

# Analiza utjecaja medija na korozijsko ponašanje niskolegiranog čelika

---

Ramljak, Raul

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:190:754582>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-30**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**ANALIZA UTJECAJA MEDIJA NA KOROZIJSKO  
PONAŠANJE NISKOLEGIRANOG ČELIKA**

Rijeka, rujan 2023.

Raul Ramljak  
0069076927

SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**ANALIZA UTJECAJA MEDIJA NA KOROZIJSKO  
PONAŠANJE NISKOLEGIRANOG ČELIKA**

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

Rijeka, rujan 2023.

Raul Ramljak  
0069076927

Rijeka, 13. ožujka 2023.

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

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Raul Ramljak (0069076927)**  
Studij: **Sveučilišni diplomski studij strojarstva**  
Modul: **Inženjerstvo materijala**

Zadatak: **Analiza utjecaja medija na korozijsko ponašanje niskolegiranog čelika /  
Analysis of the Influence of Media on the Corrosion Behavior of Low-alloy  
Steel**

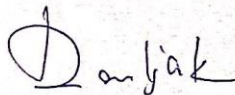
### Opis zadatka:

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 vrste medija na korozijsko ponašanje niskolegiranog čelika. Analizirati metode elektrokemijskih korozijskih ispitivanja.

U eksperimentalnom dijelu rada provesti elektrokemijsko ispitivanje korozije niskolegiranog čelika u različitim medijima. Opisati materijal, medij, 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**

Izjavljujem da sam diplomski rad naziva "Analiza utjecaja medija na korozijsko ponašanje niskolegiranog čelika" izradio samostalno, u skladu s akademskim pravilima i etičkim standardima. Tijekom izrade rada, koristio sam relevantnu literaturu, istraživačke izvore i tehnološke informacije kako bih osigurao kvalitetu i pouzdanost svog rada, uz pomoć mentorice izv. prof. dr. sc. Sunčane Smokvina Hanza, koja me stručno vodila kroz cijeli proces izrade rada.

Rijeka, rujan 2023.

---

Raul Ramljak

0069076927

## ZAHVALA

Želio bih se zahvaliti mentorici izv. prof. dr. sc. Sunčani Smokvina Hanza te također izv. prof. dr. sc. Dariju Iljkiću i asistentu Dariju Kvrgiću na ukazanoj pomoći, iznimnoj susretljivosti, razumijevanju, strpljenju te jako korisnim savjetima pomoću kojih sam uspješno napravio ovaj diplomski rad.

# Sadržaj

<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>2. PROCES KOROZIJE I NJEZINA PODJELA</b> .....	3
<b>2.1 Podjela korozivskih procesa prema mehanizmu djelovanja</b> .....	6
2.1.1 Kemijska korozija .....	6
2.1.2 Elektrokemijska korozija.....	12
2.1.3 Brzina elektrokemijske korozije .....	15
<b>2.2 Podjela korozivskih procesa prema obliku razaranja</b> .....	18
2.2.1 Opća korozija.....	18
2.2.2 Lokalna korozija .....	19
2.2.3 Selektivna korozija.....	23
2.2.4 Interkristalna korozija .....	24
<b>2.3 Posebni oblici korozivskih procesa</b> .....	25
<b>2.4. Unutrašnji i vanjski čimbenici korozije</b> .....	30
<b>3. METODE PREVENCIJE OŠTEĆENJA UZROKOVANIH KOROZIJSKIM PROCESIMA</b> .....	32
<b>3.1 Uporaba materijala otpornih na koroziju</b> .....	32
<b>3.2 Tehničke prilagodbe u konstrukciji</b> .....	33
<b>3.3 Primjena zaštitnih premaza</b> .....	34
<b>3.4 Elektrokemijske metode zaštite</b> .....	36
<b>3.5 Uporaba korozivskih inhibitora</b> .....	37
<b>4. EKSPERIMENTALNI DIO</b> .....	38
<b>4.1 Odabrani materijal</b> .....	38
<b>4.2 Postupak elektrokemijskog ispitivanja korozije</b> .....	40
<b>4.3 Rezultati ispitivanja</b> .....	45
4.3.1 Prvi uzorak (vodovodna voda).....	45
4.3.2 Drugi uzorak (1% NaCl) .....	47
4.3.3 Treći uzorak (3,5 % NaCl) .....	48
4.3.4 Četvrti uzorak (5 % NaCl).....	50
4.3.5 Analiza dobivenih rezultata .....	52
<b>5. ZAKLJUČAK</b> .....	56
<b>LITERATURA</b> .....	58
<b>POPIS SLIKA</b> .....	60
<b>POPIS TABLICA</b> .....	62
<b>POPIS OZNAKA</b> .....	63

<b>SAŽETAK</b> .....	65
<b>SUMMARY</b> .....	66



## 1. UVOD

Korozija je jedan od najznačajnijih problema s kojima se suočavaju ljudi tijekom korištenja materijala u mnogim industrijskim, građevinskim i tehničkim primjenama. U posljednjim desetljećima, razvoj tehnologije i globalna povezanost omogućili su velik napredak u pristupu informacijama i komunikaciji. Zbog napretka i razvoja tehnologije te bolje globalne povezanosti postaje sve lakše prenositi informacije i promovirati različiti sadržaj, uključujući znanstvena istraživanja i inženjerske spoznaje. Također, postoji sve veći interes za razumijevanje kako različiti mediji mogu utjecati na materijale, uključujući čelike, i njihovo korozijsko ponašanje.

Naročito u području metalurgije, niskolegirani čelici imaju ključnu ulogu u mnogim strukturnim i inženjerskim konstrukcijama zbog svojih izvrsnih mehaničkih svojstava i ekonomske dostupnosti. Međutim, izloženost različitim okolišnim uvjetima može izazvati korozijsko oštećenje, što može dovesti do smanjenja performansi i trajnosti čeličnih konstrukcija.

Niskolegirani čelici pripadaju kategoriji željeznih materijala koja iskazuje superiorna mehanička svojstva u odnosu na obične ugljične čelike, a to je rezultat uključivanja različitih legirajućih elemenata kao što su nikal, krom i molibden. U slučaju mnogih niskolegiranih čelika, glavna uloga ovih legirajućih elemenata je poboljšanje tvrdoće kako bi se optimizirala mehanička svojstva i žilavost nakon toplinske obrade. Ipak, u nekim situacijama, dodaci legirajućih elemenata koriste se s ciljem povećanja otpornosti na koroziju koja može nastati pod specifičnim uvjetima [1].

Pod utjecajem povoljnih uvjeta, svi metali su podložni procesu korozije, što može negativno utjecati na industrijsku opremu, druge proizvode te smanjiti njihov vijek trajanja. Korozija također rezultira smanjenjem mase metala i smanjenjem njegove upotrebne vrijednosti kao sirovine, što dovodi do znatnih troškova i šteta. Današnje sve češće izlaganje različitih metala kompleksnim uvjetima, kao što su zagađeni okoliš (zrak, tlo, voda), iznimno visoke temperature, naprezanja i tlakovi, agresivne kemikalije i drugi uvjeti, čine koroziju sve značajnijim ekonomskim problemom. Također, u nuklearnoj energetici, elektronici i drugim tehnološkim granama često se koriste skupi materijali osjetljivi na koroziju, što dodatno povećava važnost istraživanja o stabilnosti i trajnosti materijala, kao i investicija u razne metode zaštite protiv korozije [2].

Cilj ovog diplomskog istraživanja je demonstrirati važnost adekvatnog razumijevanja korozijskog procesa i utjecaja raznolikih faktora na brzinu i tok korozije u vezi s niskolegiranim čelicima. Poseban fokus stavlja se na nužnost anticipiranja preventivnih aktivnosti zaštite od korozije već u fazama projektnog planiranja proizvoda i odabira materijala, uzimajući u obzir specifične uvjete upotrebe niskolegiranih čelika. Srž ovog diplomskog istraživanja se usredotočuje na analizu i proučavanje efekata medija na korozijsko ponašanje niskolegiranih čelika. U okviru ovog rada će biti definiran sam pojam korozije, opisane različite varijante korozije, identificirani faktori koji je izazivaju, te predložene različite metode za zaštitu materijala od nje. Posebno će biti naglašena korozija niskolegiranih čelika, istražujući kako oni reagiraju na raznolike okružujuće uvjete. Eksperimentalni dio ovog diplomskog rada obuhvaća elektrokemijsku provjeru brzine korozije kod niskolegiranog čelika kako bi se analizirao utjecaj medija na njegovo korozivno ponašanje. Ovaj segment rada će u detalje opisati postupak, iskoristivu opremu i potrebne alate za izvedbu istraživanja.

## 2. PROCES KOROZIJE I NJEZINA PODJELA

Degradacija materijala, poznata kao korozija, potječe iz latinskog izraza "corrodere," što znači "nagristi", i odnosi se na istrošenje konstrukcijskih materijala zbog kemijskog djelovanja fluida, poput plinova ili kapljevine. Korozija uzrokuje razaranje metala i anorganskih nemetala, kao što je beton, dok također doprinosi oštećenju organskih materijala, poput polimernih materijala i drveta [2].

Za inicijaciju korozije, neophodno je postojanje uzajamnog privlačenja između okoline i materijala. Taj fenomen opisuje kvantitativnu sklonost različitih tvari, u ovom kontekstu okoline i materijala, za spontanom i prirodnom reakcijom koja se događa između njih [3].

Razmatrajući njihovo korozijsko ponašanje, materijali se mogu podijeliti na:

- imune
- aktivne
- pasivne

Stoga, ako materijali ne korodiraju jer nemaju afinitet za koroziju, tada su klasificirani kao imuni. Ako korodiraju, to ukazuje na aktivne materijale. Ako pak korozija napreduje vrlo sporo zbog inhibiranja korozijskog procesa, onda se radi o pasivnim materijalima [4].

Tok, kao i brzina korozije, ovise o reaktivnosti odnosno afinitetu reaktanata, kao i o otporima koji usporavaju korozijski proces. Ti faktori su podložni utjecaju unutarnjih i vanjskih parametara koji su promjenjivi. Unutarnji parametri odražavaju karakteristike materijala, dok vanjski parametri odgovaraju karakteristikama okoline. Zbog ovog neprekidnog mijenjanja unutarnjih i vanjskih parametara, brzina korozije nije konstantna, a njen tok nije linearan [3].

Svaki metal ili legura, pod specifičnim uvjetima, može biti pogođen korozijskim procesom. Korozijsko djelovanje nastaje kada su čisti metali ekstrahirani iz ruda, gdje su termodinamički stabilni. Tokom ekstrakcije, primjenjuje se energetski zahtjevan proces redukcije, transformirajući ih u konstrukcijske materijale s ciljanim svojstvima. Kada ti materijali dolaze u kontakt s okolinom, bilo tijekom uporabe ili skladištenja, ti materijali se teže vratiti u stabilno stanje u kojem su bili prije obrade, što dovodi do korozije. Stoga, jasno je da će metali koji zahtijevaju više energije za njihovu ekstrakciju biti više podložni korozijskom procesu i imat će niži elektrodni potencijal [3].

Prethodno opisan korozijski ciklus prikazan je na slici 2.1.



Slika 2.1.: Korozijski ciklus [5]

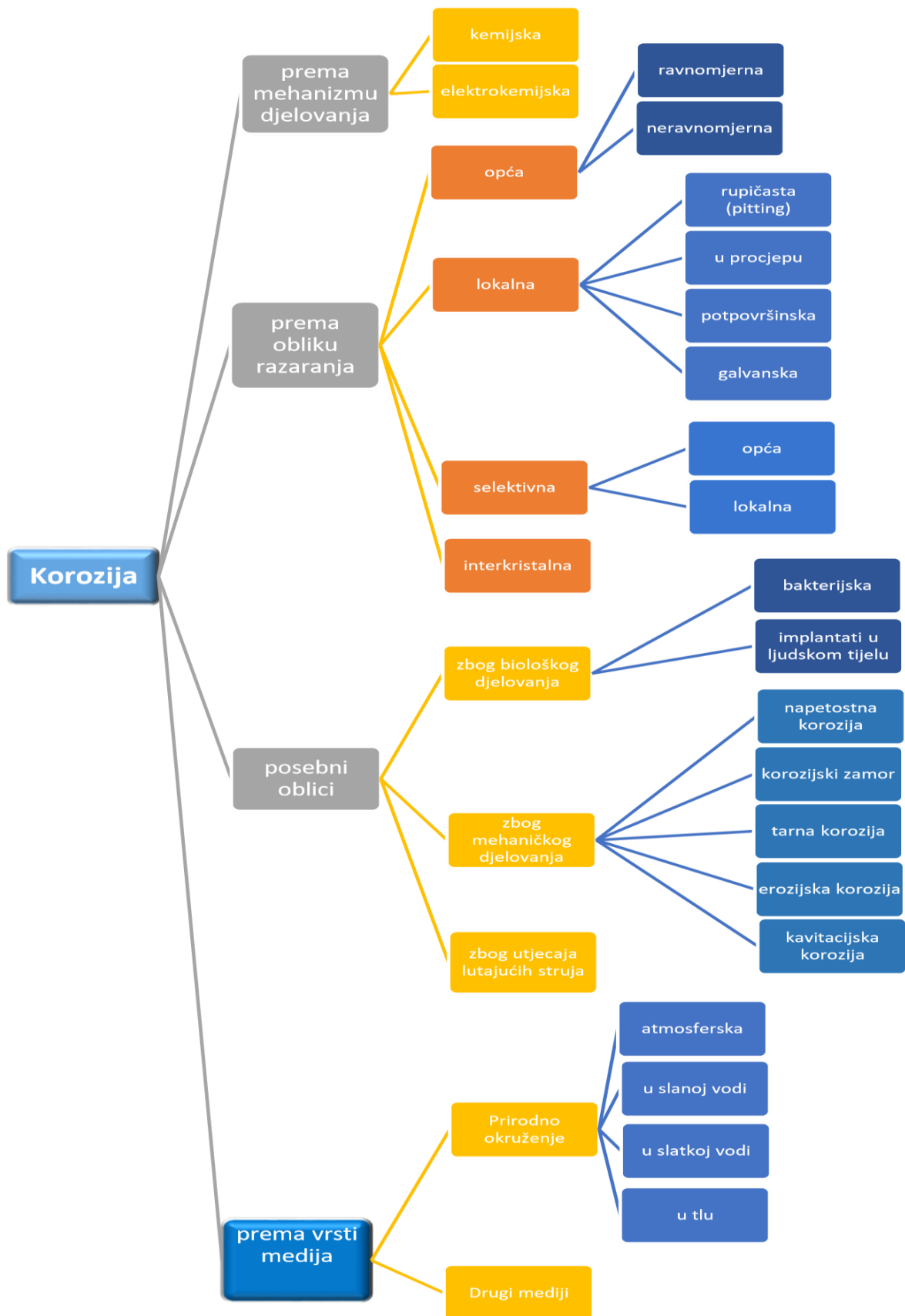
Podjela korozije temelji se na dva ključna mehanizma djelovanja - kemijskom i elektrokemijskom. Kemijska korozija razvija se u neelektrolitima, dok elektrokemijska varijanta nastaje u elektrolitskim medijima, odnosno tvarima koje mogu provoditi električnu struju. Većina korozijskih procesa pripada elektrokemijskoj varijanti te nastaju u elektrolitskim medijima. [6].

Osim toga, korozija može biti razvrstana prema obliku korozijskog razaranja na opću i lokalnu koroziju, koja se dalje dijeli na rupičastu (pitting), u procjepu, potpovršinsku i galvansku, te na interkristalnu koroziju [3].

Postoje i posebni oblici korozije, kao što su korozija uzrokovana biološkim djelovanjem, mehaničkim djelovanjem i utjecajem lutajućih struja [3].

S obzirom na vrstu medija kojem je materijal izložen, korozija se može klasificirati u atmosfersku koroziju, koroziju u tlu, te koroziju u morskoj ili slatkoj vodi [3].

U grafičkom prikazu 2.2., prikazane su prethodno spomenute kategorizacije korozije.



Slika 2.2.: Podjela korozijskih procesa

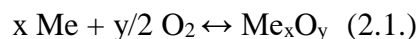
## 2.1 Podjela korozijskih procesa prema mehanizmu djelovanja

### 2.1.1 Kemijska korozija

Na povišenoj temperaturi, nastaju kemijske reakcije između atoma metala (iz kristalne strukture) i električki nevodljive okoline, rezultirajući formiranjem spojeva u obliku molekula, uglavnom oksida i sulfida. Metali i provodljivi nemetali, uključujući grafit, podložni su kemijskoj reakciji u neelektrolitima, tj. u suhim i visokotemperaturnim plinovima i parama, kao i u nevodljivim tekućinama poput mazivih ulja. S druge strane, nevodljivi nemetali, uključujući drvo, beton, staklo, keramiku, kamen i polimerni materijali, reagiraju kemijski u plinovima i tekućinama [3].

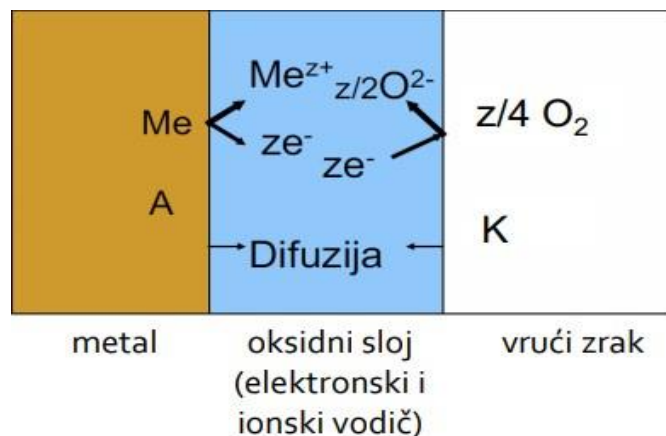
Tijekom različitih postupaka obrade, kao i tijekom eksploatacije pri visokim temperaturama, metali i legure reagiraju s okolnim zrakom ili drugim plinovima koji sadrže kisik ili njegove spojeve. U ovakvim uvjetima, na površini metala obično nastaju termički oksidi. Pojava različitih boja na površini odražava varijacije u debljini i sastavu oksidnog sloja [4].

Uobičajena (najčešća) situacija uključuje interakciju metala s kisikom, što rezultira stvaranjem metalnog oksida kao korozijskog produkta. Sljedeća jednadžba opisuje proces oksidacije metala s kisikom. Dinamička ravnoteža postiže se kad su brzine reakcija u oba smjera izjednačene.



U ranijoj jednadžbi, prva varijabla označava metale, dok druga predstavlja molekule kisika, što rezultira stvaranjem metalnog oksida kao krajnjeg produkta. Simboli  $x$  i  $y$  označavaju broj atoma metala ( $x$ ) i kisika ( $y$ ).

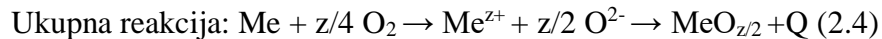
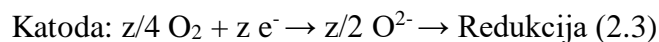
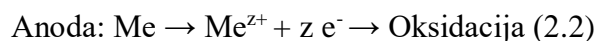
Wagnerova teorija kemijske korozije prikazana je na slici 2.3., na kojoj su simbolima  $A$  i  $K$  označeni anoda i katoda, a  $z$  predstavlja valenciju metala. Na površini metala nastaje oksidni sloj kao posljedica anodnih reakcija na granici između metala i oksida, te katodnih reakcija na granici oksida i plina. Kada je površina metala izložena korozivnoj okolini, atomi metala gube elektrone iz vanjske ljuske te nastaju ioni metala. Molekule kisika prihvaćaju elektrone te nastaju anioni kisika. Dolazi do reakcije kationa metala i aniona kisika uz stvaranje metalnog oksida, odnosno korozijskog produkta.



