

KOROZIJA I NJEN UTJECAJ NA DRUŠTVO

Begić, Anđelka

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split, Faculty of Chemistry and Technology / Sveučilište u Splitu, Kemijsko-tehnološki fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:167:981393>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-26**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of chemistry and technology - University of Split](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



SVEUČILIŠTE U SPLITU
KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET

KOROZIJA I NJEN UTJECAJ NA DRUŠTVO

ZAVRŠNI RAD

Anđelka Begić
Matični broj: 1399

Split, rujan 2023.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET
PRIJEDIPLOMSKI STUDIJ KEMIJSKE TEHNOLOGIJE
SMJER: KEMIJSKO INŽENJERSTVO

KOROZIJA I NJEN UTJECAJ NA DRUŠTVO

ZAVRŠNI RAD

ANĐELKA BEGIĆ

Matični broj: 1399

Split, rujan 2023.

UNIVERSITY OF SPLIT
FACULTY OF CHEMISTRY AND TECHNOLOGY
UNDERGRADUATE STUDY OF CHEMICAL TECHNOLOGY
STUDY ORIENTATION: CHEMICAL ENGINEERING

CORROSION AND ITS IMPACT ON SOCIETY

BACHELOR THESIS

ANĐELKA BEGIĆ

Parent number: 1399

Split, September 2023.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

ZAVRŠNI RAD

Sveučilište u Splitu

Kemijsko-tehnološki fakultet

Studij: Prijediplomski studij kemijske tehnologije, smjer: Kemijsko inženjerstvo

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Kemijsko inženjerstvo

Mentor: doc. dr. sc. Jelena Jakić

KOROZIJA I NJEN UTJECAJ NA DRUŠTVO

Andelka Begić, 1399

Sažetak: U ovom radu opisuju se osnovni koncepti korozije, podijeljeni prema vrstama korozivne sredine, mehanizmima djelovanja i obliku oštećenja. Pregledom literature opisani su oblici korozije, faze nastanka korozije i njene posljedice. Također, obrađeno je korozijsko ponašanje željeza, aluminija, čelika, bakra i njihovih legura obzirom da se najčešće i najviše koriste kao konstrukcijski materijali. Analizirao se utjecaj temperature, kisele kiše, vlažnost zraka i drugi klimatski čimbenici koji potiču koroziju. Korozijski procesi uzrokuju velike troškove te je tendencija smanjenje istih. Prikazani su faktori koji utječu na smanjenje i povećanje ukupnih troškova korozije, a koji variraju od industrije do industrije. Korozija se javlja kod svih inženjerskih materijala, okolini, životu ljudi stoga ima veliki utjecaj na društvo što je vidljivo iz navedenih primjera. U negativnom smislu, korozija za posljedicu ima razne katastrofe dok u pozitivnom može biti dekorativna na građevinama izloženim različitim atmosferskim uvjetima.

Ključne riječi: oblici korozije, ekonomski utjecaj, utjecaj na društvo, katastrofe

Rad sadrži: 47 stranica, 31 slika, 1 tablica, 23 literaturne reference

Jezik izvornika: hrvatski

Sastav Povjerenstva za ocjenu i obranu završnog rada:

- | | |
|------------------------------------------|-------------|
| 1. prof. dr. sc. Ladislav Vrsalović | predsjednik |
| 2. izv. prof. dr. sc. Mario Nikola Mužek | član |
| 3. doc. dr. sc. Jelena Jakić | mentor |

Datum obrane:

Rad je u tiskanom i elektroničkom (PDF) obliku pohranjen u Knjižnici Kemijsko-tehnološkog fakulteta u Splitu, Ruđera Boškovića 35, u javnoj internetskoj bazi Sveučilišne knjižnice u Splitu te u javnoj internetskoj bazi završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice.

