strujnog kruga što ukazuje da je njihova površina aktivna, odnosno na odvijanje korozijskih procesa. Čelik s martenzitnom mikrostrukturom (kaljeni čelik) ima najpozitivniji korozijski potencijal, dok normalizirani čelik s feritno-perlitnom mikrostrukturom ima najnegativniji potencijal.

Uzorak koji nije toplinski obrađen pokazuje najmanju brzinu korozije što nije očekivano. Brzina korozije čelika obrađenog kaljenjem skoro je četiri puta manja od brzine korozije poboljšanog čelika jer je kaljena mikrostruktrua martenzitna, dok se pri toplinskoj obradi popuštanjem izlučuju karbidi, što može biti uzrok pojave mikrogalvanskih članaka.

## LITERATURA

- [1] Smokvina Hanza, S.: „Zaštita materijala“, s Interneta, [https://moodle.srce.hr/2021-2022/pluginfile.php/6228621/mod\\_resource/content/1/PZM%2001\\_Uvod.pdf](https://moodle.srce.hr/2021-2022/pluginfile.php/6228621/mod_resource/content/1/PZM%2001_Uvod.pdf), 3. kolovoza 2023.
- [2] Smokvina Hanza, S.: „Kemijska korozija“, s Interneta, [https://moodle.srce.hr/2021-2022/pluginfile.php/6242933/mod\\_resource/content/1/PZM%2002\\_Kemijska%20korozija.pdf](https://moodle.srce.hr/2021-2022/pluginfile.php/6242933/mod_resource/content/1/PZM%2002_Kemijska%20korozija.pdf), 3. kolovoza 2023.
- [3] Domitrović, M.: „Ispitivanje otpornosti višefaznih konstrukcijskih čelika na lokalnu koroziju“, diplomski rad, s Interneta, <https://repozitorij.simet.unizg.hr/islandora/object/simet%3A165/datastream/PDF/view>, 3. kolovoza 2023.
- [4] Smokvina Hanza, S.: „Elektrokemijska korozija“, s Interneta, [https://moodle.srce.hr/2021-2022/pluginfile.php/6266393/mod\\_resource/content/1/PZM%2004\\_Brzina%20elektrokemijske%20korozije.pdf](https://moodle.srce.hr/2021-2022/pluginfile.php/6266393/mod_resource/content/1/PZM%2004_Brzina%20elektrokemijske%20korozije.pdf), 3. kolovoza 2023.
- [5] Prikratki, K.: „Utjecaj mikrostrukture na korozijsku otpornost čelika“, s Interneta, <https://zir.nsk.hr/islandora/object/riteh%3A3155/datastream/PDF/view>, 4. kolovoza 2023.
- [6] Smokvina Hanza, S.: „Brzina elektrokemijske korozije“, s Interneta, [https://moodle.srce.hr/2021-2022/pluginfile.php/6266393/mod\\_resource/content/1/PZM%2004\\_Brzina%20elektrokemijske%20korozije.pdf](https://moodle.srce.hr/2021-2022/pluginfile.php/6266393/mod_resource/content/1/PZM%2004_Brzina%20elektrokemijske%20korozije.pdf), 4. kolovoza 2023.
- [7] Mansfeld, F., & Bertocci, U. (Eds.): “Electrochemical corrosion testing“ ,Vol. 727. ASTM International, 1981.
- [8] Smokvina Hanza, S.: „Vrste korozije prema obliku korozijskog razaranja metala“, s Interneta, [https://moodle.srce.hr/2021-2022/pluginfile.php/6280970/mod\\_resource/content/1/PZM%2005\\_Oblici%20korozijskih%20razaranja.pdf](https://moodle.srce.hr/2021-2022/pluginfile.php/6280970/mod_resource/content/1/PZM%2005_Oblici%20korozijskih%20razaranja.pdf), 7. kolovoza 2023.
- [9] Čabraja, V.: „Elektrokemijski korozijski procesi na nelegiranim konstrukcijskim čelicima“, s Interneta, [http://repozitorij.fsb.hr/2258/1/02\\_04\\_2013\\_CABRAJA\\_Diplomski\\_rad\\_vladimir\\_cabraja.pdf](http://repozitorij.fsb.hr/2258/1/02_04_2013_CABRAJA_Diplomski_rad_vladimir_cabraja.pdf), 8. kolovoza 2023.

[10] s Interneta, [https://bib.irb.hr/datoteka/307438.GALVANSKA\\_KOROZIJA.pdf](https://bib.irb.hr/datoteka/307438.GALVANSKA_KOROZIJA.pdf), 10. kolovoza 2023.

[11] s Interneta, <https://www.corrosionpedia.com/definition/384/dezincification>, 10. kolovoza 2023.

[12] Smokvina Hanza, S.: „Metode zaštite metala od korozije“, s Interneta [https://moodle.srce.hr/2021-2022/pluginfile.php/6287878/mod\\_resource/content/1/PZM%2006\\_Metode%20za%20za%C5%A1tite%20od%20korozije.pdf](https://moodle.srce.hr/2021-2022/pluginfile.php/6287878/mod_resource/content/1/PZM%2006_Metode%20za%20za%C5%A1tite%20od%20korozije.pdf), 16. kolovoza 2023.