Slika 2.3.: Wagnerova teorija kemijske korozije [3]

Korozijski proces metala proizlazi iz redoks reakcije (kombinacija oksidacije i redukcije), koja objašnjava oksidaciju metala u različitim atmosferskim sredinama [7].

Način na koji se te dvije reakcije mogu prikazati je sljedeći:



U cjelokupnoj reakciji, oksid metala označava se s  $\text{MeO}_{z/2}$ , dok se oslobođena toplina, izražena u džulima (J), predstavlja simbolom Q zbog egzotermnog kemijskog procesa.

Brzina kemijske korozije ovisi o:

- metalu koji korodira (kem. sastavu, strukturi, stanju površine)
- naprezanjima
- temperaturi
- koeficijentu difuzije iona (kroz korozijski produkt)
- transportu elektrona
- parcijalnom tlaku kisika (za okside)
- kvaliteti oksidnog sloja (ili drugih korozijskih produkata)
- sastav i koncentracija agresivne okoline (vrući plinovi  $\text{O}_2$ ,  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ) [3].

Očito je moguće zaključiti da je smanjenje brzine korozije kod konstrukcijskih materijala ostvarivo. Primjerice, to može biti postignuto putem snižavanja temperature. Na taj način, moguće je utjecati na smanjenje energijske razine reaktanata, tj. atoma i molekula koji međusobno reagiraju. Također, materijali s čistim i glatkim površinama korodiraju sporije od onih koji su hrapavi i onečišćeni, jer njihova stvarna površina je mnogo veća od geometrijske površine. Različita onečišćenja koja se nalaze na površini, kao što je primjerice čađa, sprječavaju formiranje kvalitetnih oksidnih (zaštitnih) slojeva [3].

Oksidni slojevi uzrokuju povećanje mase i debljine metala. Kroz to se sprječava direktni kontakt molekula reaktanata iz okoline s atomima na metalnoj površini. Oksidni slojevi mogu smanjiti koroziju pod uvjetom da zadovoljavaju sljedeće:

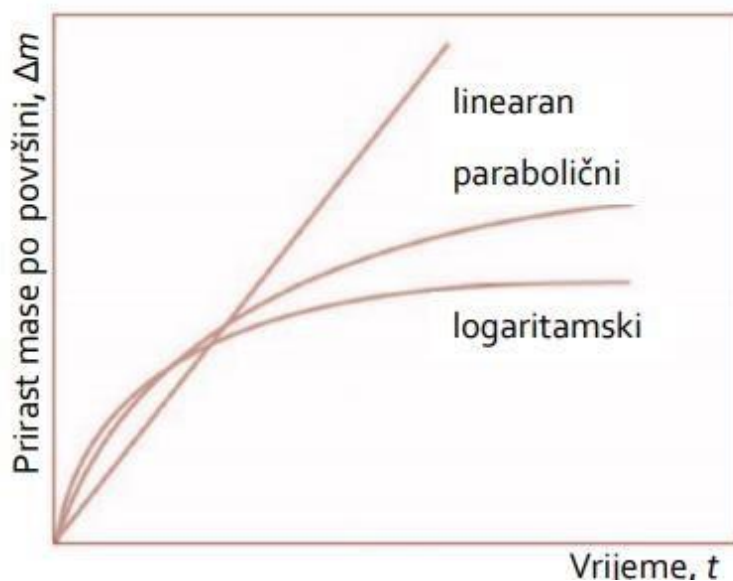
- Oksidni slojevi moraju biti čvrsti i stabilni u fizikalnom i kemijskom smislu.
- Oksidni slojevi moraju potpuno pokrivati i prijanjati uz metalnu površinu, uz uvjet da volumen korozijskog produkta premašuje volumen metala [3].

Na početku, oksidni slojevi će se brzo razvijati, bit će kompaktni i pokrivat će cijelu metalnu površinu. Međutim, brzina njihovog rasta će početi opadati kada debljina dosegne oko stotinjak nanometara. Daljnja brzina kemijske korozije ovisit će o transportnom mehanizmu, koji može biti potaknut razlikom u koncentraciji ili električnom potencijalu. Kao rezultat, razlikuju se tri drugačija tipa rasta oksidna sloja na površinama metala:

- linearan,
- paraboličan,
- logaritamski [4].



Grafički je prikazan (slika 2.4.) razvoj oksidnog sloja prema vremenu i promjena mase po površini.



Slika 2.4.: Promjena oksidnog sloja u odnosu na prolazno vrijeme i povećanje mase po površini [3]

Oksidni sloj raste linearno, što znači da je kinetička kontrola prisutna, kad god sloj nije nepropustan, tj. kad ne pokriva potpuno metalnu površinu. U ovakvom slučaju, oksidni sloj neće imati zaštitne karakteristike, a brzina korozije ostaje konstantna. Primjer materijala s ovakvim korozijskim procesom je magnezij [3,4].

Kada je oksidni sloj čvrst, tada se događa paraboličan rast, poznat kao difuzijska kontrola. U tom slučaju, oksidni sloj djeluje kao prepreka za difuziju kisika. Brzina rasta oksida je obrnuto proporcionalna njegovoj trenutnoj debljini. Takav oksidni sloj pruža zaštitu na visokim temperaturama. Primjeri materijala koji prolaze kroz ovakav korozijski proces su željezo na temperaturama iznad 250 °C, dok se bakar i nikal odnose na temperature iznad 500 °C [3,4].

Kontrola tuneliranjem elektrona uzrokuje logaritamski rast kada su temperature niske i kada je brzina difuzije kroz oksidni sloj na početku visoka. No, kako se oksidni sloj postupno zgusne, brzina difuzije se značajno smanjuje. Ovaj oksidni sloj pruža zaštitu pri niskim temperaturama. Primjeri materijala koji prolaze kroz ovakav korozijski proces uključuju aluminij, bakar, željezo, cink i olovo [3,4].

Da bi se utvrdila kompaktnost oksidnog sloja na površinama metala, koristi se omjer koji je razvio Pilling-Bedworth.

$$PB = V_{KP} / V_m = (M_{KP} \cdot \rho_m) / (x \cdot M_m \cdot \rho_{KP}) \quad (2.5)$$

U formuli 2.5, KP označava korozijski produkt, m predstavlja tvar odnosno materijal, V predstavlja volumen u m<sup>3</sup>, M je oznaka za molnu masu u g/mol, ρ označava gustoću u kg/m<sup>3</sup> i x predstavlja broj atoma metala u korozijskom produktu.

Kada je omjer  $PB < 1$ , može se primijetiti značajno naprezanje koje uzrokuje raspadanje oksidnog sloja. To se posebno primjećuje kod materijala kao što su magnezij, natrij te kalij. Nasuprot tome, kada je omjer  $PB > 1$ , oksidni sloj će biti čvrst i stabilan. Primjeri takvih materijala uključuju željezo, aluminij, bakar te također i olovo. Ukoliko je omjer  $PB > 2$  (2,5), mogu se primijetiti tlačna naprezanja koja će uzrokovati širenje oksidnog sloja. To je posebno vidljivo kod vanadija, molibdena te volframa [3].

Željene karakteristike oksidnih slojeva na površinama metala uključuju:

- visoko talište
- odnos  $PB > 1$
- nizak difuzijski koeficijent reaktanata kroz oksidni sloj
- niski parcijalni tlak kisika
- visoka termodinamička stabilnost [4].

Oksidacija površina čelika rezultira željeznim oksidima koji se formiraju tijekom toplinskih obrada i postupka zavarivanja. Postoje tri različita tipa oksidnih slojeva na čeliku:

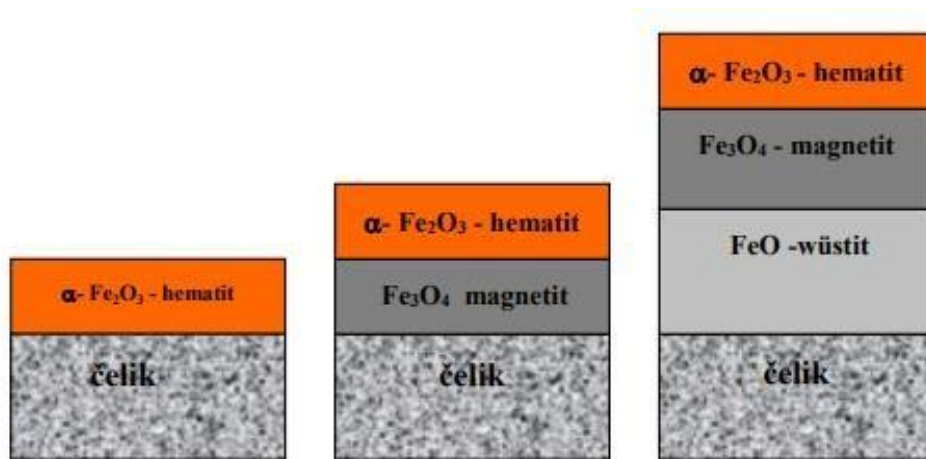
- nevidljivi oksidni slojevi
- deblji slojevi koji postaju vidljivi
- debeli vidljivi slojevi [4].

Nevidljivi oksidni slojevi, debljine manje od 100 nm, zahtijevaju suvremene znanstvene metode za potvrdu njihove prisutnosti. Iako su nevidljivi, boja metala može biti vidljiva preko tih slojeva, a oni pružaju čvrstu i pouzdanu zaštitu površine čelika na kojoj se pojavljuju. Na primjer, na čeliku se može formirati hematit (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) kao takav sloj pri sobnoj temperaturi, što traje nekoliko sati [4].

Deblji slojevi koji postaju vidljivi nastaju na čeliku pri visokim temperaturama (200 - 450 °C). Ti slojevi uključuju magnetitni sloj ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) i hematitni sloj, čija debljina iznosi 100 - 200 nm [4].

Debeli i dobro vidljivi slojevi formiraju se također na čeliku, ali pri temperaturama višim od 450 °C. Takvi slojevi su znatno deblji od prethodno spomenutih i dosežu debljinu od oko 1000 nm. Na površini čelika tijekom tog procesa, osim magnetita i hematita, također nastaje i wüstit ( $\text{FeO}$ ) [4].

Oksidacijski slojevi na površini čelika prikazani su slikom 2.5.



Slika 2.5.: Struktura oksidnih slojeva na površini čelika [4]

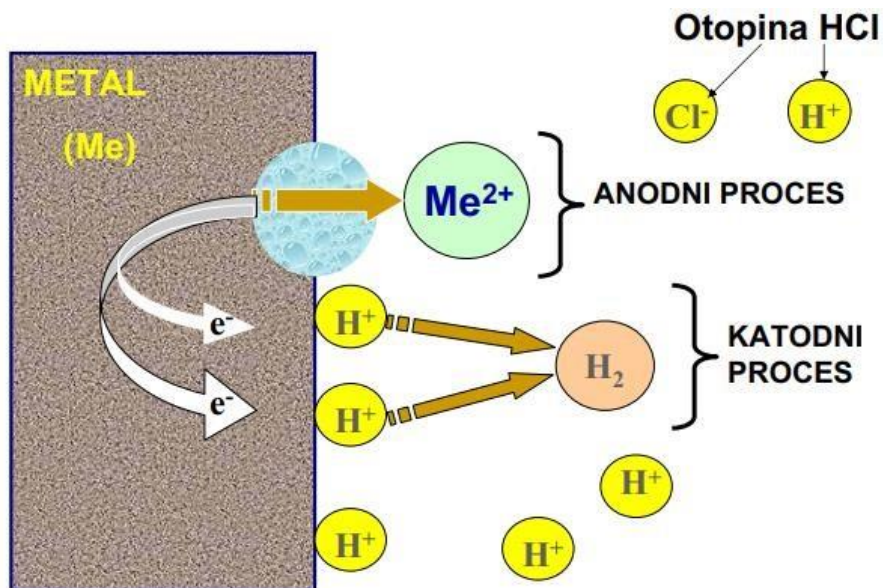
### 2.1.2 Elektrokemijska korozija

Elektrokemijska korozija se događa na površinama metala i legura pod utjecajem elektrolita, kao što su voda i njezine otopine - soli, lužine i kiseline, te u vodi u obliku kapljica ili filma koji se formira iz vlažnog zraka ili drugih plinova. Ovaj proces uključuje reakcije oksidacije i redukcije. Većina slučajeva korozije zapravo je elektrokemijske prirode.

Na površini anode odvija se oksidacijski proces, poznat kao anodna reakcija, gdje tvar gubi elektrone i povećava se njezin oksidacijski broj. Takve tvari se nazivaju elektron-donori ili reducensi. S druge strane, na površini katode odvija se redukcijski proces, poznat kao katodna reakcija. Tvar u ovom slučaju prima elektrone i smanjuje joj se oksidacijski broj. Ove tvari se nazivaju elektron-akceptori ili oksidansi [3].

Električni polovi, odnosno katode i anode, ne dijele istu lokaciju na površini materijala ili legure koja je izložena koroziji. Stoga, katodne i anodne reakcije se odvijaju istovremeno, ali na različitim mjestima [3].

Prikaz elektrokemijske korozije može se vidjeti na slici 2.6.



Slika 2.6.: Elektrokemijska korozija [3]

Da bi došlo do elektrokemijske korozije potrebna su tri uvjeta:

- anoda
- katoda
- metal ili legura u dodiru s elektrolitom.

Svi navedeni uvjeti moraju biti ispunjeni kako bi došlo do elektrokemijske korozije [3].

Elektrokemijske pojave, poput korozijskih članaka, proizlaze iz diskrepancije između potencijala na anodnim i katodnim lokacijama. Oni se formiraju na površini metala koja je uronjena u elektrolit. Različiti dijelovi površine metala u elektrolitu variraju zbog neusklađenosti unutarnjih i vanjskih čimbenika korozije, što dovodi do različitih elektrokemijskih svojstava. Tako neki od njih pogoduju oksidacijskim procesima, dok su drugi prikladniji za redukcijske reakcije [4].

Korozijski članak proizlazi iz različitih koncentracija iona elektrolita koji su u kontaktu s površinom metala i njihove kemijske strukture. Ove različitosti često nastaju tijekom miješanja i razrjeđivanja elektrolita, kao i prilikom otapanja soli. Povećana koncentracija određenih tvari u elektrolitu može olakšati ili otežati anodne ili katodne procese. Ovisno o različitim sastavima i koncentracijama tih tvari, neka područja površine metala mogu postati anode, dok će druga postati katode [4].

Standardni elektrodni potencijal ( $E^0$ ) utvrđuje se putem analize elektrodnih potencijala pri normalnim uvjetima, definiranim tlakom od 101 325 Pa i temperaturom od 25 °C. Ovaj parametar označava sklonost oslobađanja elektrona u redoks sustavu. Precizna vrijednost standardnog elektrodnog potencijala izračunava se pomoću standardne vodikove elektrode, tj. elektrode od platine koja ima pasivnu ulogu u elektrokemijskoj reakciji i služi samo kao podloga na kojoj se atomi vodika mogu oksidirati ili ioni vodika reducirati, ovisno o metalu u spoju [3].

Vrijednosti standardnih elektrodnih potencijala raznih metala prikazani su na slici 2.7.

Metalo	Oksidacija (ionizacija)	Standardni elektroadni potencijal, E° VRIJEDI ZA: p = 101325 Pa, θ = 25°C
Kalij	$K \rightarrow K^+ + e^-$	-2,924
Natrij	$Na \rightarrow Na^+ + e^-$	-2,714
Magnezij	$Mg \rightarrow Mg^{2+} + 2e^-$	-2,363
Aluminij	$Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^-$	-1,662
Cink	$Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$	-0,763
Krom	$Cr \rightarrow Cr^{3+} + 3e^-$	-0,744
Željezo	$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$	-0,440
Kadmij	$Cd \rightarrow Cd^{2+} + 2e^-$	-0,403
Kobalt	$Co \rightarrow Co^{2+} + 2e^-$	-0,277
Nikal	$Ni \rightarrow Ni^{2+} + 2e^-$	-0,250
Kositar	$Sn \rightarrow Sn^{2+} + 2e^-$	-0,136
Olovo	$Pb \rightarrow Pb^{2+} + 2e^-$	-0,126
VODIK	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	0,000
Bakar	$Cu \rightarrow Cu^{2+} + 2e^-$	+0,340
Srebro	$Ag \rightarrow Ag^+ + e^-$	+0,800
Platina	$Pt \rightarrow Pt^{2+} + 2e^-$	+1,200
Zlato	$Au \rightarrow Au^{3+} + 3e^-$	+1,420

NEPLEMENITI METALI  
POVEĆANJE SKLONOSTI KOROZIJU

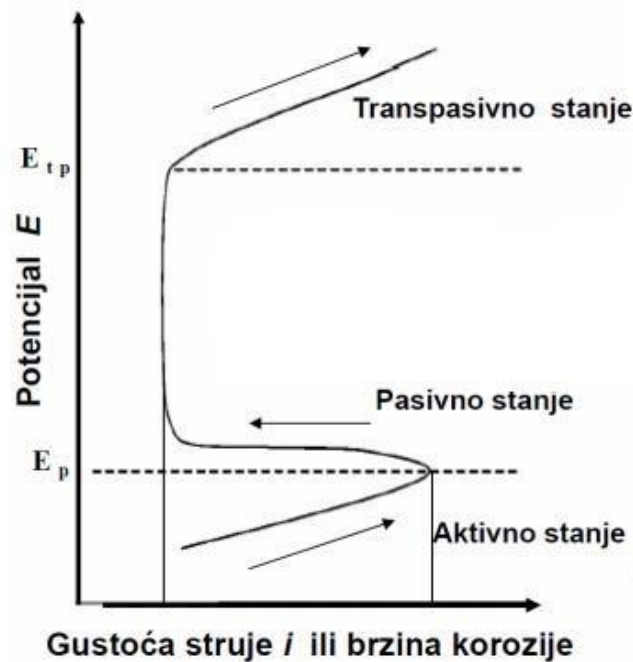
PLEMENITI  
NE KORODIRAJU

Slika 2.7.: Vrijednosti standardnih elektroadnih potencijala raznih metala [3]

Metalo koji djeluje kao katoda ima pozitivniji standardni elektroadni potencijal od anode, što ih čini manje podložnim koroziji. Na primjer, bakar koji je katoda ima veći standardni elektroadni potencijal od cinka koji je anoda, pa će cink prije korodirati. Tijekom elektrokemijske korozije, oksidacija i redukcija će se odvijati dok se ne postigne stanje ravnoteže koje usporava proces korozije. Polarizacijom se smanjuje razlika u elektroadnim potencijalima katode i anode, povećava se električni otpor korozijskog članka i otežava protok elektrona [3].

Polarizacija nastupa kada proizvodi korozije ograničavaju protok električne struje u korozijskom procesu. Radni napon korozijskog članka je niži od njegove elektromotorne sile, što rezultira usporavanjem brzine korozije zbog katodne i anodne polarizacije, koje ometaju protok struje [3].

Prikaz polarizacijske krivulje nalazi se na slici 2.8.