BASIC DOCUMENTATION CARD

BACHELOR THESIS

University of Split

Faculty of Chemistry and Technology

Study: Undergraduate study of Chemical Technology, Orientation: Chemical Engineering

Scientific area: Technical sciences

Scientific field: Chemical engineering

Supervisor: Jelena Jakić, PhD, assistant professor

CORROSION AND ITS IMPACT ON SOCIETY

Andelka Begić, 1399

Abstract: This paper describes the basic concepts of corrosion, divided into types of corrosive environments, mechanisms of action, and forms of damage. A literature review describes the different forms of corrosion, the stages of corrosion formation and its consequences. The corrosion behavior of iron, aluminum, steel, copper, and their alloys is also discussed, as these materials are most commonly and extensively used as construction materials. The influence of temperature, acid rain, humidity and other climatic factors that promote corrosion has been analyzed. Corrosion processes cause high costs, and there is a tendency to reduce them. The factors affecting the reduction and increase of total corrosion costs are presented and vary from industry to industry. Corrosion is present in all engineering materials, in the environment and in people's lives, and therefore has a major impact on society, as shown by various examples. In a negative sense, corrosion leads to various disasters, while in a positive sense it can be decorative for buildings exposed to various atmospheric conditions.

Keywords: forms of corrosion, economic impact, impact on society, catastrophe

Thesis contains: 47 pages, 31 figures, 1 table, 23 references

Original in: Croatian

Defence committee for evaluation and defense of bachelor thesis:

- | | |
|------------------------------------------|--------------|
| 1. Ladislav Vrsalović, PhD, Full Prof. | chair person |
| 2. Mario Nikola Mužek, PhD, Assoc. Prof. | member |
| 3. Jelena Jakić, PhD, Asst. Prof | supervisor |

Defence date:

Printed and electronic (PDF) form of thesis is deposited in Library of Faculty of Chemistry and Technology in Split, Ruđera Boškovića 35, in the public library database of the University of Split Library and in the digital academic archives and repositories of the National and University Library.

Završni rad je izrađen u Zavodu za elektrokemiju i zaštitu materijala pod mentorstvom doc. dr. sc. Jelene Jakić, u razdoblju od svibnja do srpnja 2023. godine.

ZAHVALA

Posebnu zahvalnost želim uputiti svojoj mentorici, doc. dr. sc. Jeleni Jakić na neizmjernom strpljenju, vodstvu i beskrajnoj podršci tijekom izrade završnog rada. Vaši savjeti, izvanredna motivacija i snažan poticaj igrali su važnu ulogu u mom uspjehu.

Neizmjerno sam zahvalna svojim roditeljima, bratu i sestrama na iznimnoj podršci i razumijevanju tijekom mog prijediplomskog studija. Također, želim izraziti veliku zahvalnost svim prijateljima i kolegama s fakulteta koji su me ohrabivali i motivirali na ovom izazovnom putu. Vaša potpora bila je od presudnog značaja.

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

- Istražiti mehanizme i oblike kemijskog napada te faktore koji utječu na koroziju.
- Proučiti korozijska svojstva pojedinih tehničkih materijala kao što su aluminij, željezo, čelik, bakar i njihove legure.
- Osvrt na ekonomski aspekt korozijskih procesa.
- Proučiti utjecaj klimatskih promjena na trajnost materijala.
- Napraviti kratak pregled utjecaja korozije na društvo.

SAŽETAK

U ovom radu opisuju se osnovni koncepti korozije, podijeljeni prema vrstama korozivne sredine, mehanizmima djelovanja i obliku oštećenja. Pregledom literature opisani su oblici korozije, faze nastanka korozije i njene posljedice. Također, obrađeno je korozijsko ponašanje željeza, aluminijskog, čelika, bakra i njihovih legura obzirom da se najčešće i najviše koriste kao konstrukcijski materijali. Analizirao se utjecaj temperature, kisele kiše, vlažnost zraka i drugi klimatski čimbenici koji potiču koroziju. Korozijski procesi uzrokuju velike troškove te je tendencija smanjenje istih. Prikazani su faktori koji utječu na smanjenje i povećanje ukupnih troškova korozije, a koji variraju od industrije do industrije. Korozija se javlja kod svih inženjerskih materijala, okolini, životu ljudi stoga ima veliki utjecaj na društvo što je vidljivo iz navedenih primjera. U negativnom smislu, korozija za posljedicu ima razne katastrofe dok u pozitivnom može biti dekorativna na građevinama izloženim različitim atmosferskim uvjetima.

Ključne riječi: oblici korozije, ekonomski utjecaj, utjecaj na društvo, katastrofe.