[13] s Interneta, <http://www.astmsteel.com/product/aisi-6150-steel/>, 16. kolovoza 2023.

[14] Uljar, M.: „Karakterizacija mikrostrukture niskolegiranog čelika“, s Interneta, <https://repository.riteh.uniri.hr/islandora/object/riteh%3A2475/datastream/PDF/view>, 16. kolovoza 2023.

## POPIS SLIKA

Slika 2.1 Šteta izazvana korozijom na rotorskim lopaticama turbine [1].....	2
Slika 2.2 Korodirana cijev iz sustava brodskog cjevovoda [1].....	3
Slika 2.3 Klasifikacija korozijskih procesa [2].....	4
Slika 2.4 Mehanizam kemijske korozije [2].....	5
Slika 2.5 Daniellov članak [5].....	7
Slika 2.6 Standardni elektrodni potencijal metala [4].....	8
Slika 2.7 Precizna laboratorijska vaga za gravimetrijsko ispitivanje korozije [6].....	10
Slika 2.8 Peterogrlena ispitna ćelija [6].....	11
Slika 2.9 Krivulje stacionarnog potencijala otvorenog strujnog kruga u ovisnosti o vremenu u slučaju korozije i pasivacije [6].....	12
Slika 2.10 Krivulje potencijala otvorenog strujnog kruga AlSi7Mg u različitim elektrolitima [6].....	12
Slika 2.11 Tafelove krivulja AlSi7Mg u različitim elektrolitima [6].....	14
Slika 3.1 Klasifikacija geometrijskih oblika korozijskog razaranja metala [8].....	15
Slika 3.2 Opća korozija čeličnog spremnika [8].....	16
Slika 3.3 Različiti oblici oštećenja rupičaste korozije [8].....	17
Slika 3.4 Ocjena rupičaste korozije faktorom rupičaste korozije p/d [8].....	18
Slika 3.5 Rupičasta korozija čelika [8].....	18
Slika 3.6 Pojava bubrenja čelika [8].....	19
Slika 3.7 Eksfolijacija aluminijske legure [8].....	20
Slika 3.8 Filiformna korozija [8].....	20
Slika 3.9 Shema korozije u procijepu [8].....	21
Slika 3.10 Oštećenje metala uslijed korozije u procijepu [8].....	22
Slika 3.11 Shema galvanske korozije čelika i aluminijske [8].....	22
Slika 3.12 Decinkacija brodskog propelera [8].....	23
Slika 3.13 Posebni oblici elektrokemijske korozije [8].....	25
Slika 3.14 Bakterijska korozija ugljičnog čelika [8].....	26
Slika 3.15 Lom uslijed djelovanja napetostne korozije [8].....	27
Slika 3.16 Lom vratila nastao kao posljedica korozijskog zamora u morskoj vodi [8].....	27
Slika 3.17 Primjeri oštećenja tarnom korozijom [8].....	28
Slika 3.18 Oštećenje cijevi nastalo djelovanjem erozijske korozije [8].....	29
Slika 3.19 Kavitacija [8].....	29

Slika 3.20 Oštećenje lopatice turbine uslijed kavitacijske korozije [8].....	30
Slika 3.21 Mehanizam korozije djelovanjem lutajućih struja [8] .....	30
Slika 3.22 Oštećenje uslijed korozije djelovanjem lutajućih struja [8] .....	31
Slika 4.1 Smanjenje opasnosti od erozijske korozije [12].....	34
Slika 4.2 Vrste katodne zaštite [5].....	35
Slika 4.3 Anodna zaštita [5].....	35
Slika 5.2 Mikrostruktura uzorka čelika EN 51CrV4 [14].....	40
Slika 5.3 Peć za toplinsku obradu .....	41
Slika 5.4 Vađenje uzoraka iz peći za toplinsku obradu .....	42
Slika 5.5 Ulje za gašenje uzoraka čelika .....	42
Slika 5.6 Brusni papiri korišteni za brušenje i poliranje uzoraka .....	44
Slika 5.7 Precizna elektronska vaga .....	44
Slika 5.8 Oprema korištena za elektrokemijsko ispitivanje.....	45
Slika 5.9 Peterogrlena ispitna ćelija s radnom, referentnom i pomoćnim elektrodama .....	46
Slika 5.10 Lugginov most koji povezuje referentnu elektrodu s radnom elektrodom (uzorkom)	46
Slika 5.11 Ovisnost potencijala otvorenog strujnog kruga o vremenu uzorka čelika 51CrV4 u normaliziranom stanju .....	48
Slika 5.12 Tafelova krivulja uzorka čelika 51CrV4 u normaliziranom stanju.....	49
Slika 5.13 Ovisnost potencijala otvorenog strujnog kruga o vremenu uzorka čelika 51CrV4 nakon kaljenja.....	50
Slika 5.14 Tafelova krivulja uzorka čelika 51CrV4 nakon kaljenja.....	51
Slika 5.15 Ovisnost potencijala otvorenog strujnog kruga o vremenu uzorka čelika 51CrV4 nakon popuštanja na 400 °C.....	52
Slika 5.16 Tafelova krivulja uzorka čelika 51CrV4 nakon popuštanja na 400 °C.....	53
Slika 5.17 Ovisnost potencijala otvorenog strujnog kruga o vremenu uzorka čelika 51CrV4 nakon popuštanja na 600 °C.....	54
Slika 5.18 Tafelova krivulja uzorka čelika 51CrV4 nakon popuštanja na 600 °C.....	55
Slika 5.19 Ovisnost potencijala otvorenog strujnog kruga o vremenu svih četiriju uzoraka čelika 51CrV4 .....	57
Slika 5.20 Tafelove krivulje svih četiriju uzoraka čelika 51CrV4 .....	57