Slika 2.8.: Polarizacijska krivulja [3]

Kada se metal nalazi u aktivnom stanju, korozija će se događati s povećanom brzinom. No, u pasivnom stanju, formira se stabilan pasivni film koji uzrokuje značajno smanjenje brzine korozije. U transpasivnom stanju, taj pasivni film puca, što dovodi do ponovnog porasta brzine korozije. Na slici,  $E_p$  označava elektrodni potencijal za pasivaciju, dok  $E_{tp}$  označava elektrodni potencijal za transpasivaciju [3].

### 2.1.3 Brzina elektrokemijske korozije

Brzina elektrokemijske korozije može se odrediti na dva načina, a to su pomoću gravimetrijskog ispitivanja ili pomoću elektrokemijskog ispitivanja.

Najrasprostranjenija kvantitativna metoda za ispitivanje korozije je gravimetrijska analiza. Ova izravna metoda uključuje mjerenje promjene mase uzorka prije i nakon korozije, uz uklanjanje korozijskih produkata. Iako je vrlo precizna, ima nekoliko ograničenja, uključujući dugotrajno ispitivanje koje traje nekoliko mjeseci i primjenjivost samo na slučajeve opće korozije [3,8].

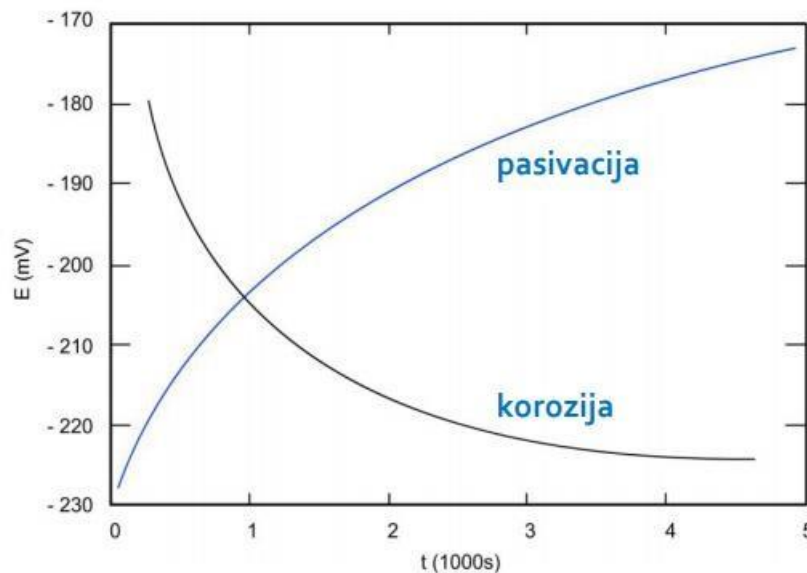
$$v_{kor} = \Delta m / (A \cdot t) \quad (2.6)$$

U formuli 2.6 izražena je brzina korozije sa  $v_{kor}$ ,  $\Delta m$  predstavlja promjenu mase ispitivanog materijala,  $A$  označava površinu koja se istrošila, dok  $t$  predstavlja vremenski period izloženosti agresivnom okruženju.

Elektrokemijskim analizama korozije mogu se dobiti informacije o ponašanju metala u specifičnom elektrolitu tijekom određenog razdoblja. Prednosti ovog pristupa brzini korozije uključuju preciznost mjerenja, kratko vrijeme testiranja te mogućnost neprekidnih mjerenja. Ovim metodama analize dobivaju se podaci o krivuljama potencijala otvorenog strujnog kruga u ovisnosti o vremenskim parametrima, što omogućuje izradu Tafelovih krivulja [3].

Nakon promatranja promjena u vremenskom tijeku stacionarnog potencijala otvorenog strujnog kruga ( $E_{OC}$ ), stvara se krivulja potencijala otvorenog strujnog kruga. Ovaj postupak omogućuje analizu ponašanja uzorka u specifičnom elektrolitu tijekom korozije. Pozitivne vrijednosti  $E_{OC}$  ukazuju na stabilnost i otpornost uzorka u elektrolitu, dok negativne vrijednosti ukazuju na otapanje uzorka i nestabilnost, što rezultira korozijom.  $E_{OC}$  vrijednosti mijenjaju se od negativnih prema pozitivnim tijekom vremena, što znači da dolazi do pasivacije [3].

Primjer krivulje potencijala otvorenog strujnog kruga nalazi se na slici 2.9.



Slika 2.9.: Krivulja potencijala otvorenog strujnog kruga [3]



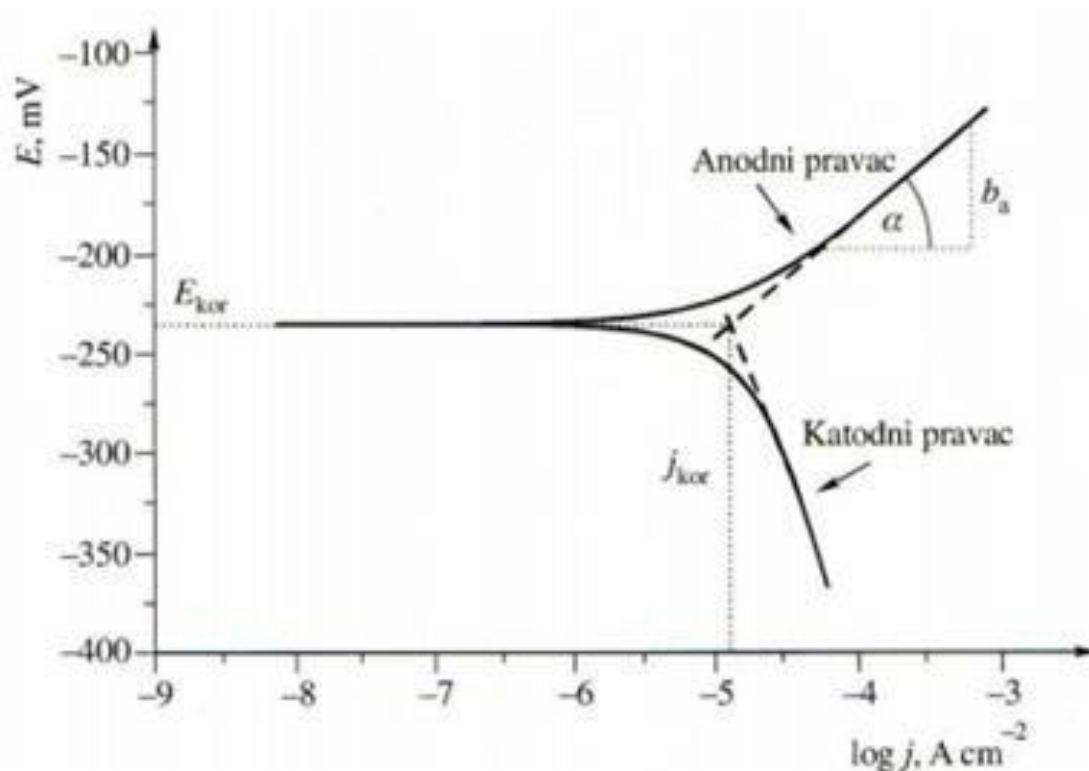
Krivulja anodne i katodne polarizacije, poznata i kao Tafelova krivulja, prikazuje rezultate anodnih i katodnih polarizacijskih procesa u blizini potencijala  $E = E_{OC} \pm 250 \text{ mV}$ . Ti rezultati prikazani su grafikonom u polulogaritamskom formatu. Produljenjem Tafelovih pravaca za anodu i katodu, određuje se točka presjeka koja definira gustoću korozijske struje i korozijski potencijal [3].

Iz mjerenja korozijske struje [ $\mu\text{A cm}^{-2}$ ], ekvivalentne mase [g] i gustoće materijala [ $\text{g/cm}^3$ ], moguće je izračunati brzinu korozije prema sljedećoj jednadžbi:

$$v_{kor} = (0,0033 * i_{kor} * Ew) / \rho \text{ [mm god-1]} \quad (2.7)$$

U izrazu iznad,  $v_{kor}$  označava brzinu korozije,  $i_{kor}$  je korozivna struja,  $Ew$  je ekvivalentna masa, a  $\rho$  je gustoća materijala.

Prikaz Tafelove krivulje nalazi se na slici 2.10.

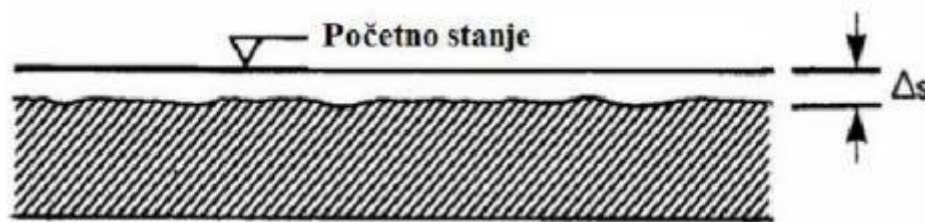


Slika 2.10.: Tafelova krivulja [3]

## 2.2 Podjela korozijskih procesa prema obliku razaranja

### 2.2.1 Opća korozija

Opća korozija je vrsta korozije koja se širi po cijeloj površini materijala, poznata je kao široko rasprostranjena korozija i predstavlja najčešći oblik korozije. Iako je česta, nije posebno opasna. Ova vrsta korozije može biti ravnomjerna ili neravnomjerna u svojoj manifestaciji. Intenzitet opće korozije mjeri se kroz smanjenje dimenzija materijala tijekom godine ili gubitkom njegove mase. Na primjer, čelici koji nisu otporni na koroziju gube 0,30 milimetara debljine tijekom godine, pri čemu se intenzitet korozije povećava s povećanjem postotka ugljika u sastavu. Na slici 2.11. prikazan je gubitak materijala koji se javlja pod utjecajem opće korozije [9].



Slika 2.11.: Gubitak materijala djelovanjem opće korozije [9]

Zaštitu od opće korozije čelika moguće je postići na sljedeće načine:

- nanoseći zaštitni sloj na površinu (premazivanje)
- povećavajući udio bakra za više od 0,2%
- primjenom raznih premaza: niklanje, cinčanje, kositrenje [9].

Iako opća korozija može izazvati značajne gubitke materijala, ne predstavlja ozbiljnu opasnost. Da bi se minimalno utjecalo na konstrukciju izgrađenu od određenog metala, očekivani gubitak materijala mora se nadoknaditi povećanjem debljine konstrukcije. Količina koja će se dodati ovisi o predviđenom vremenu eksploatacije i uvjetima okoline u kojoj će materijal biti izložen. Jednostavne metode poput nanošenja premaza mogu značajno smanjiti intenzitet korozije na prihvatljivu razinu [9].

### 2.2.2 Lokalna korozija

Suprotno općoj koroziji koja utječe na cijelu metalnu površinu, lokalna korozija zahvaća samo određene dijelove metala. Gubitak mase pri lokalnoj koroziji nije relevantan pokazatelj. Može biti minimalan, ali čak i tada konstrukcija može postati neupotrebljiva. To se može primijetiti, na primjer, kod curenja cjevovoda i spremnika.

Lokalna korozija se može pojaviti kao:

- rupičasta (pitting)
- potpovršinska
- u procjepu
- galvanska.

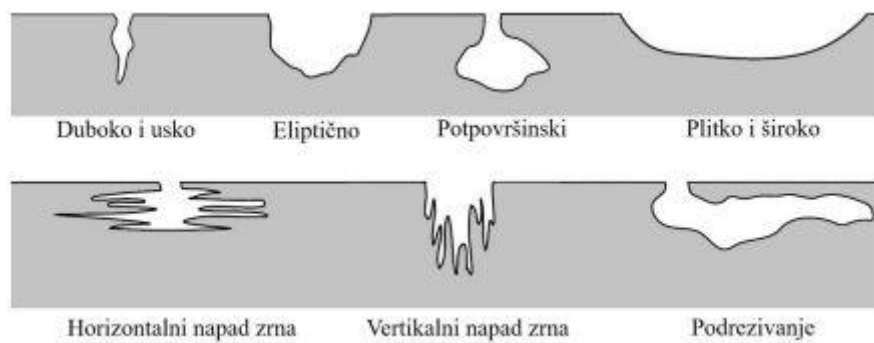
Na nekim područjima gdje je oštećena zaštita od korozije zbog mehaničkog djelovanja ili kemijske degradacije, može se pojaviti fenomen poznat kao rupičasta korozija (pitting). Rupičasta korozija predstavlja uobičajeni oblik elektrokemijskog oštećenja uzrokovanog lokalnom depasivacijom metala koji su inače u pasivnom stanju, poput nehrđajućih čelika. Ovaj oblik korozije smatra se opasnijim jer stvara male rupice u materijalu koje je teško uočiti jer ne uzrokuje značajnije smanjenje mase. Mjerenje rupičaste korozije izazovno je jer rupice mogu varirati u dimenzijama i dubini ovisno o specifičnim radnim uvjetima. Nehrđajući čelici spadaju među najosjetljivije materijale na ovakvu vrstu korozije, posebno u morskoj vodi ili okolišu s visokim koncentracijama klora i broma, što je ilustrirano na primjeru na slici 2.12 [10].



*Slika 2.12.: Rupičasta (pitting) korozija dijela osovine od nehrđajućeg čelika [10]*

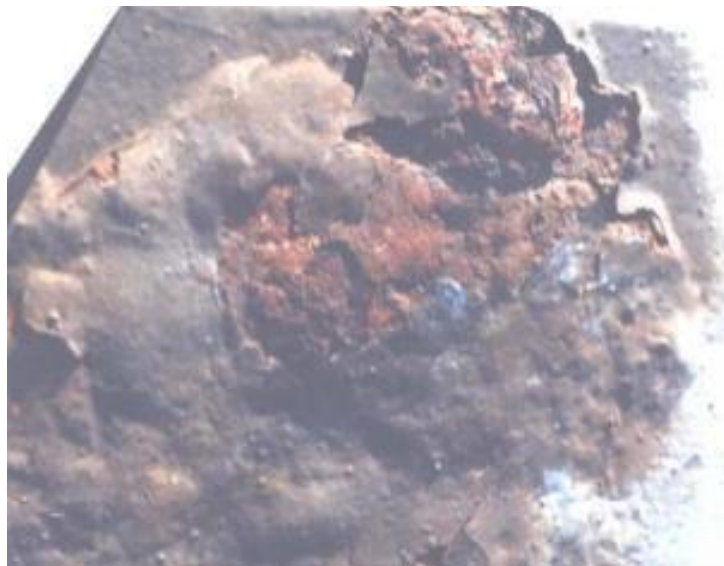
Rupičasta korozija može nastati iz različitih razloga koji uključuju lokalna oštećenja zaštitnog filma na površini metala, koja mogu biti uzrokovana kemijom ili mehaničkim djelovanjem, nehomogenost strukture materijala i lokalni utjecaj mikroorganizama. Da bi se procijenilo stanje površine, potrebno je proučavati gustoću, veličinu i dubinu rupica. Na plohi zahvaćenoj ovakvom vrstom korozije, veća koncentracija rupica ukazuje na veću dubinu do koje korozija prodire [3,4].

Na slici 2.13. prikazani su razni oblici oštećenja uslijed rupičaste korozije.



*Slika 2.13.: Razni oblici oštećenja uslijed rupičaste korozije [3]*

U slučaju potpovršinske korozije, mogu se pojaviti bubrenje, eksfoliacija te filiformna korozija. Tijekom bubrenja, korodirani materijal ima smanjeni volumen u odnosu na korozijski produkt, što je prikazano na slici 2.14.



*slika 2.14.: Bubrenje čelika [3]*

Eksfolijacija se također naziva ljuštenje ili odvajanje slojeva. Najčešće se susreće kod aluminija i metala oblikovanih postupkom valjanja. Materijal se čini poput listova i lako se raspada. Proces korozije počinje na granicama zrna najbližim površini i širi se paralelno uz površinu [3]. Na slici 2.15. može se vidjeti primjer eksfolijacije.



*slika 2.15.: Eksfolijacija Al-legure u morskoj atmosferi [3]*

Filiformna korozija uočava se na zatvaračima staklenih posuda za hranu, ona nastaje ispod zaštitnih premaza na područjima njihovih lokalnih pukotina [3]. Slika 2.16. prikazuje filiformnu koroziju.



*Slika 2.16.: Filiformna korozija [3]*

Korozija u procjepu izazvana je slično kao i rupičasta korozija, no umjesto jamica javlja se razmak odnosno procjep. Nastaje blizu pukotina, procjepa ili različitih površina. Može proizaći iz nakupljanja korozivnih tvari u pukotinama, iako su okolne površine uglavnom suhe. Ako je materijal uronjen u otopinu, unutar pukotine mijenjaju se uvjeti, što dovodi do povećanja kiselosti i koncentracije agresivnih tvari, a pH vrijednost opada [4].

Korozija u procjepu također može nastati zbog pojave diferencijalne aeracije, tj. različite koncentracije kisika u elektrolitu. U procjepu ima manje kisika, pa je to anodno područje, dok izvan procjepa ima više kisika, što potiče katodnu reakciju. Tipičan primjer ovog oblika korozije je korozija na navojima vijka i matice [3].

Najčešći uzrok ovog tipa korozije je loše konstrukcijsko-tehnološko rješenje. Korozija u procjepu može se pojaviti ispod slojeva naslaga i nečistoća, te na dijelovima gdje se agresivni medij zadržava duže vrijeme zbog lošeg konstrukcijskog rješenja [4]. Prikaz ove vrste korozije nalazi se na slici 2.17.



*Slika 2.17.: Primjer oštećenja metala uslijed korozije u procjepu [3]*

Galvanska korozija, još poznata pod nazivima kontaktna ili bimetalna korozija, nastaje kad dva metala dođu u kontakt, a oko njih je elektrolit te se onda formira bikorozivni članak. Korodirat će metal s nižim elektrodnom potencijalom (anoda bimetalnog članka). Galvanska korozija je izrazito opasan oblik korozije jer anodni metal brzo korodira. Također potrebno je izbjegavati kombinacije metala s velikim razlikama u elektrodnom potencijalima (npr. galvanski niz s ravnotežnim potencijalima metala i legura u morskoj vodi u odnosu na referentnu elektrodu). Veličina anode i katode utječe na kontaktnu koroziju. Posebno je opasno ako su vijci, zakovice ili zavari (spojni elementi) anode u odnosu na ostatak konstrukcije. U slučaju kad je katoda manja, ona ima manji utjecaj na anodu te se onda javlja manja površina za redukciju te dolazi do manje gustoće korozijske struje. Kad je anoda manja, katoda ima veći utjecaj na anodu te će mala anoda brže korodirati [3]. Slika 2.18. prikazuje primjer galvanske korozije.



*Slika 2.18.: Galvanska (kontaktna, bimetalna) korozija [3]*

### 2.2.3 Selektivna korozija

Korozija s selektivnim djelovanjem je postupak koji uništava samo jedan dio ili samo jednu sastavnicu višefaznog ili višekomponentnog materijala. Ova vrsta korozije je kritična jer transformira stabilan i fleksibilan materijal u krhak i lomljiv, kod selektivne korozije također ne dolazi do značajnih dimenzijskih promjena. Razlikuje se u manifestaciji između općeg i lokalnog oblika korozije. Uobičajeni slučajevi ovakvog razaranja uključuju decinkaciju mjedi (komponentno selektivni proces) i promjenu grafitne strukture u sivom lijevu (fazno selektivni proces) [3,4].

Decinkacija je specifičan oblik selektivne korozije koji se često pojavljuje u jednofaznim legurama. Na primjer, decinkacija može zahvatiti leguru bakra s više od 15% cinka kada je izložena tlu i vodi. U ovom slučaju, cink se otapa, dok bakrena matrica ostaje netaknuta. Budući da je cink mnogo reaktivniji od bakra, lako se izlučuje, što rezultira nastankom poroznog bakra s oslabljenim mehaničkim svojstvima [3]. Ovaj specifičan oblik selektivne korozije može se vidjeti na slici 2.19.



*Slika 2.19.: Decinkacija mjedi [3]*

Fazna selektivna korozija poznata kao grafitizacija može se primijetiti kod sivog lijeva kada je izložen tlu, razrijeđenim kiselinama i slanoj vodi. Tijekom ovog procesa, ferit i perlit se otapaju, dok ostaje porozni grafit koji je prožet hrđom [3]. Primjer grafitizacije čelika može se vidjeti na slici 2.20.

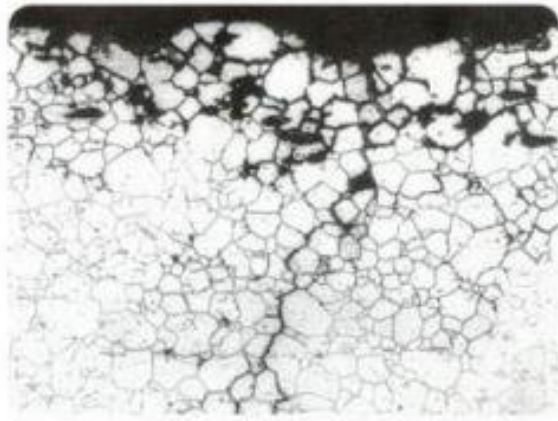


*Slika 2.20.: Primjer grafitizacije čelika [11]*

#### 2.2.4 Interkristalna korozija

Jedan od najrizičnijih oblika korozije je interkristalna korozija koja se širi neprimjetno po granicama kristalnih zrna u materijalu, uništavajući metalnu vezu između zrna. Ovo brzo smanjenje žilavosti i čvrstoće materijala dovodi do loma materijala. Interkristalna korozija obično se povezuje s senzibilizacijom uzrokovanom toplinskom obradom ili zavarivanjem, što stvara različite precipitate. To često nastaje kod austenitnih nehrđajućih čelika pri temperaturama od 400 do 800 °C zbog velike sklonosti ugljika kromu. Karbidni precipitati uz granice kristalnih zrna uzrokuju senzibilizaciju čelika, jer dijelovi blizu tih granica imaju manje kroma ( $Cr < 12\%$ ), čime gube postojanost na koroziju ( $Cr > 12\%$ ). Danas postoje načini za izbjegavanje senzibilizacije, uključujući smanjenje sadržaja ugljika i stabilizaciju putem legiranja s titanijem ili niobijem. Također, manja kiselost i blaži oksidativni uvjeti mogu smanjiti pojavu interkristalne korozije [3,4,7]. Na slici 2.21. može se vidjeti interkristalna korozija austenitnog čelika.





*Slika 2.21.: Interkristalna korozija austenitnog čelika [3]*

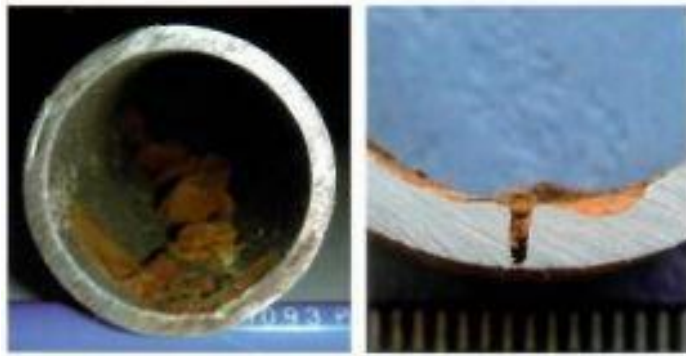
### **2.3 Posebni oblici korozijskih procesa**

Između navedenih tipova korozije postoje i dodatni oblici razaranja, uključujući:

- koroziju induciranu biološkim organizmima (biološka korozija)
- koroziju koja nastaje uslijed mehaničkih djelovanja
- koroziju uzrokovanu prisutnošću lutajućih struja u okolini.

Biološka korozija može obuhvaćati bakterijsku razgradnju materijala ili koroziju implantata u ljudskom tijelu.

Uzrok razaranja materijala je posljedica aktivnosti mikroorganizama, što je poznato kao bakterijska korozija. Ovaj tip korozije često se može primijetiti u cjevovodima i spremnicima za obradu otpadnih voda, nafte i plina, rashladnim sustavima, dokovima, spremnicima za gorivo, kao i u kondenzatorima nuklearnih i termalnih elektrana [3]. Primjer bakterijske korozije može se vidjeti na slici 2.22.



*Slika 2.22.: Bakterijska korozija cjevovoda pitke vode [3]*

Kada se govori o reakcijama unutar ljudskog organizma, spominje se biokorozija implantata koja može rezultirati njihovim oštećenjem, što znači da je neophodno zamijeniti ih. Postoje različiti čimbenici koji mogu utjecati na ovaj tip korozije, kao što su:

- koncentracija iona
- brzina kretanja tekućine
- kiselost tekućine (često  $\text{pH} < 7$ )
- temperatura tijela
- fizička opterećenja
- vrsta materijala
- proizvodni proces i kvaliteta implantata [3].

Kod korozije koja nastaje uslijed mehaničkog djelovanja razlikuju se:

- napetosna korozija
- korozijski zamor
- tarna korozija
- erozijska korozija
- kavitacijska korozija.

Napetosna korozija (eng. SCC – Stress Corrosion Cracking) je oblik korozije koji nastaje u tehničkim materijalima zbog istodobnog djelovanja okoline, eksploatacije, mehaničkih naprežanja te korozijskih reakcija [12].



*Slika 2.23.: Čimbenici koji utječu na pojavu napetosne korozije [12]*

Kada se kombiniraju vlačna naprezanja i okolina, korozija će se razvijati mnogo brže nego kad svaki od njih djeluje samostalno. Teško je predvidjeti napetosnu koroziju zbog nedostatka vidljivih znakova iniciranja prije stvaranja pukotina ili čak loma. Havarije uzrokovane ovim oblikom korozije su nepredvidive i često donose visoke troškove. Njen rezultat je lom materijala. Naprezanja koja dovode do napetosne korozije su relativno mala, statička i vlačne prirode. Ovaj tip korozije često se javlja na područjima s hladnom deformacijom i oko zavora zbog preostalih naprezanja i strukturnih promjena [3,4].

Korozijski zamor nastaje na metalima i legurama koji su podložni utjecaju okoline i dinamičkih naprezanja. Kada se, kao i kod napetosne korozije, dinamička naprezanja i korozivna okolina djeluju zajedno, oštećenje materijala i njegov lom će se dogoditi brže nego kada djeluju odvojeno. Posljedica korozijskog zamora je lom materijala koji često predstavlja uzrok katastrofa [3]. Na slici 2.24. prikazan je lom vratila uslijed korozijskog zamora.



*Slika 2.24.: Lom vratila uslijed korozijskog zamora [3]*

Još jedna vrsta korozije koja se javlja uslijed mehaničkog djelovanja je tarna korozija koja se javlja zbog trenja. Manifestira se na površinama materijala podložnim klizanju, vibracijama i korozivnoj okolini. Tipičan primjer ove korozije može se vidjeti na osovinama i ležištima. Ova vrsta korozije često uzrokuje stvaranje malih rupica i žljebova [3]. Na slici 2.25. može se vidjeti primjer oštećenja materijala tarnom korozijom.



*Slika 2.25.: Primjer oštećenja nastao tarnom korozijom [3]*

Erozijska korozija se događa kada se korozija kombinira s erozijom, što uzrokuje gubitak materijala zbog međudjelovanja površine i medija. Najčešće se javlja u sustavima za prijenos tekućina s visokom brzinom protoka. Zbog brzine protoka, tekućina uklanja zaštitne slojeve na metalu, izlažući ga ponovno djelovanju korozije. U cijevima, ova vrsta korozije može uzrokovati oštećenje stijenki i curenje tekućine. Najosjetljiviji na erozijsku koroziju su ugljični čelici, koji stvaraju debele, ali slabo prijanjajuće zaštitne slojeve, te meki metali poput bakra i njegovih legura. Brzina protoka tekućine igra ključnu ulogu u ovom procesu, pa je važno odabrati optimalnu brzinu za određeni materijal cijevi i vrstu korozivne tekućine [3]. Na slici 2.26. mogu se vidjeti oštećenja bakrenog cjevovoda uzrokovana erozijskom korozijom.



*Slika 2.26.: Erozijska korozija bakrenog cjevovoda [3]*

Kavitacija korozija nastaje zbog združenog utjecaja korozije i kavitacije na površini metala u kontaktu s elektrolitom. Ovaj fenomen proizlazi iz varijacija tlaka u elektrolitu koje stvaraju mjehurići. Ti mjehurići zatim udaraju o površinu materijala, uzrokujući rupičastu koroziju i lokalne deformacije. Postupno se odstranjuje materijal s površine, što rezultira sve više neravnom površinom. Na područjima koja su najviše izložena kavitacijskoj koroziji dolazi do značajnog smanjenja debljine materijala [3]. Na slici 2.27. se nalazi primjer oštećenja lopatice turbine kavitacijskom korozijom.



*Slika 2.27.: Oštećenje lopatice turbine kavitacijskom korozijom [3]*

Korozija uzrokovana lutajućim strujama može se pojaviti u slatkovodnim i morskim okolinama te u tlu. Ta vrsta korozije često dovodi do snažnih i razornih oštećenja koja mogu prouzročiti velike štete. Ona proizlazi iz vanjskog električnog polja koje djeluje na metal prisutan u elektrolitu, što rezultira stvaranjem prividnih korozijskih elemenata. Na određenim površinama materijala, gdje pozitivna struja ulazi u metal iz elektrolita, nastaju katode, dok se na drugim mjestima gdje izlazi iz materijala u elektrolit formiraju anode [4]. Na slici 2.28. se nalazi primjer oštećenja uslijed djelovanja korozije lutajućih struja.



*Slika 2.28.: Oštećenja uslijed djelovanja korozije lutajućih struja [3]*

## 2.4. Unutrašnji i vanjski čimbenici korozije

Različiti čimbenici pokreću koroziju, a ona može biti potaknuta biološkim, mehaničkim, električnim ili kemijskim uzrocima. Taj proces narušava konstrukcijski materijal, uzrokujući štetu. Ako je pokretačka sila veća, brže se odvija narušavanje materijala. Veličina pokretačke sile i otpor ovise o kombinaciji unutarnjih i vanjskih čimbenika korozije. Unutarnji čimbenici odnose se na materijal izložen korozivnom djelovanju, dok vanjski čimbenici obuhvaćaju fizičke uvjete i svojstva medija odnosno okoline. Kombinacija unutarnjih i vanjskih čimbenika može uzrokovati značajno oštećenje postojećeg materijala [3]. Unutrašnji i vanjski čimbenici koji potiču korozijski proces dani su u tablici 2.1.

Tablica 2.1.: Unutrašnji i vanjski čimbenici korozije

<b>Unutrašnji čimbenici (materijal)</b>	<b>Vanjski čimbenici (okolina/medij)</b>
mikrostruktura materijala	vrsta okoline/medija
kemijski sastav materijala	temperatura okoline/medija
gustoća mikropukotina	tlak okoline/medija
zaostala naprezanja u materijalu	pH vrijednost
stanje površine	vlažnost
	toplinska i električna svojstva
	vlažnost
	viskoznost
	razina onečišćenja
	brzina strujanja medija
	oksidativni uvjeti

Utjecaj na koroziju može imati sastav materijala, njegova mikrostruktura i druga svojstva. Unutarnji čimbenici korozije, poput ovih navedenih, igraju ključnu ulogu u procesu. Neki primjeri njihovog utjecaja na koroziju su sljedeći:

Manja kristalna zrna djeluju kao anode i podliježu koroziji, dok veća zrna djeluju kao katode. Osim toga, granice zrna obično korodiraju jer također djeluju kao anode, kao i prisutni precipitati na tim granicama. Unutar zrna, područja koja su plemenitija djeluju kao katode, dok manje plemeniti uključci djeluju kao anode [3].

Razgradnja materijala ubrzava se s povećanjem broja mikropukotina. Također, brzina korozije raste s povećanjem preostalih naprezanja u materijalu. Obično su preostala naprezanja odgovorna za napetosnu koroziju. Porozniji materijali podložniji su bržoj koroziji [4,11].

Također bitan utjecaj na koroziju imaju i vanjski čimbenici, odnosno utjecaj okoline ili medija.

Razvrstavanje korozije ovisno o vrsti medija, tj. karakteristikama okoline kojoj je materijal izložen (zbog različitih načina obrade ili uporabe), omogućuje klasifikaciju korozije na različite oblike, kao što su korozija u vodi, korozija u kiselinama, korozija u lužinama itd.

Utjecaj okoline na korozijski proces zahtijeva promišljanje o izravnim i neizravnim utjecajima. Izravni utjecaji uključuju klimu, temperaturu zraka, sunčevu radijaciju, sadržaj vodene pare i druge čimbenike. Ti čimbenici često uvjetuju druge faktore koji također doprinose procesu korozije raznih materijala. Na primjer, mikrobiološka ili industrijska onečišćenja atmosfere mogu utjecati na koroziju ovisno o vlazi i temperaturi [14,15].

Porast temperature medija potiče brže kemijske reakcije, a temperaturni skokovi tijekom dana također mogu biti bitni. Vlažnost također ima značajnu ulogu u procesu korozije, a nagle promjene u vlažnosti mogu imati štetne posljedice. Mehanička naprezanja, posebno visoki intenziteti, također utječu na brzinu korozijskog procesa, a kontakt različitih materijala s različitim elektrodnim potencijalima može rezultirati korozijom manje plemenitog materijala [3,14].

Brzina strujanja medija može utjecati na brzinu korozije kod većine materijala, osim kod nehrđajućih čelika koji su otporniji pri većim brzinama fluida. Važan čimbenik je i stanje površine materijala jer glatka površina može pružiti bolja antikorozivna svojstva u usporedbi s hrapavom površinom. Također, različiti čimbenici u tlu, kao što su vlažnost, aeracija, pH vrijednost, temperatura i prisutnost soli, mogu utjecati na koroziju materijala [3,7,16].

Viskoznost, tj. unutarnje trenje tekućine također može utjecati na koroziju. Viskoznije tekućine imaju sporije procese oksidacije i redukcije te mogu otežati ispiranje korozivnih produkata s površine metala, povećavajući vjerojatnost dugotrajnog kontakta i time povećavajući rizik od korozije.

### **3. METODE PREVENCIJE OŠTEĆENJA UZROKOVANIH KOROZIJSKIM PROCESIMA**

Da bi se zaštitili materijali od oštećenja izazvanih korozijskim procesima, moguće je umanjiti utjecaj pokretačke sile korozije ili uzroke oštećenja, te pojačati otpornost na koroziju. Otpornost prema koroziji i pokretačku silu moguće je pojačati ili umanjiti na tri različita načina:

- promjenom unutarnjih faktora oštećenja
- promjenom vanjskih faktora oštećenja
- izolacijom materijala od okoline.

Osnovne metode za borbu protiv korozije temelje se na smanjenju kemijskog afiniteta, smanjenju energetske razine sustava i poboljšanju zaštitnih karakteristika korozijskog produkta. Korozija se može usporiti ili spriječiti spriječavanjem stvaranja elektrolita, smanjenjem afiniteta, povećanjem električnog otpora u strujnom krugu korozijskog procesa, povećanjem polarizacije anode ili katode i povećanjem površine anode [7].

Osnovni načini za sprečavanje korozije uključuju sljedeće:

- uporabu materijala otpornih na koroziju
- tehničku prilagodbu u konstrukciji
- primjenu zaštitnih premaza
- elektrokemijske metode zaštite
- uporabu korozijskih inhibitora [3].

#### **3.1 Uporaba materijala otpornih na koroziju**

Najčešći uzrok štete od korozije proizlazi iz nepravilnog odabira materijala. Stoga je ključna metoda zaštite materijala od korozije upravo odabir pravog materijala. Pri odabiru se uzimaju u obzir karakteristike materijala u odnosu na cijenu, okoliš, namjenu i mehanička naprezanja.

Korozijski postojani materijali su oni koji su otporni na utjecaj okoline. Njihova postojanost se mjeri kroz gubitak mase i volumena, promjene karakteristika tijekom korozije te oštećenja površine. Materijal koji je korozijski postojan pokazuje manja oštećenja površine i promjene karakteristika u istim uvjetima. Brzina korozije se često izražava kao prosječna dubina prodiranja korozije u materijal tijekom godine. Materijal se smatra upotrebljivim ako je brzina



prodiranja manja od 0,1 mm/god. No, važno je napomenuti da se korozija može usporiti primjenom odgovarajućih antikorozijskih mjera. Da bi čelik bio korozijski postojan, mora sadržavati najmanje 12% otopljenog kroma u željeznom kristalu kako bi postigao pasivnost, te mora imati homogenu monofaznu mikrostrukturu kako bi se spriječilo stvaranje galvanskih mikročlanaka [3,7].

### **3.2 Tehničke prilagodbe u konstrukciji**

Primjenom raznih tehničkih rješenja moguće je uvelike usporiti proces korozije i produžiti životni vijek materijala. Neke od tih tehnoloških mjera uključuju:

- regulaciju nižih temperatura elektrolita, s obzirom da veće temperature ubrzavaju koroziju.
- smanjenje brzine protoka elektrolita jer veća brzina uzrokuje ubranu korozijsku reakciju (osim kod nehrđajućeg čelika koji je otporniji na veće brzine elektrolita).
- smanjenje koncentracije agresivnih plinova.
- deaeraciju - uklanjanje zraka iz fluida kako bi se spriječila korozija.

Konstruktivske mjere koje se primjenjuju za usporavanje korozije uključuju:

- prilagodbu konstrukcijskog rješenja kako bi se izbjegli mogući problemi oštećenja uzrokovani korozijom.
- jednostavnije konstrukcije omogućuju lakše čišćenje i bolju zaštitu prevlakama.
- smanjenje nakupljanja vode i agresivnih fluida kako bi se olakšalo otjecanje i izbjegavanje stvaranja različitih procijepa.
- izbjegavanje spajanja materijala različitih plemenitosti kako ne bi došlo do galvanske korozije.
- prioritet davanje dobro izvedenim zavarima umjesto korištenja vijaka i zakovica kako bi se onemogućila korozija u procijepu i smanjila masa konstrukcije.
- izbjegavanje visokih tlakova, temperatura, naprezanja i brzina medija osim kada je apsolutno nužno za funkcionalnost.
- izbjegavanje oštih zavoja kod cjevovoda kako bi se umanjila opasnost od erozijske korozije.

- izbjegavanje mehaničkih naprezanja kako bi se umanjila opasnost od napetostne korozije [3, 7].

### 3.3 Primjena zaštitnih premaza

Moguće je usporiti ili spriječiti koroziju primjenom različitih premaza koji djeluju kao barijera protiv štetnih tvari u okolini. Kako bi se postigla što bolja zaštita, ključno je odabrati materijal za premaz koji je izdržljiv i otporan prema djelovanju tog okoliša odnosno medija. Osim što sprječavaju koroziju, premazi također štite materijal od mehaničkog habanja te doprinose estetskom izgledu. Prevlake se općenito dijele na dvije kategorije: nemetalne i metalne, a unutar nemetalnih prevlaka razlikuju se organske i anorganske [7].