## POPIS TABLICA

Tablica 5.1 Kemijski sastav čelika 51CrV4.....	39
Tablica 5.2 Osnovna mehanička svojstva čelika EN 51CrV4 [13].....	40
Tablica 5.3 Parametri toplinske obrade za uzorke čelika 51CrV4.....	43
Tablica 5.4 Podaci potrebni softveru "PowerSuite" za ispitivanje.....	47
Tablica 5.5 Korozijska svojstva uzorak čelika 51CrV4 u normaliziranom stanju.....	49
Tablica 5.6 Korozijska svojstva za uzorak čelika 51CrV4 nakon kaljenja.....	51
Tablica 5.7 Vrijednosti dobivene za uzorak čelika 51CrV4 nakon popuštanja na 400°C.....	53
Tablica 5.8 Vrijednosti dobivene za uzorak čelika 51CrV4 nakon popuštanja na 400°C.....	55
Tablica 5.9 Usporedba dobivenih vrijednosti rezultata svih četiriju ispitnih uzoraka.....	58

## SAŽETAK

Diplomski rad naslova „Utjecaj mikrostrukture na korozijsko ponašanje niskolegiranog čelika, obuhvaća istraživanje korozijskog ponašanja uzoraka niskolegiranog čelika. U teoretskom dijelu rada opisani su korozijski procesi te unutrašnji i vanjski čimbenici koji djeluju na korozijske procese, dane su klasifikacije korozijskih procesa prema mehanizmu djelovanja te prema obliku korozijskog razaranja. Za obje su klasifikacije dane podijele pripadajućih korozijskih procesa te su isti opisani i obrazloženi. Također, navedene su i objašnjene metode zaštite metala od djelovanja korozije.

U eksperimentalnom dijelu rada navedene su karakteristike čelika 51CrV4 te je prikazan njegov kemijski sastav dobiven pomoću spektrometra. Provedeno je elektrokemijsko ispitivanje brzine korozije uzoraka čelika u 3,5%-tnoj otopini NaCl prije i nakon kaljenja i popuštanja.

Svi uzorci pokazuju pad potencijala otvorenog strujnog kruga što ukazuje na odvijanje korozijskih procesa. Kaljeni čelik ima najpozitivniji korozijski potencijal, dok normalizirani čelik ima najnegativniji potencijal. Uzorak koji nije toplinski obrađen pokazuje najmanju brzinu korozije što nije očekivano. Brzina korozije čelika obrađenog kaljenjem je skoro četiri puta manja od brzine korozije poboljšanog čelika jer je kaljena mikrostruktrua martenzitna, dok se pri toplinskoj obradi popuštanjem izlučuju karbidi, što može biti uzrok pojave mikrogalvanskih članaka.

Ključne riječi: korozija, elektrokemijska korozija, elektrokemijsko ispitivanje brzine korozije, Tafelova krivulja, toplinska obrada, mikrostruktura

## ABSTRACT

The master thesis entitled "The influence of microstructure on the corrosion behavior of low-alloy steel" conducts research into the corrosion behavior of samples of low-alloy steel in an electrolyte, during which the microstructure of the samples was affected by heat treatment procedures. In the theoretical part of the paper, corrosion processes and internal and external factors affecting corrosion processes are described, classifications of corrosion processes according to the mechanism of action and the form of corrosion destruction are given. For both classifications, divisions of the corresponding corrosion processes are given and they are described and explained. Also, the methods of protecting metals from corrosion are listed and explained.

In the experimental part of the work, the characteristics of 51CrV4 steel are listed and its chemical composition obtained using a spectrometer is presented. An electrochemical test of the corrosion rate of steel samples in a 3.5% NaCl solution was carried out before and after heat treatments of tempering at a temperature of 850 °C and tempering at temperatures of 400 °C and 600 °C.

All samples show a drop in the potential of the open circuit, which indicates the development of corrosion processes. Hardened steel has the most positive corrosion potential, while normalized steel has the most negative potential. The non-heat treated sample shows the lowest corrosion rate, which is not expected. The corrosion rate of hardened steel is three times lower than the corrosion rate of improved steel because the hardened microstructure is martensitic, while during heat treatment, carbides are released by softening, which can be the cause of the appearance of microgalvanic articles.

Key words: corrosion, electrochemical corrosion, electrochemical corrosion rate testing, Tafel curve, heat treatment, microstructure