Kvaliteta zaštitnih premaza ovisi o njihovoj raznolikosti, debljini, gustoći i sposobnosti prijanjanja. Iz ovih činjenica može se zaključiti da postupak nanošenja ima ključan utjecaj na performanse premaza. Ovaj proces uključuje pripremu površine materijala, aplikaciju premaza te, u nekim slučajevima, završnu obradu premaza [7].

Za postizanje određenih svojstava metalnih površina poput visoke čvrstoće, tvrdoće, sjaja ili električne vodljivosti, koriste se metalizirani premazi. Neki od metoda nanošenja ovih premaza su:

- vruće uranjanje
- proces galvanizacije
- vruće prskanje.

Tokom potapanja, odnosno uranjanja, na površini predmeta se formira spoj legure, koji se ohlađivanjem stvrdne u obliku rastopljene folije. Ovaj sloj obuhvaća površinu predmeta i sastoji se od istih elemenata kao i rastopljena folija. Također, tu se nalazi sloj legure između površinskog sloja i podloge, gdje se postotak osnovnog metala povećava kako se udaljava od površine predmeta. Taj sloj osigurava čvrsto prijanjanje prevlake na podlogu. Nastala legura često ima krhku strukturu, pa je poželjno da debljina prevlake bude što manja [7].

Proces galvanizacije predstavlja čest način primjene metalnih premaza na površine. Proces uključuje nanošenje slojeva metala, kompozita ili legura iz elektrolita ili taline pomoću električne struje. Primjenjuje se kako na metale, tako i na nemetale. Postupci variraju u jednoslojnim i višeslojnim premazima. Često se koristi za prevlačenje čelika, bakra, cinka,

aluminija i njihovih legura. Pojedini postupci uključuju kositrenje, pobakrivanje, posrebrivanje, niklanje, kromiranje, pocinčavanje, kadmiranje, poolovljavanje i pozlaćivanje. Cilj ovog procesa je poboljšanje površinskih karakteristika materijala, uključujući otpornost na koroziju, kemijsku inertnost, veće dimenzije, otpornost na trošenje, električnu vodljivost, lemljivost, magnetizam, smanjenje trenja i estetski izgled. Postupak se temelji na katodnoj redukciji metalnih iona iz elektrolita pomoću električne struje. Obično uključuje potapanje materijala u elektrolit i povezivanje s katodom, dok se anoda uranja u elektrolit kako bi zatvorila strujni krug [17].

Prilikom izvedbe postupka vrućeg prskanja, kod metalnih prevlaka, rastaljeni metal se dovodi u uređaj za raspršivanje i nanosi se na površinu koja je prethodno zagrijana. Ovaj postupak obično se koristi za zaštitu posuda i limova. Debljina prevlake tijekom ovog postupka varira od 0,3 do 1,2 mm, ali može se postići veća debljina primjenom više slojeva [7].

Prema različitim tehnikama, anorganske prevlake mogu se aplicirati putem fizičkih ili kemijskih postupaka.

Ključni pristup mehaničkom stvaranju anorganskih prevlaka je emajliranje. Stakleni prah se pretvara u čvrst sloj putem pečenja. Slabost emajliranja je krhkost prevlake [7].

Kod kemijskog stvaranja anorganskih premaza, osnovni metal reagira kako bi se formirao sloj premaza. To osigurava čvrsto prianjanje na površinu [7].

Oksidni slojevi se primjenjuju na čelik, bakar, aluminijum i njihove legure. Eloksiranje stvara oksidni sloj na aluminiju, dok se bruniranje koristi za formiranje crnog oksidnog sloja na čeličnoj površini. Brunirani slojevi su porozni [7].

Kada se nanose organski premazi, koriste se različite metode kao što su nanošenje premaza, gumiranje, bitumenizacija, nanošenje plastičnih masa i slično. Premazi se obično nanose valjcima, četkama, uranjanjem, hidrauličkim pritiskom ili prskanjem komprimiranim zrakom. Nakon nanošenja, slojevi se suše isparavanjem ili kemijskim procesima. Debljina zaštitnog filma može iznositi do 150  $\mu\text{m}$  [7].

Gumiranje podrazumeva nanošenje prirodnih ili sintetičkih guma u obliku folija i ploča na čistu metalnu površinu, koje se potom vulkaniziraju kako bi se poboljšale zaštitne karakteristike gume. Plastične mase se nanose na površinu metala kroz postupke omatanja, oblaganja, vrućeg prskanja, elektrostatskog nanošenja i fluidizacije. Ove prevlake sadrže punila i pigmente i mogu biti debljine od 0,1 do 5 mm [7].

Bitumenizacija koristi slojeve bituminoznih materijala (naftni bitumen) koji sadrže praškasta punila za zaštitu cjevovoda i druge namjene. Debljina ovih prevlaka obično iznosi 0,5 do 10 mm [7].

### **3.4 Elektrokemijske metode zaštite**

Elektrokemijska zaštita metala od korozije predstavlja jednu od najčešće primjenjivanih metoda zaštite konstrukcija izloženih agresivnoj okolini. Ova metoda se oslanja na katodnu i anodnu zaštitu kako bi se osiguralo pasivno stanje metala i smanjila šteta od korozije [18].

Katodna zaštita uključuje dva načina: zaštitu putem spajanja metala s negativnim polom izvora istosmerne struje ili kroz zaštitu žrtvovanom anodom, što dovodi do otapanja anode i katodne zaštite metala. Prednosti katodne zaštite su jednostavnost, rjetke kontrole, nezavisnost od izvora električne struje i minimalan uticaj na konstrukciju [18].

Anodna zaštita metala ima sličan princip kao katodna, ali koristi se za pasivizaciju čelika, inoksa, aluminijskih, kroma, titanija i njihovih legura. U praksi, anodna zaštita ima manju primjenu od katodne zaštite i najčešće se koristi za zaštitu čelika u sredinama s prevladavajućim kiselinama. Ovdje se razlikuje zaštita istosmjernom strujom – istosmjerna struja djeluje pasivizirajuće na metal te zaštita protektorom – zaštita se ostvaruje tako da se metal koji se želi zaštititi spaja s protektorom koji je u pravilu pozitivno nabijen [18].

Elektrokemijska zaštita metala često se primjenjuje u konstrukcijama koje su uronjene u vodu, kao što je na primjer kod pojedinih dijelova brodova koji su stalno potopljeni. Na tim dijelovima postavljaju se protektori koji zajedno s istosmjernom strujom štite metal od moguće korozije [18].

### **3.5 Uporaba korozivskih inhibitora**

Sustavi za sprječavanje korozije koriste različite spojeve kako bi usporili brzinu korozije u korozivnoj otopini. Ti spojevi su poznati kao antikorozivni agensi, odnosno inhibitori i koriste se u malim količinama. Antikorozivni agensi mogu biti organskog ili anorganskog podrijetla, a klasificiraju se prema svom djelovanju u anodne, katodne, mješovite i hlapive inhibitore. Većina antikorozivnih agenasa su organski spojevi koji sadrže fosfor, sumpor, dušik i kisik [11,19].

Anodni inhibitori služe za usporavanje ionizacije metala, katodni inhibitori smanjuju brzinu katodne reakcije, a mješoviti inhibitori utječu na obje reakcije. Hlapivi inhibitori koriste se kao zaštita od atmosferske korozije. Ovisno o mehanizmu djelovanja, antikorozivni agensi mogu stvarati barijeru između materijala i okoline ili smanjiti korozivni tok kroz smanjenje disocijacije iona [11,19].

## 4. EKSPERIMENTALNI DIO

Cilj eksperimentalnog dijela istraživanja u diplomskom radu je bio provjeriti kako različiti mediji (vodene otopine različitih koncentracija NaCl-a) utječu na brzinu korozivne reakcije niskolegiranih čelika. Da bi se bolje razumio taj proces, koristile su se elektrokemijske tehnike kao idealan način za ispitivanje korozije ovih materijala. Elektrokemijska metoda ispitivanja omogućuje visoku točnost u kratkom vremenskom razdoblju. Izvela su se 4 mjerenja kako bi se dobile krivulje električnog potencijala otvorenog strujnog kruga i Tafelove krivulje.

### 4.1 Odabrani materijal

51CrV4 je niskolegirani čelik koji pripada grupi čelika za poboljšavanje. Ima veću tvrdoću zbog prisutnosti vanadija, lako je toplinski obradljiv te je visoke čvrstoće. Također daje karakteristike s dobrom otpornošću na abraziju i habanje te ima veliku žilavost zbog čega se koristi za dijelove i element koji su izloženi udarcima te vibracijama. Pogodan je za kaljenje u ulju.

Svi uzorci od čelika 51CrV4 su toplinski obrađeni postupkom poboljšavanja, tako što su se prvo kalili, a zatim popuštali. Kaljenje je toplinska obrada kojom se ostvaruje stvrdnjavanje čelika, a taj proces obuhvaća zagrijavanje čelika u područje  $\gamma$ -faze ili austenita, te naknadno hlađenje brzinom kojom se značajan udio (idealno cijeli dio) austenita pretvara u martenzit. Kaljenje je obuhvaćalo zagrijavanje čelika na temperaturu austenitizacije od 850 °C, nakon čega je uslijedilo držanje na toj temperaturi. Ukupno vrijeme ugrijavanja (ugrijavanje + progrijavanje + držanje na temperaturi) je iznosilo 15 minuta. Hlađenje se odvijalo u ulju. Nakon postupka kaljenja uslijedilo je popuštanje, odnosno ponovno zagrijavanje kaljenih čeličnih ili željeznih predmeta na umjerenim temperaturama s ciljem stabilizacije svojstava, kontroliranja smanjenja unutarnjih napreznja i posljedično smanjenja krhkosti, čime se omogućuje predmetima da postignu stanje znatno povećane istezljivosti i žilavosti. Popuštanje se odvijalo na temperaturi od 600 °C te je trajalo jedan sat.

Kemijski sastav čelika 51CrV4 izmjeren je na spektrometru te je prikazan u tablici 4.1.

Tablica 4.1.: Kemijski sastav niskolegiranog čelika 51CrV4

Element	Udio u čeliku [%]
C	0,564
Si	0,299
Mn	0,865
P	0,0153
S	0,0162
Cr	1,15
V	0,139
Ni	0,0381
Mo	0,0176
Cu	0,026
Al	0,0306
Fe	96,8

Na temelju kemijskog sastava čelika, atomske mase i broja valentnih elektrona izračunava se ekvivalentna masa. U elektrokemijskim reakcijama, kao što su elektroliza ili elektrokemijska redukcija i oksidacija, ekvivalentna masa odnosi se na masu tvari koja sudjeluje u reakciji koja će donijeti ili prihvatiti jedan mol elektrona. To je važno za izračune struje, potencijala i drugih elektrokemijskih parametara.

Ekvivalentna masa se računa prema izrazu:

$$EW = \sum \frac{M \cdot f}{n} \quad (4.1)$$

U izrazu 4.1,  $M$  predstavlja atomsku masu u gramima,  $f$  udio kemijskog elementa u čeliku, a  $n$  broj valentnih elektrona. Na temelju tih parametara dobiva se ekvivalentna masa čelika 51CrV4 koja iznosi 27,714 grama. Gustoća čelika 51CrV4 iznosi 7,85 g/cm<sup>3</sup>.

Atomska masa i broj valentnih elektrona nalaze se u tablici 4.2.

Tablica 4.2.: Ostali podaci čelika 51CrV4 (atomska masa i broj valentnih elektrona)

	Atomska masa (g)	Valentni elektroni	Udio u čeliku [%]
C	12,01	4	0,564
Si	28,088	4	0,299
Mn	54,938	4	0,865
P	30,974	5	0,0153
S	32,06	6	0,0162
Cr	51,996	3	1,15
V	50,94	5	0,139
Ni	58,693	2	0,0381
Mo	95,94	2	0,0176
Cu	63,546	2	0,026
Al	50,942	3	0,0306
Fe	55,845	2	96,8

#### 4.2 Postupak elektrokemijskog ispitivanja korozije

Prije započinjanja testiranja, uzorci su prošli temeljno čišćenje i obradu kako bi se postigla ravna i glatka površina. Za poliranje su korištena tri različita tipa brusnih papira, označena kao P320, P600 i P800. Označavanje ovih papira s P i brojevima pruža informacije o njihovoj znatoj teksturi, gdje veći broj odgovara finijoj teksturi koja rezultira glađom površinom. Nakon što je uzorak potpuno poliran, potrebno ga je pažljivo očistiti alkoholom.

Slika 4.1. prikazuje upotrebljene brusne papire.





*Slika 4.1.: Korišteni brusni papiri za postizanje glatke površine uzorka*

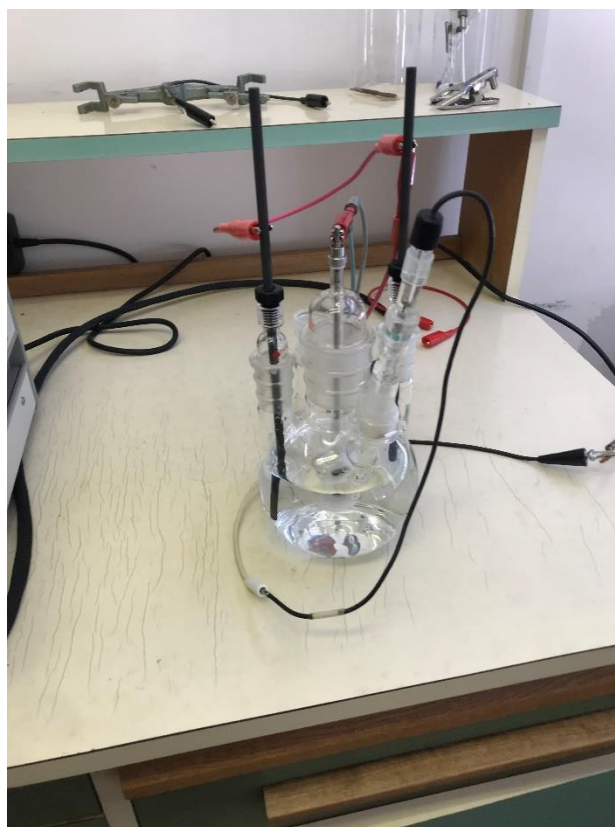
Nakon provedenih prethodnih koraka, primjerak je spreman za analizu. No, prije samog ispitivanja potrebno je pripremiti otopinu. U eksperimentalnom postupku, koristile su se tri različite otopine NaCl u destiliranoj vodi, s koncentracijama od 1%, 3,5 % i 5 % te vodovoda voda. Za pripremu 1 %-tne otopine NaCl, otopljeno je 7,5 g NaCl-a u 0,75 l destilirane vode, za dobivanje 3,5 %-tne otopine otopljeno je 26,25 g NaCl-a u istoj količini destilirane vode, dok je za dobivanje 5 %-tne otopine otopljeno je 37,5 g NaCl-a u 0,75 l destilirane vode. Za vodovodnu vodu se izmjerila količina od 0,75 l vode iz špine. Za mjerenje mase natrijevog klorida korištena je vaga Mettler Toledo NewClassic MF JP703C koja je prikazana na slici 4.2.



*Slika 4.2.: Vaga Mettler Toledo NewClassic MF JP703C*

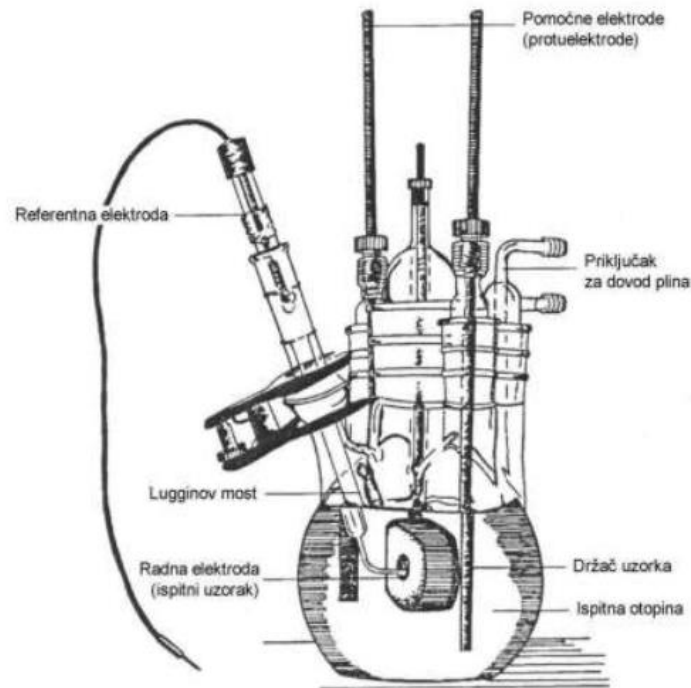
Tijekom eksperimenta, koristili su se različiti uređaji i oprema. To uključuje računalo s posebnim programima (PowerSuite, PowerCorr), potencijostat s troelektrodnim sustavom (PARSTAT 2263) i peterogrlenu ispitnu ćeliju s radnom, referentnom i pomoćnim elektrodama.

Slika 4.3. prikazuje peterogrlenu ispitnu ćeliju.



*Slika 4.3.: Peteroglenna ispitna ćelija*

Peteroglenna ćelija sadrži radnu elektrodu, referente elektrode i protuelektrodu. Radna elektroda predstavlja uzorak, oblika valjka određenog promjera pri čemu taj promjer odgovara veličini držača same elektrode. Površina koja je izložena elektrolitu iznosi  $1 \text{ cm}^2$ . Referentna elektroda čiji je potencijal poznat ne sudjeluje u strujnom krugu već njezina funkcija se ogleda u mjerenju potencijala radne elektrode. Zasićena kalomel elektroda se uglavnom primjenjuje u laboratorijskim uvjetima koja je u odnosu na vodikovu elektrodu standardnog elektrodnog potencijala  $+0,242 \text{ V}$ . Zasićena kalomel elektroda u ispitni elektrolit nije direktno uronjena već se radnoj elektrodi približava pomoću Lugginovog mosta. Protuelektroda je vodič sa funkcijom zatvaranja strujnog kruga, materijal od kojeg se izrađuje mora biti postojan te mora imati dobru vodljivost. Na slici 4.4. su prikazani svi dijelovi elektrokemijske ćelije.



Slika 4.4.: Elektrokemijska ćelija za ispitivanje korozijskog djelovanja

Program PowerSuite omogućava određivanje potencijala radne elektrode pomoću specifičnih postavki. Prvo, odabire se ispitivanje u otvorenom krugu, analizira se elektrokemijska korozija kroz vrijeme. Unose se podaci o gustoći i ekvivalentnoj masi materijala uzorka. Sustav metal - elektrolit se prije početka mjerenja treba stabilizirati. To podrazumijeva da nakon što se metal uroni u elektrolit, električni krug između protuelektrode i radne elektrode ostaje otvoren pri čemu se razlika potencijala između radne i referentne elektrode prati kao funkcija vremena. Nakon određenog vremenskog perioda krivulja formira stacionarno stanje koje se poklapa sa vrijednošću potencijala otvorenog strujnog kruga  $E_{oc}$ . Vremenska promjena vrijednosti potencijala pruža podatak o korozijskom ponašanju materijala u elektrolitu ovisno o materijalu koji je podvrgnut ispitivanju. Nestabilnost materijala praćena padom elektrodnog potencijala je posljedica korozijskog djelovanja.

Prije samog ispitivanja, bira se trajanje od 3600 s, odnosno 1 h, pri čemu će očitavanja na dijagramu biti svake 2 sekunde.

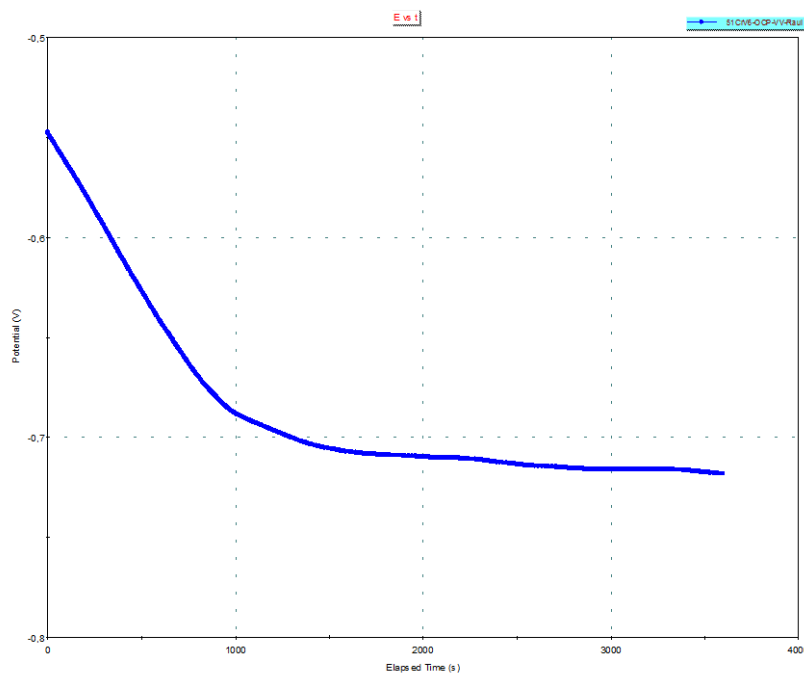
Za kasnija polarizacijska ispitivanja potrebno je znati potencijal otvorenog strujnog kruga. Također, za Tafelovu krivulju, prvo se koristi slična tehnika kao kod ispitivanja potencijala radne elektrode. Nakon toga, postavljaju se granice potencijala i unose svi potrebni podaci, te se dobije grafički prikaz u obliku polulogaritamске krivulje ( $E-\log j$ ).

Radna elektroda metodom Tafelove ekstrapolacije polarizira u području potencijala  $E_{oc} = \pm 250$  mV pri čemu se analiziraju anodna i katodna krivulja polarizacije metala u elektrolitu. Katodna krivulja predstavlja redukciju dok anodna predstavlja oksidaciju. Oksidacijom anoda predaje elektrone dok katoda prima elektrone te pri tome postaje električni negativnija. Nakon što su ispitivanjem snimljene katodna i anodna krivulja, pravci se ekstrapoliraju na temelju Butler - Valmerove jednadžbe, koja predstavlja temeljnu jednadžbu elektrokemijske kinetike koja daje ovisnost gustoće struje o potencijalu elektrode.

### 4.3 Rezultati ispitivanja

#### 4.3.1 Prvi uzorak (vodovodna voda)

Ispitivanjem električnog potencijala otvorenog strujnog kruga pomoću softvera PowerSuite, dobivena je slika 4.5. koja prikazuje krivulju potencijala uzorka u vodovodnoj vodi.

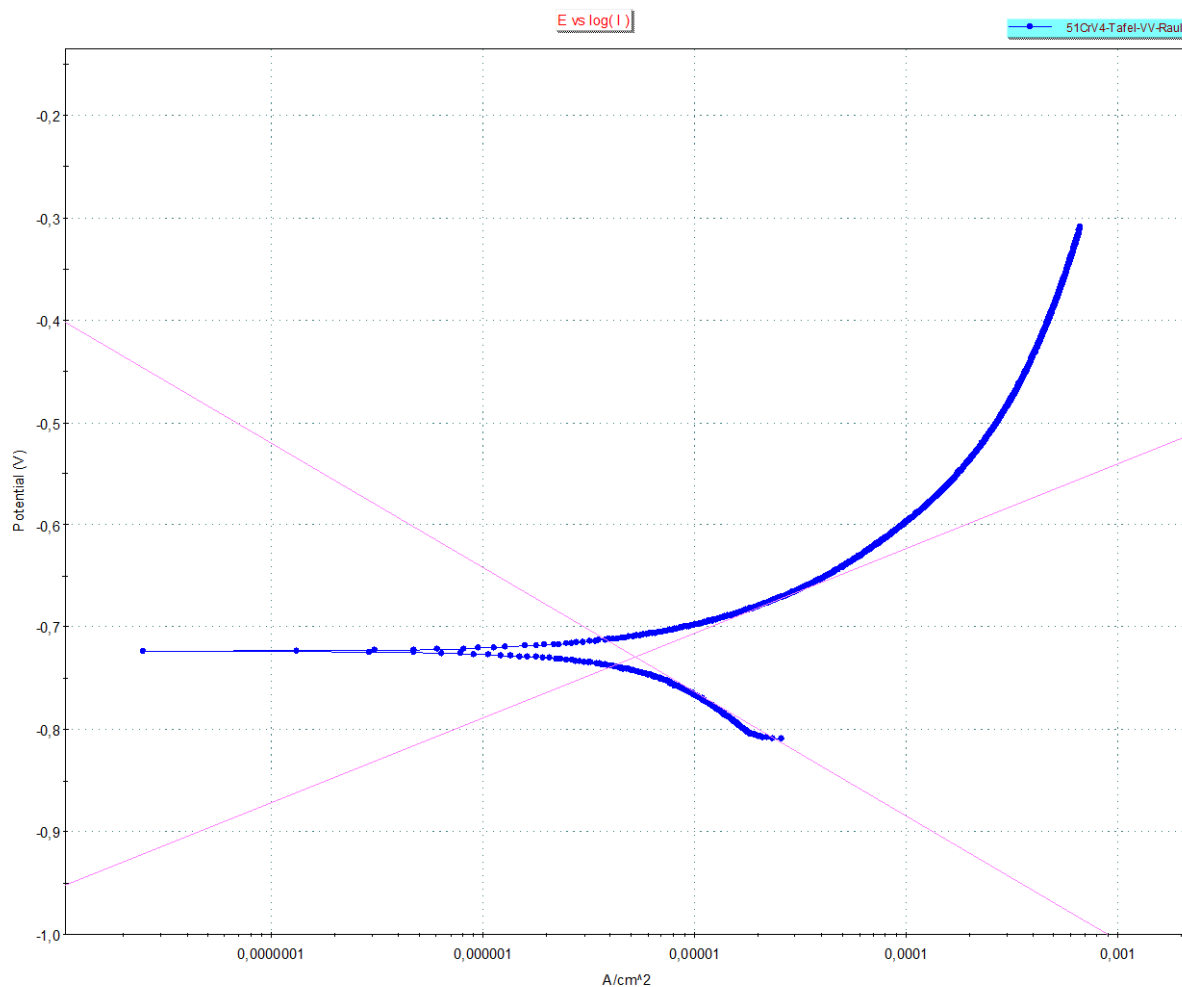


*Slika 4.5.: Varijacija električnog potencijala otvorenog strujnog kruga u odnosu na vremenski period (vodovodna voda)*

Promjene tijekom vremena u električnom potencijalu otvorenog strujnog kruga pružaju uvid u ponašanje uzorka tijekom korozije u ispitivanom mediju i upućuju na nestabilnost uzorka U1 te njegovu podložnost koroziji. Početni električni potencijal od -0,548 V ubrzano pada na -

0,677 V nakon 1000 s te nakon toga ima blagi pad do -0,72 V, što predstavlja ukupan apsolutni pad od 0,172 V tijekom ispitnog perioda.

Da bi se izračunala stopa korozije za uzorak u tom mediju, mora se odrediti vrijednost korozijske struje putem Tafelove krivulje te izračunati brzinu korozije pomoću gustoće i ekvivalentne mase materijala uzorka. Tafelova krivulja prvog uzorka može se vidjeti na slici 4.6.



Slika 4.6.: Tafelova krivulja za čelik 51CrV4 (vodovodna voda)

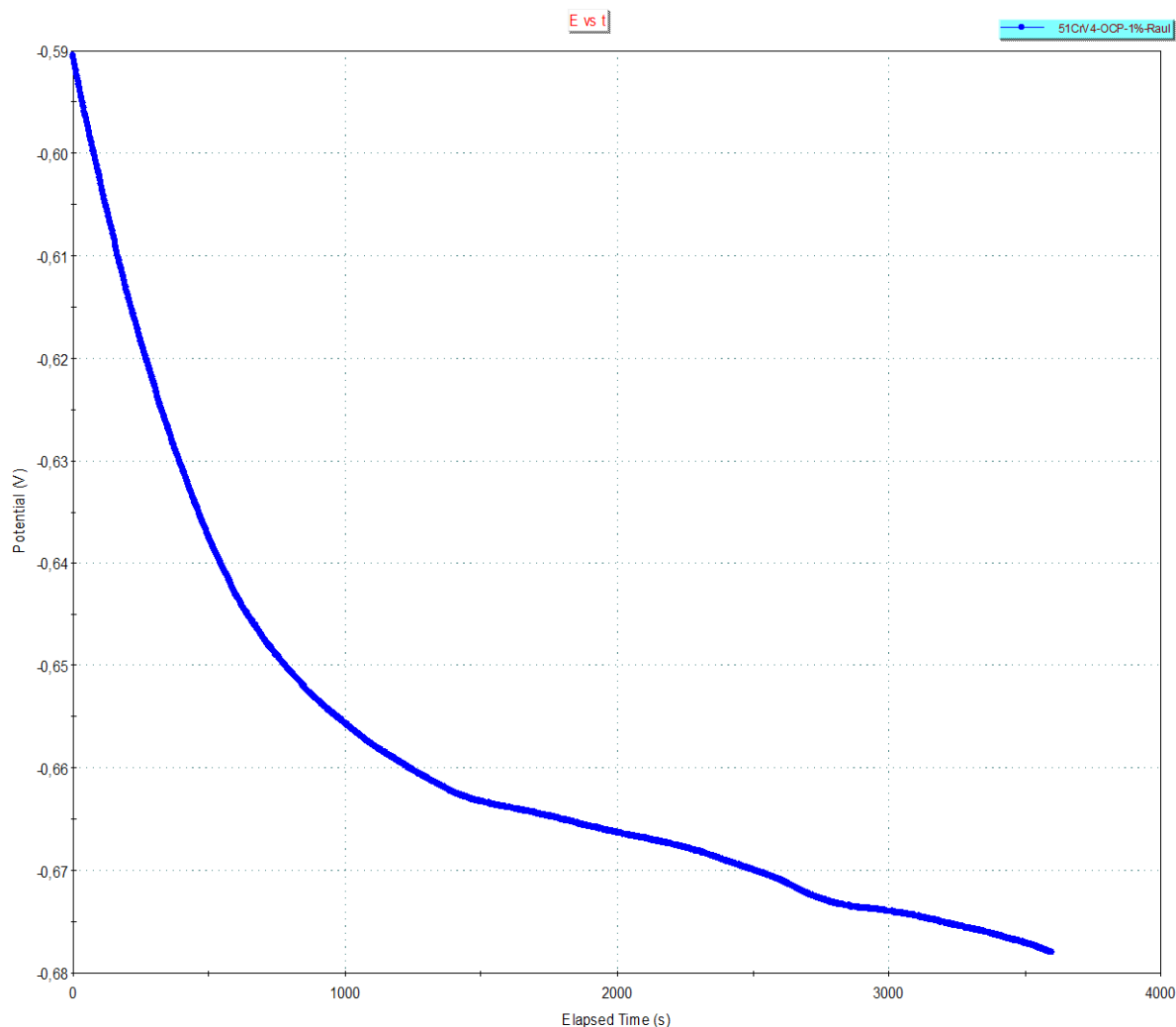
U tablici 4.3. prikazani su dobiveni podaci za materijal u vodovodnoj vodi.

Tablica 4.3.: Dobiveni podaci za materijal u vodovodnoj vodi

Korozijski potencijal [mV]	-729,456
Korozijska struja [ $\mu$ A]	5,242
Brzina korozije [mm/god]	0,0593

### 4.3.2 Drugi uzorak (1% NaCl)

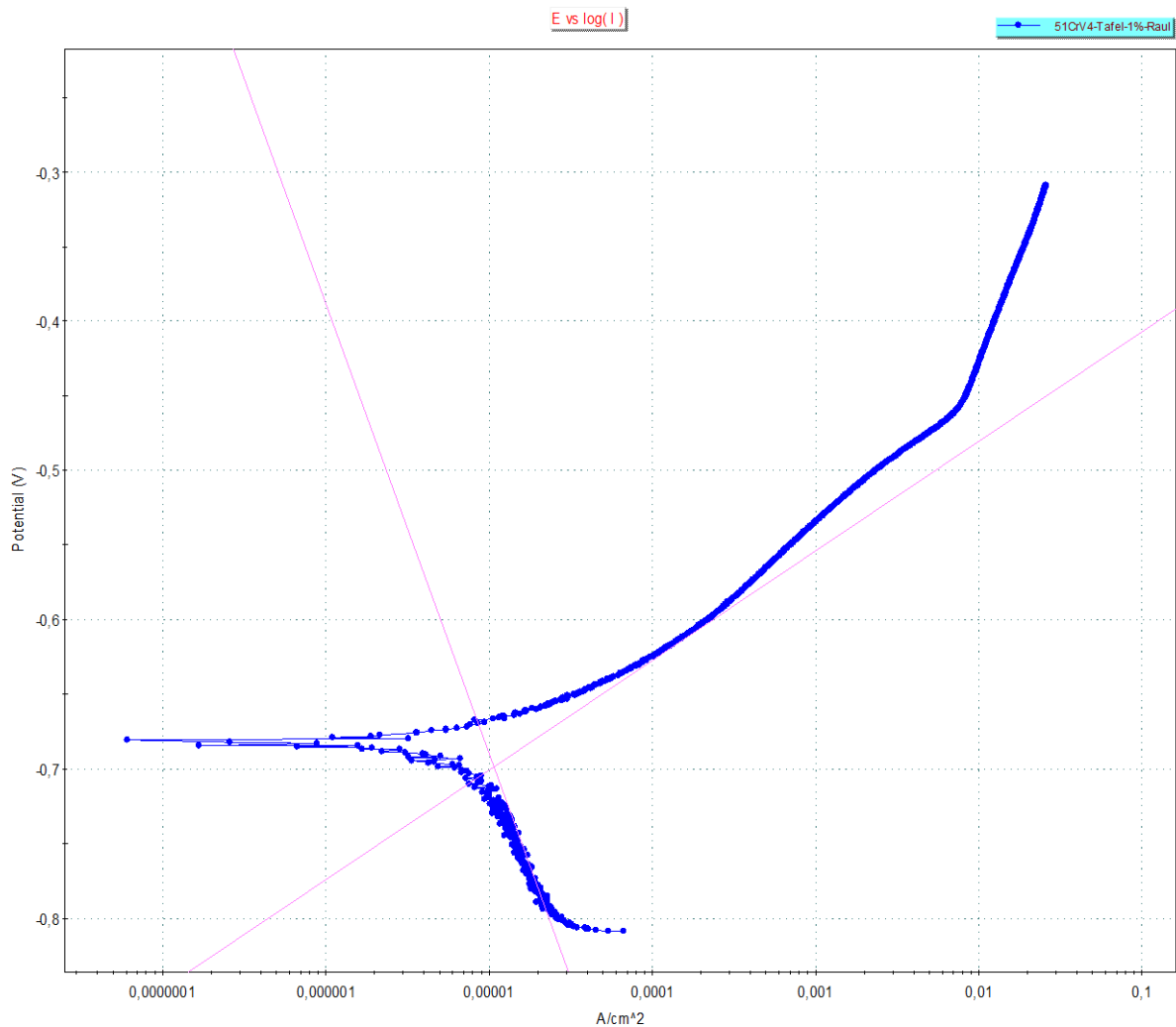
Slika 4.7 prikazuje krivulju potencijala otvorenog strujnog kruga za uzorak koji se nalazio u otopini NaCl-a s koncentracijom od 1% pri sobnoj temperaturi.



*Slika 4.7.: Varijacija električnog potencijala otvorenog strujnog kruga u odnosu na vremenski period (1% NaCl)*

Na slici 4.7. prikazani su rezultati za uzorak U2 koji se nalazio u 1%-tnoj otopini natrijeva klorida, koji pokazuju njegovu nestabilnost i prisutnost korozije. U početku, električni potencijal za uzorak U2 je negativan (-0,59 V) i brzo opada nakon prvih 14 minuta, nakon čega je prisutan nešto sporiji pad. Nakon ispitnog perioda električni potencijal iznosi -0,688 V, što što predstavlja ukupan apsolutni pad od 0,098 V.

Slika 4.8. prikazuje Tafelovu krivulju za uzorak koji se nalazio u 1%-tnoj otopini NaCl-a.



Slika 4.8.: Tafelova krivulja za čelik 51CrV4 (1%-tna otopina NaCl-a)

U tablici 4.4. prikazani su dobiveni podaci za materijal u 1%-tnoj otopini NaCl-a.

Tablica 4.4.: Dobiveni podaci za materijal u 1%-tnoj otopini NaCl-a

Korozijski potencijal [mV]	- 698,503
Korozijska struja [ $\mu$ A]	10,79
Brzina korozije [mm/god]	0,1253

#### 4.3.3 Treći uzorak (3,5 % NaCl)

Dobiveni rezultati mjerenja potencijala otvorenog strujnog kruga za uzorak niskolegiranog čelika u 3,5%-tnoj otopini na sobnoj temperaturi prikazani su na slici 4.9.

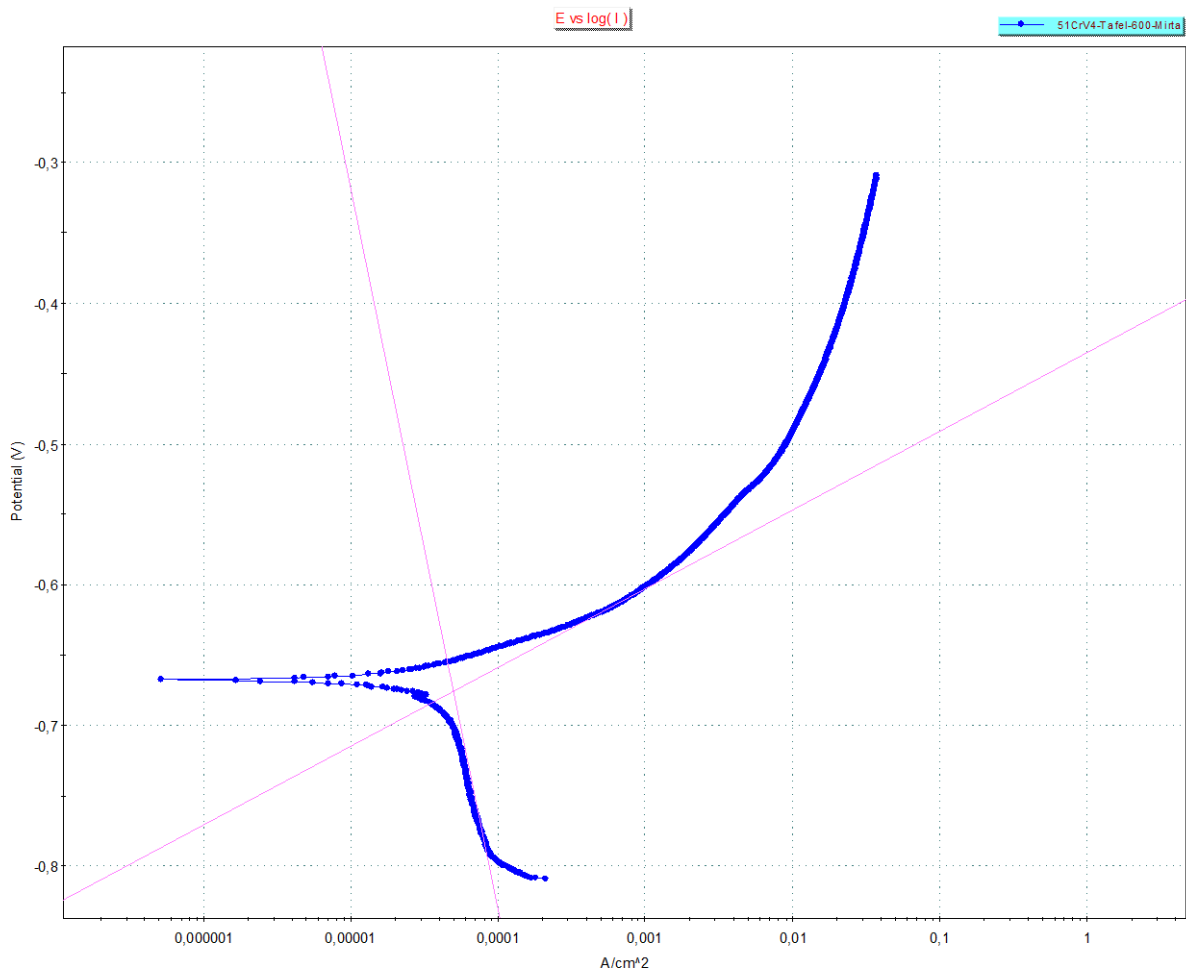




*Slika 4.9.: Varijacija električnog potencijala otvorenog strujnog kruga u odnosu na vremenski period (3,5% NaCl)*

Na slici 4.9. prikazani su rezultati za uzorak U3 koji se nalazio u 3,5%-tnoj otopini natrijeva klorida, koji pokazuju njegovu nestabilnost i prisutnost korozije. U početku, električni potencijal za uzorak U3 je negativan (-0,6575 V) i ubrzano pada prvih 10-tak minuta nakon čega dolazi do sporijeg pada. U periodu između 46. i 52. minute dolazi do blagog povećanja električnog potencijala nakon čega ponovno opada do -0,692 V. Tijekom cijelog ispitivanja ukupni pad potencijala je iznosio 0,0345 V.

Slika 4.10. prikazuje Tafelovu krivulju za uzorak koji se nalazio u 3,5%-tnoj otopini NaCl-a.



Slika 4.10.: Tafelova krivulja za čelik 51CrV4 (3,5%-tna otopina NaCl-a)

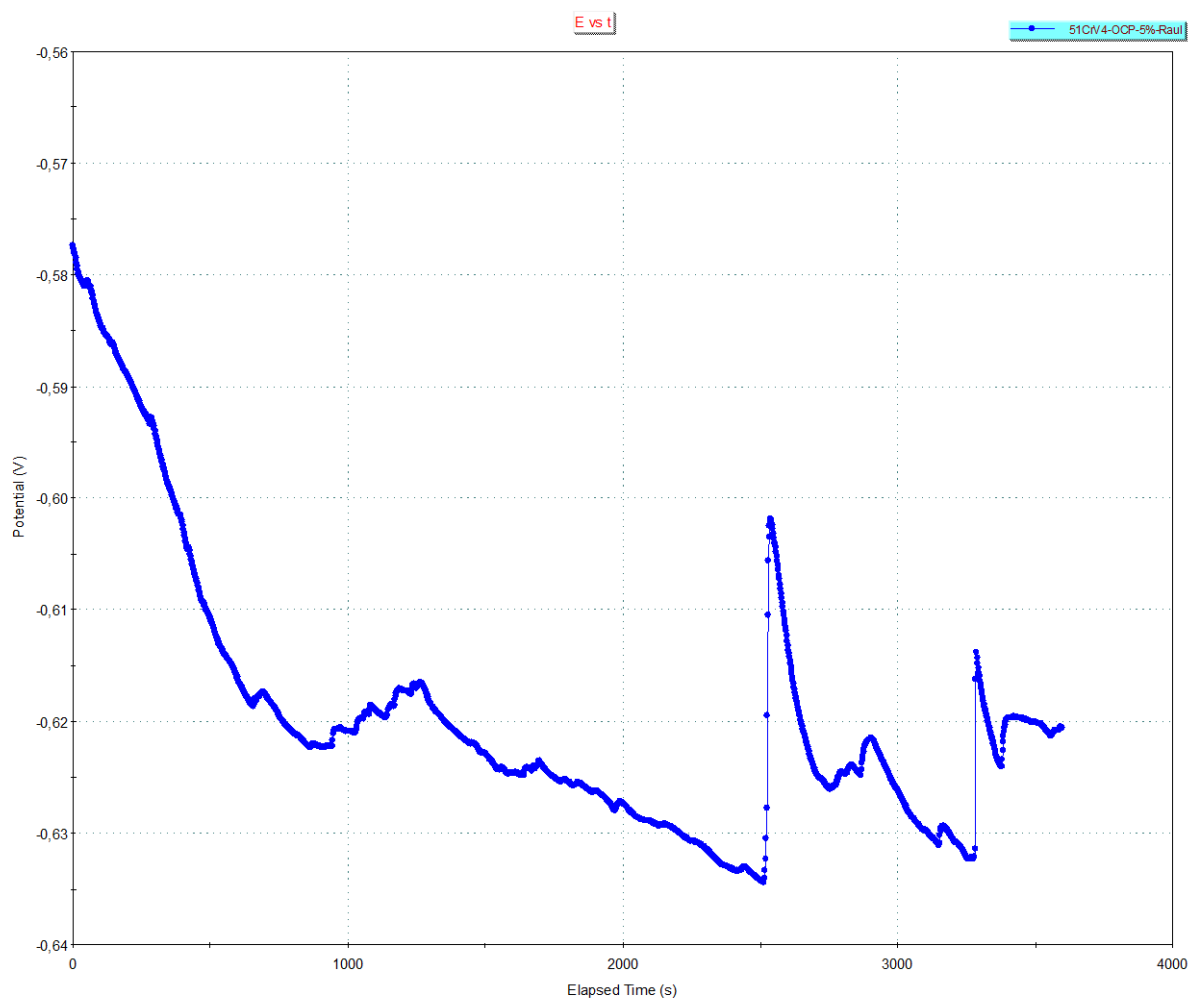
U tablici 4.5. prikazani su dobiveni podaci za materijal u 3,5%-tnoj otopini NaCl-a.

Tablica 4.5.: Dobiveni podaci za materijal u 3,5%-tnoj otopini NaCl-a

Korozijski potencijal [mV]	- 657,787
Korozijska struja [ $\mu$ A]	49,87
Brzina korozije [mm/god]	0,5793

#### 4.3.4 Četvrti uzorak (5 % NaCl)

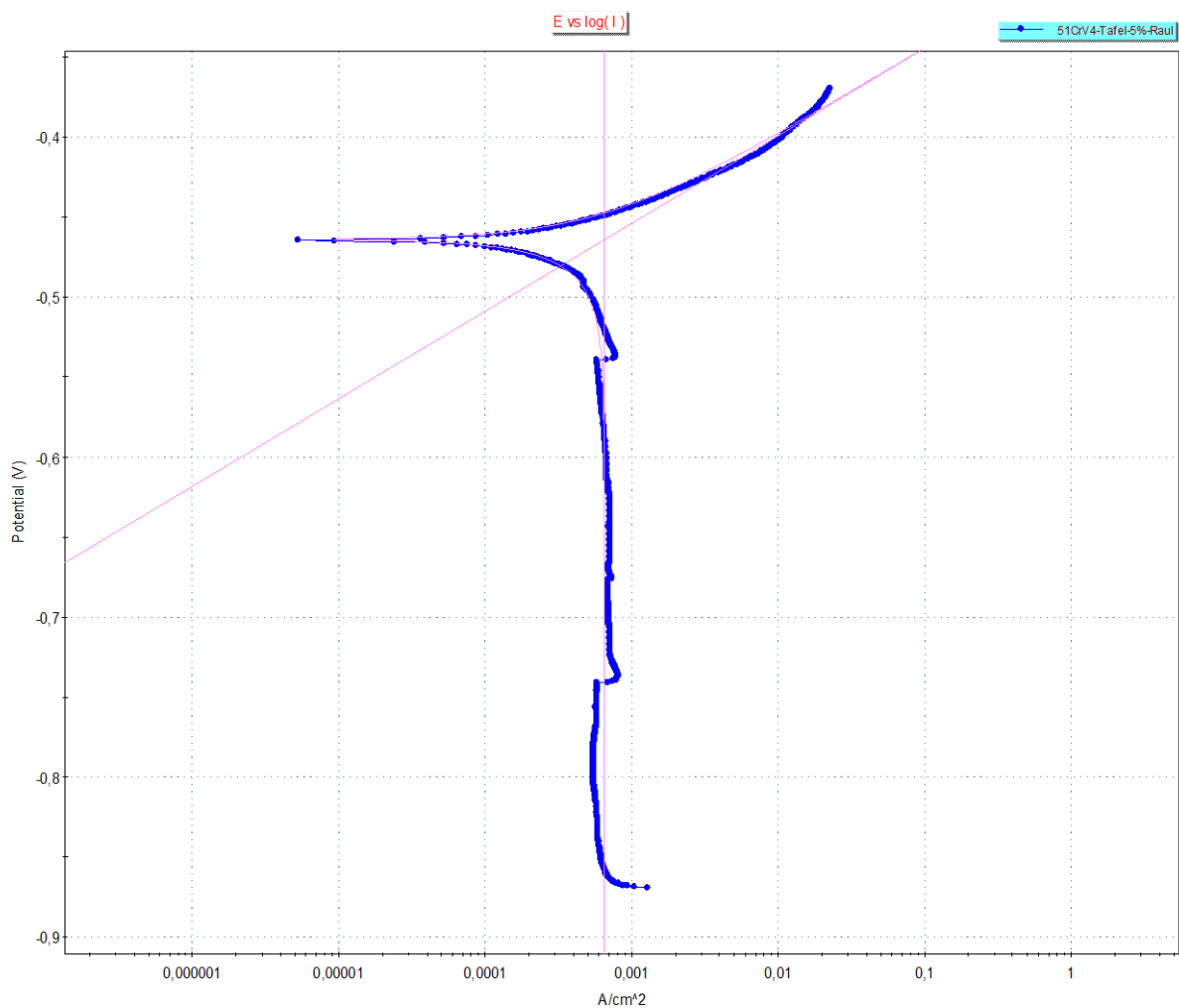
Krivulja potencijala otvorenog strujnog kruga za posljednji uzorak u 5%-tnoj otopini NaCl-a na sobnoj temperaturi prikazana je na slici 4.11.



*Slika 4.11.: Varijacija električnog potencijala otvorenog strujnog kruga u odnosu na vremenski period (5% NaCl)*

Na slici 4.11. prikazani su rezultati za uzorak U4 koji se nalazio u 5%-tnoj otopini natrijeva klorida, koji pokazuju njegovu nestabilnost i prisutnost korozije. U početku, električni potencijal za uzorak U4 je negativan (-0,577 V) te strmovito opada u prvih 10-tak minuta, nakon čega kreće neravnomjeran rast i pad električnog potencijala. Nakon ispitanog perioda električni potencijal iznosi -0,621 V, što što predstavlja ukupan apsolutni pad od 0,044 V.

Slika 4.12. prikazuje Tafelovu krivulju za uzorak koji se nalazio u 5%-tnoj otopini NaCl-a.



Slika 4.12.: Tafelova krivulja za čelik 51CrV4v (5%-tna otopina NaCl-a)

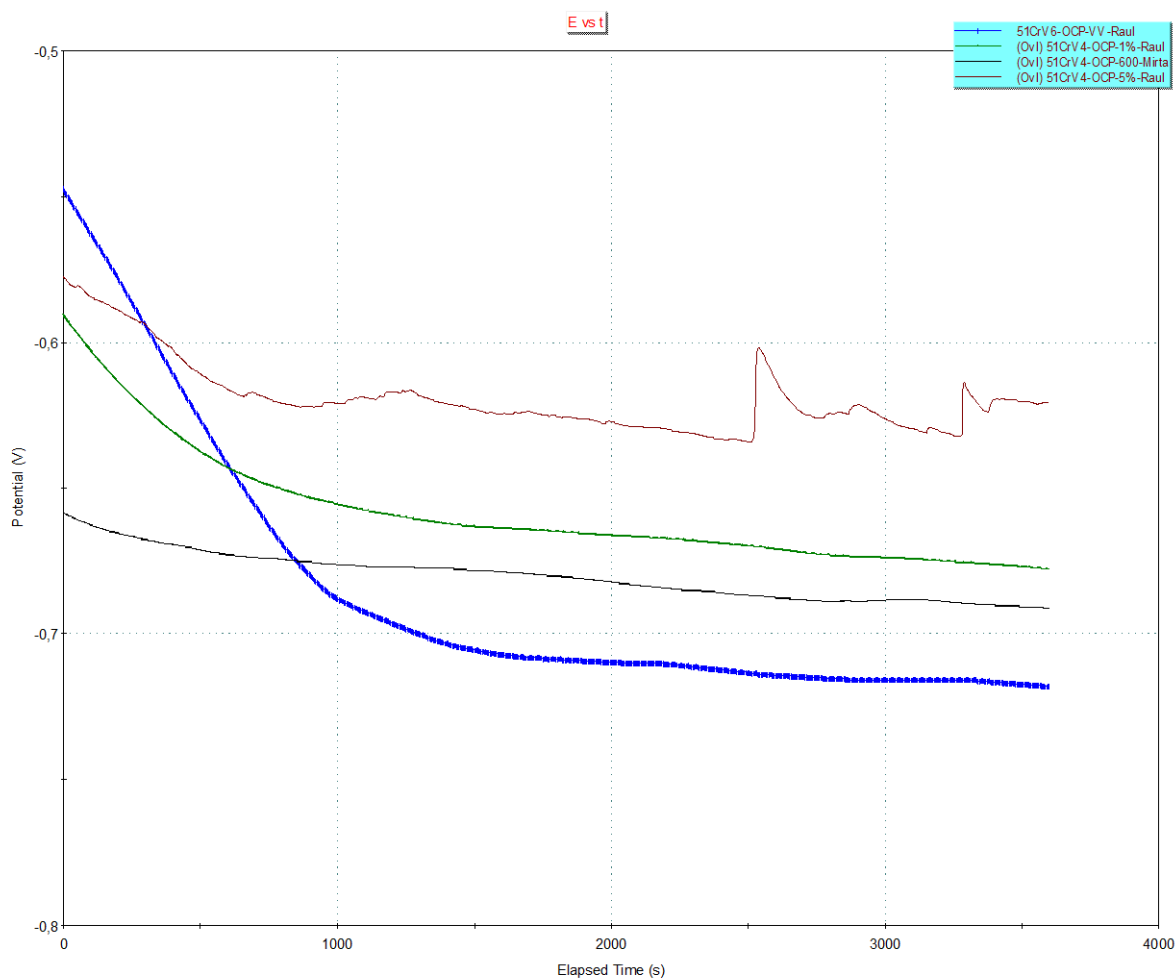
U tablici 4.6. prikazani su dobiveni podaci za materijal u 5%-tnoj otopini NaCl-a.

Tablica 4.6.: Dobiveni podaci za materijal u 5%-tnoj otopini NaCl-a

Korozijski potencijal [mV]	- 464,397
Korozijska struja [ $\mu$ A]	650,8
Brzina korozije [mm/god]	7,559

#### 4.3.5 Analiza dobivenih rezultata

U svrhu bolje usporedbe, kreiran je graf koji prikazuje sve četiri krivulje potencijala otvorenog strujnog kruga izvedenih mjerenja (slika 4.13). Svako mjerenje je označeno različitom bojom: plavom za mjerenje 1 (vodovodna voda), zelenom za mjerenje 2 (1% NaCl), crnom za mjerenje 3 (3,5% NaCl) i smeđom za mjerenje 4 (5% NaCl).

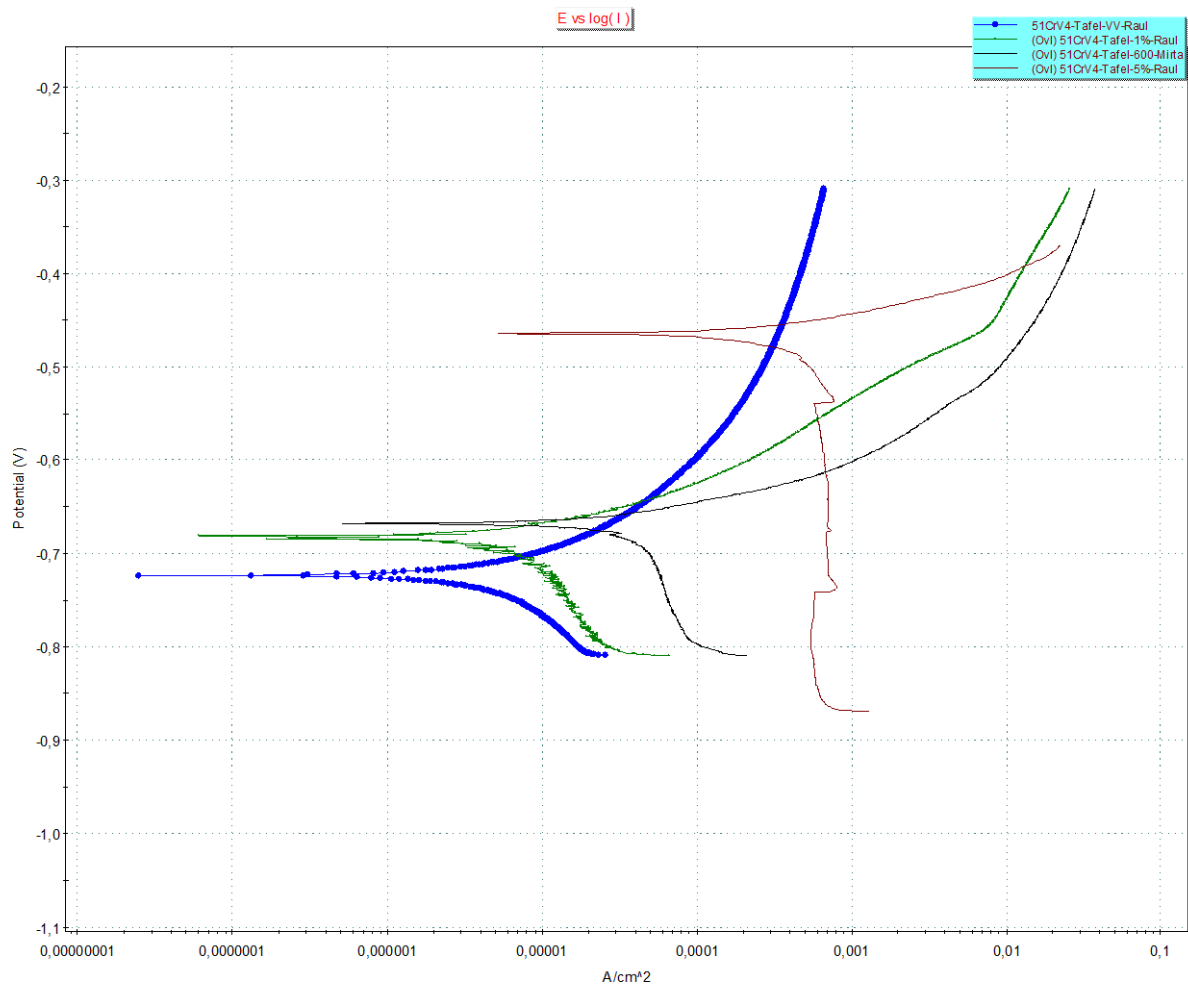


*Slika 4.13.: Varijacija električnog potencijala otvorenog strujnog kruga u odnosu na vremenski period za sve uzorke*

Sa priložene slike je vidljivo kako najveći ukupni pad potencijala otvorenog strujnog kruga se postiže kod prvog mjerenja, odnosno kod uzorka koji je bio uronjen u vodovodnu vodu. Kod tog uzorka se da primjetiti najstrmiji pad u prvih 15 minuta nakon čega dolazi do smirivanja i gotovo konstantne vrijednosti potencijala do kraja mjerenja. Treći uzoraka, odnosno onaj koji je bio uronjen u 3,5%-tnu otopinu NaCl-a pokazuje najmanji pad ukupnog potencijala otvorenog strujnog kruga pošto je njegova krivulja najpoloženiya, najlinearnija. Kod uzorka uronjenog u 5%-tnu otopinu NaCl-a se primjeti neravnomjeran pad, odnosno dolazi do nekontroliranog rasta i pada potencijala, što nije bio slučaj kod ostala 3 uzorka. Kako dolazi do negativnog pada potencijala strujnog kruga kod svih uzoraka, može se zaključiti da se korozija odvija u svim mjerenjima, neovisno o vrsti medija i postotku koncentracije.

U svrhu usporedbe, prikazane su Tafelove krivulje svih četiri mjerenja na slici 4.14. Sa slike se može vidjeti da je najveći korozijski potencijal kod uzorka koji je bio uronjen u 5%-tnu otopinu

natrijeva klorida, a najmanji kod uzorka koji je bio uronjen u vodovodnu vodu. Korozijska struja je najmanja kod prvog mjerenja (vodovodna voda) te dalje raste kako se povećava i koncentracija NaCl-a. Najveća izmjerena korozijska struja je bila kod uzorka uronjenog u 5%-tnu otopinu NaCl-a. Također, isti slučaj je i kod brzine korozije, ona je najmanja kod prvog mjerenja (vodovodna voda) te dalje raste kako raste i koncentracija NaCl-a.



Slika 4.14.: Tafelove krivulje za sve uzorke

U tablici 4.7. nalazi se sažetak dobivenih rezultata ispitivanja.

*Tablica 4.7.: Usporedba rezultata svih mjerenja tijekom ispitivanja*

Mjerenja/ Oznake uzorka	Medij (koncentracija)	Korozijski potencijal [mV]	Korozijska struja [ $\mu$ A]	Brzina korozije [mm/god]
U1	Vodovodna voda	-729,456	5,242	0,0593
U2	1% NaCl	-698,503	10,79	0,1253
U3	3,5% NaCl	-657,787	49,87	0,5793
U4	5% NaCl	-464,397	650,8	7,559

## 5. ZAKLJUČAK

Korozija je prirodni proces oštećenja i propadanja materijala, najčešće metala, zbog reakcije s okolišem. To se događa kada materijal dolazi u kontakt s agresivnim tvarima kao što su vlaga, kiseline, soli ili plinovi. Korozija može uzrokovati smanjenje čvrstoće i trajnosti materijala te može dovesti do gubitka funkcionalnosti i estetskih svojstava objekata i konstrukcija.

Korozija može biti podijeljena na kemijsku i elektrokemijsku, na temelju mehanizma djelovanja. Elektrokemijska korozija javlja se u elektrolitima koji ne provode električnu struju, dok kemijska korozija nastaje u neelektrolitima. Također korozijski procesi se mogu podijeliti i prema obliku razaranja, prema vrsti medija i na posebne oblike.

Svojstva materijala koji korodira igraju važnu ulogu u koroziji kao unutarnji čimbenici. S druge strane, okolina ili medij u kojem se materijal nalazi predstavljaju vanjske čimbenike korozije. Zaštita materijala od korozije može se postići smanjenjem pokretačke sile korozije ili povećanjem otpornosti na koroziju. Promjene u unutarnjim i vanjskim čimbenicima oštećenja te izolacija materijala od medija mogu pomoći u povećanju otpornosti na koroziju.

Eksperimentalni dio rada obuhvaća ispitivanje uzoraka niskolegiranog čelika 51CrV4 koji je prethodno toplinski obrađen kaljenjem i popuštanjem na 600 °C, u otopinama NaCl-a različitih koncentracija te u vodovodnoj vodi. Elektrokemijske analize provedene su uz pomoć specijalizirane opreme, uključujući potencijostat, peterogrlenu ispitnu ćeliju te odgovarajuće računalne programe.

Rezultati istraživanja ukazuju da medij ima značajan utjecaj na elektrokemijsku koroziju materijala. Otkriveno je da korozijski potencijal i struja variraju s različitim medijima i koncentracijom otopine NaCl-a, što ukazuje na važnost okoline u kojoj se materijal nalazi.

Najveći ukupni pad potencijala otvorenog strujnog kruga se postiže kod prvog mjerenja, odnosno kod uzorka koji je bio uronjen u vodovodnu vodu. Treći uzorak, odnosno onaj koji je bio uronjen u 3,5%-tnu otopinu NaCl-a pokazuje najmanji pad ukupnog potencijala otvorenog strujnog kruga. Najveći korozijski potencijal je kod uzorka koji je bio uronjen u 5%-tnu otopinu natrijeva klorida, a najmanji kod uzorka koji je bio uronjen u vodovodnu vodu. Korozijska struja je najmanja kod prvog mjerenja (vodovodna voda) te dalje raste kako se povećava i koncentracija NaCl-a. Najveća izmjerena korozijska struja je bila kod uzorka uronjenog u 5%-tnu otopinu NaCl-a. Također, isti slučaj je i kod brzine korozije, ona je najmanja kod prvog mjerenja (vodovodna voda) te dalje raste kako raste i koncentracija NaCl-a.



S obzirom na dobivene rezultate, važno je napomenuti da korozijsko ponašanje niskolegiranog čelika ovisi o interakciji između materijala i okoline u kojoj se nalazi. Stoga, pravilna analiza utjecaja medija na korozijsko ponašanje niskolegiranog čelika može doprinijeti boljem razumijevanju i predviđanju ponašanja materijala u stvarnim uvjetima.

U konačnici, rezultati ovog istraživanja imaju praktičnu primjenu u različitim industrijama, posebno u onima gdje se koristi niskolegirani čelik izložen korozivnim uvjetima. Razumijevanje utjecaja medija na korozijsko ponašanje niskolegiranog čelika omogućuje donošenje boljih odluka u odabiru materijala te primjenu preventivnih mjera kako bi se smanjila korozija i osigurala dugotrajnost konstrukcija i uređaja.

## LITERATURA

- [1] Total materia, Classification of Carbon and Low-Alloy Steels, s interneta, <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=62>
- [2] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Korozija>
- [3] S.S. Hanza: Materijali s predmeta „Zaštita materijala“, Tehnički fakultet u Rijeci
- [4] Vesna Alar; Kemijska postojanost metala, Zagreb, 2015.
- [5] Dino Koren; Osnove korozije i zaštita konstrukcije primjenom premaza, Varaždin, 2016.
- [6] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=33255>
- [7] Vesna Alar, Vinko Šimunović, Ivan Juraga, Teorijske osnove korozijskih procesa i metode zaštite, Zagreb, 2011
- [8] Hesham T.M. Abdel-Fatah, Medhat M. Kamel, Aliaa A.M. Hassan, „Adsorption and inhibitive properties of Tryptophan on low alloy steel corrosion in acidic media“, Arabian Journal of Chemistry, Volume 10, Supplement 1, February 2017
- [9] Matija Horvatek, Pasivacija korozijski postojanih čelika, Varaždin, 2019.
- [10] Igor Andrić, Korozija i zaštita od korozije poljoprivredne tehnike, Osijek, 2017.
- [11] Ivan Juraga, Vesna Alar, Vinko Šimunović i dr. „Korozija i metode zaštite od korozije“, s interneta, 31.7.2023.
- [12] Filetin, T.; Kovačićek, F.; Indof, J., Svojstva i primena materijala, Zagreb, 2002.
- [13] David Belošević, Utjecaj temperature na korozijsko ponašanje niskolegirano čelika, Rijeka, 2022.
- [14] Korozijska svojstva, s interneta, [https://www.pfri.uniri.hr/web/dokumenti/uploads\\_nastava/20180308\\_093522\\_sakan\\_2.Korozijska.svojstva.pojedinih.tehnickih.materijala.pdf](https://www.pfri.uniri.hr/web/dokumenti/uploads_nastava/20180308_093522_sakan_2.Korozijska.svojstva.pojedinih.tehnickih.materijala.pdf) [1.8.2023]
- [15] G. Santarini, Corrosion behaviour of low alloy steels: from ancient past to far future, Commissariat à l'Energie Atomique, CEA-Saclay DEN/DPC, Bât 450, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France
- [16] <https://hrv.thehouseofchronic.com/3932478-corrosion-of-metals-the-process-of-their-destruction>
- [17] C. G. Munger, L. D. Vincent, Corrosion prevention by protective coatings, United States, 1999.
- [18] <https://www.laser-ing.hr/blog/elektrokemijska-zastita-metala/>

[19] Fatemeh Baghaei Ravaria, Athareh Dadgarinezhada, Iran Shekhshoaeib, „Studies on the Effect of Two Salen Schiff-bases on the Corrosion of low alloy Steel in 1M HCl“ , J. Chil. Chem. Soc., 55, No 3 (2010)

## POPIS SLIKA

Slika 2.1.: Korozijski ciklus [5] .....	4
Slika 2.2.: Podjela korozijskih procesa.....	5
Slika 2.3.: Wagnerova teorija kemijske korozije [3].....	7
Slika 2.4.: Promjena oksidnog sloja u odnosu na prolazno vrijeme i povećanje mase po površini [3].....	9
Slika 2.5.: Struktura oksidnih slojeva na površini čelika [4] .....	11
Slika 2.6.: Elektrokemijska korozija [3] .....	12
Slika 2.7.: Vrijednosti standardnih elektrodnih potencijala raznih metala [3] .....	14
Slika 2.8.: Polarizacijska krivulja [3] .....	15
Slika 2.9.: Krivulja potencijala otvorenog strujnog kruga [3] .....	16
Slika 2.10.: Tafelova krivulja [3] .....	17
Slika 2.11.: Gubitak materijala djelovanjem opće korozije [9] .....	18
Slika 2.12.: Rupičasta (pitting) korozija dijela osovine od nehrđajućeg čelika [10] .....	19
Slika 2.13.: Razni oblici oštećenja uslijed rupičaste korozije [3] .....	20
Slika 2.14.: Bubrenje čelika [3].....	20
Slika 2.15.: Eksfolijacija Al-legure u morskoj atmosferi [3].....	21
Slika 2.16.: Filiformna korozija [3].....	21
Slika 2.17.: Primjer oštećenja metala uslijed korozije u procjepu [3].....	22
Slika 2.18.: Galvanska (kontaktna, bimetalna) korozija [3] .....	23
Slika 2.19.: Decinkacija mjedi [3].....	23
Slika 2.20.: Primjer grafitizacije čelika [11].....	24
Slika 2.21.: Interkristalna korozija austenitnog čelika [3].....	25
Slika 2.22.: Bakterijska korozija cjevovoda pitke vode [3] .....	26
Slika 2.23.: Čimbenici koji utječu na pojavu napetosne korozije [12].....	27
Slika 2.24.: Lom vratila uslijed korozijskog zamora [3] .....	27
Slika 2.25.: Primjer oštećenja nastao tarnom korozijom [3].....	28
Slika 2.26.: Erozijska korozija bakrenog cjevovoda [3].....	28
Slika 2.27.: Oštećenje lopatice turbine kavitacijskom korozijom [3] .....	29
Slika 2.28.: Oštećenja uslijed djelovanja korozije lutajućih struja [3].....	29
Slika 4.1.: Korišteni brusni papiri za postizanje glatke površine uzorka .....	41
Slika 4.2.: Vaga Mettler Toledo NewClassic MF JP703C .....	42

Slika 4.3.: Peterogrlena ispitna ćelija .....	43
Slika 4.4.: Elektrokemijska ćelija za ispitivanje korozijskog djelovanja .....	44
Slika 4.5.: Varijacija električnog potencijala otvorenog strujnog kruga u odnosu na vremenski period (vodovodna voda) .....	45
Slika 4.6.: Tafelova krivulja za čelik 51CrV4 (vodovodna voda) .....	46
Slika 4.7.: Varijacija električnog potencijala otvorenog strujnog kruga u odnosu na vremenski period (1% NaCl).....	47
Slika 4.8.: Tafelova krivulja za čelik 51CrV4 (1%-tna otopina NaCl-a) .....	48
Slika 4.9.: Varijacija električnog potencijala otvorenog strujnog kruga u odnosu na vremenski period (3,5% NaCl).....	49
Slika 4.10.: Tafelova krivulja za čelik 51CrV4 (3,5%-tna otopina NaCl-a) .....	50
Slika 4.11.: Varijacija električnog potencijala otvorenog strujnog kruga u odnosu na vremenski period (5% NaCl).....	51
Slika 4.12.: Tafelova krivulja za čelik 51CrV4 (5%-tna otopina NaCl-a) .....	52
Slika 4.13.: Varijacija električnog potencijala otvorenog strujnog kruga u odnosu na vremenski period za sve uzorke .....	53
Slika 4.14.: Tafelove krivulje za sve uzorke.....	54

## POPIS TABLICA

Tablica 2.1.: Unutrašnji i vanjski čimbenici korozije.....	30
Tablica 4.1.: Kemijski sastav niskolegiranog čelika 51CrV4.....	39
Tablica 4.2.: Ostali podaci čelika 51CrV4 (atomska masa i broj valentnih elektrona).....	40
Tablica 4.3.: Dobiveni podaci za materijal u vodovodnoj vodi .....	46
Tablica 4.4.: Dobiveni podaci za materijal u 1%-tnoj otopini NaCl-a.....	48
Tablica 4.5.: Dobiveni podaci za materijal u 3,5%-tnoj otopini NaCl-a .....	50
Tablica 4.6.: Dobiveni podaci za materijal u 5%-tnoj otopini NaCl-a.....	52
Tablica 4.7.: Usporedba rezultata svih mjerenja tijekom ispitivanja .....	55

## POPIS OZNAKA

$\Delta m$  – gubitak mase ispitivanog metala [g]

A – anoda

C – ugljik

Cr – krom

Cu – bakar

$E^0$  - stacionarni potencijal metala [V]

$EW$  – ekvivalentna masa [g]

$f$  – udio u čeliku [%]

$Fe_2O_3$  – hematit

$Fe_3O_4$  - magnetit

$FeO$  – Wustit

$H_2S$  – sumporovodik

$I_{kor}$  - korozivna struja [A]

K – katoda

KP – korozivni produkt

$M$  – molarna masa [g]

Me – metal

Mn – mangan

Mo – molibden

$n$  – broj valentnih elektrona

$N_2$  – dušik

NaCl – natrij klorid

Ni – nikal

$O_2$  – kisik

$PB$  – Pilling Bedworthov omjer

$Q$  – oslobođena toplina [J]

$t$  – vrijeme izloženosti agresivnoj otopini [s]

$V$  – volumen [ $m^3$ ]

$x$  – broj atoma metala u korozivskom produktu

$y$  – broj atoma kisika u korozivskom produktu

$z$  – valencija metala

$\rho$  – gustoća [ $\text{kg/m}^3$ ]



## SAŽETAK

Diplomski rad "Analiza utjecaja medija na korozijsko ponašanje niskolegiranog čelika" istražuje mehanizme korozije niskolegiranog čelika u različitim okolinama. Rad se sastoji od teorijskog i eksperimentalnog dijela. Teorijski dio usredotočuje se na elektrokemijsku i kemijsku koroziju, identificira njihove osnovne razlike te proučava utjecaj medija na ponašanje materijala. Ovdje su još opisane i ostale podjele korozijskih procesa kao i adekvatne metode zaštite. Dodatno, rad analizira unutarnje i vanjske čimbenike koji utječu na koroziju niskolegiranog čelika. Promjene u unutarnjim svojstvima materijala te izolacija od agresivnih medija mogu povećati otpornost materijala na koroziju.

U eksperimentalnom dijelu se izvelo elektrokemijsko ispitivanje brzine korozije s obzirom na različiti medij. Kao ispitani uzorak koristio se čelik 51CrV4, koji se odlikuje visokom čvrstoćom, tvrdoćom, dobrom otpornošću na habanje i abraziju. Također ima veliku žilavost i lako je toplinski obradljiv.

Kod toplinske obrade, čelik se prvo kalio, a zatim se je popuštao na 600 °C. Eksperimentalno ispitivanje provedeno je u različitim otopinama NaCl-a kako bi se analizirao taj utjecaj. Koncentracija otopine NaCl-a pokazala se kao bitan čimbenik u korozijskom ponašanju niskolegiranog čelika. Uzorci uronjeni u višu koncentraciju otopine pokazali su povećanu brzinu korozije u usporedbi s uzorcima u nižoj koncentraciji, što može biti korisno u kontekstu odabira materijala za specifične okolišne uvjete kako bi se izbjegla prekomjerna korozija.

Ključne riječi: korozija, niskolegirani čelik, čimbenici korozije, metode zaštite od korozije, elektrokemijsko ispitivanje korozije, koncentracija NaCl-a, električni potencijal otvorenog strujnog kruga, Tafelova krivulja.

## SUMMARY

The master's thesis "Analysis of Media Influence on the Corrosion Behavior of Low-Alloy Steel" investigates the corrosion mechanisms of low-alloy steel in various environments. The thesis consists of a theoretical and experimental part. The theoretical section focuses on electrochemical and chemical corrosion, identifies their fundamental differences, and studies the influence of media on material behavior. It also describes other classifications of corrosion processes as well as appropriate protection methods. Additionally, the thesis analyzes internal and external factors that affect the corrosion of low-alloy steel. Changes in the material's internal properties and isolation from aggressive media can enhance material resistance to corrosion.

In the experimental section, electrochemical testing of corrosion rate was conducted considering different mediums. The steel 51CrV4 was used as the tested sample, known for its high strength, hardness, good resistance to wear and abrasion, as well as its high toughness and ease of heat treatment.

During the heat treatment, the steel was quenched first and then tempered at 600 °C. The experimental investigation was performed in various NaCl solutions to analyze this impact. The concentration of NaCl solution proved to be a significant factor in the corrosion behavior of low-alloy steel. Samples immersed in higher concentration solutions exhibited an increased corrosion rate compared to samples in lower concentration, which can be valuable in the context of material selection for specific environmental conditions to avoid excessive corrosion.

Keywords: corrosion, low-alloy steel, corrosion factors, corrosion protection methods, electrochemical corrosion testing, NaCl concentration, open circuit potential, Tafel curve.