ABSTRACT

This paper describes the basic concepts of corrosion, divided into types of corrosive environments, mechanisms of action, and forms of damage. A literature review describes the different forms of corrosion, the stages of corrosion formation and its consequences. The corrosion behavior of iron, aluminum, steel, copper, and their alloys is also discussed, as these materials are most commonly and extensively used as construction materials. The influence of temperature, acid rain, humidity and other climatic factors that promote corrosion has been analyzed. Corrosion processes cause high costs, and there is a tendency to reduce them. The factors affecting the reduction and increase of total corrosion costs are presented and vary from industry to industry. Corrosion is present in all engineering materials, in the environment and in people's lives, and therefore has a major impact on society, as shown by various examples. In a negative sense, corrosion leads to various disasters, while in a positive sense it can be decorative for buildings exposed to various atmospheric conditions.

Keywords: forms of corrosion, economic impact, impact on society, catastrophe

SADRŽAJ

UVOD	1
1. OPĆI DIO	3
1.1. OSNOVE KOROZIJE	4
1.1.1. Oblici korozije	5
1.1.2. Podjela korozije prema vrstama korozivnih sredina	7
1.1.2.1. Atmosferska korozija	7
1.1.2.2. Korozija u tlu	8
1.1.2.3. Korozija u suhim plinovima	8
1.1.2.4. Korozija u neelektrolitičkim i elektrolitnim tekućinama	8
1.1.2.5. Korozija zbog lutajućih struja	9
1.1.2.6. Biokorozija	9
1.1.3. Vrste korozije prema mehanizmu djelovanja	10
1.1.3.1. Kemijska korozija materijala	10
1.1.3.2. Elektrokemijska korozija materijala	10
1.1.4. Vrste korozije prema obliku oštećenja	14
1.1.4.1. Opća korozija	14
1.1.4.2. Lokalizirana korozija	15
1.1.4.2.1. Rupičasta korozija	16
1.1.4.2.2. Galvanska korozija	18
1.1.4.2.3. Erozijska - korozija	21
1.1.4.2.4. Korozija u procijepu	22
1.1.4.2.5. Eksfolijacija	23
1.1.4.2.6. Selektivna korozija	24
1.1.4.2.7. Interkristalna korozija	25
1.1.4.2.8. Napetosna korozija	26
1.1.4.2.9. Korozijski zamor	28
1.2. KOROZIJA MATERIJALA	29
1.2.1. Željezo	29
1.2.2. Čelik	30
1.2.3. Aluminij	31
1.2.4. Bakar	31

1.3. OVISNOST KOROZIJE O KLIMATSKIM UVJETIMA	33
1.4. EKONOMSKI ASPEKT KOROZIJSKIH PROCESA.....	34
1.5. UTJECAJ KOROZIJE NA DRUŠTVO.....	36
2. RASPRAVA	41
3. ZAKLJUČCI.....	43
4. LITERATURA	45

Većina metala i legura nestabilni su u Zemljinoj atmosferi i uvijek će biti osjetljivi na koroziju. Korozija je spontani proces koji predstavlja niz kemijskih i elektrokemijskih promjena tijekom kojeg metal prelazi iz elementarnog stanja u stabilne spojeve niže slobodne energije. Korozija metala ovisi o okolini kao i korozivnost okoline o materijalu koji se u njemu nalazi.

Metalne konstrukcije kao što su mostovi, dalekovodi, stupovi, dizalice, rezervoari i drugi uređaji podliježu koroziji pod utjecajem atmosfere, čelični trupovi brodova intenzivno korodiraju u morskoj vodi, cijevi i kablovi korodiraju u tlu zbog djelovanja lutajućih struja, itd. U novije doba zrak je sve više zagađen plinovima iz tvornica, rijeke su zagađene otpadnim vodama tj. pojačava se njihova agresivnost te štetno djeluju na trajnost materijala.

Pored metala koroziji podliježu i nemetali (beton i drugi građevinski materijali, staklo, keramika) i tvari organskog porijekla (drvo, plastične mase, premazi, tekstil i drugi materijali). Svako nastajanje nekog produkta pri djelovanju nekog sredstva na neki materijal, a koji teče protiv naše volje, predstavlja koroziju.

Korozija metala se dijeli prema mehanizmu djelovanja pa se razlikuju kemijska i elektrokemijska. Elektrokemijska korozija metala zbiva se prema zakonima elektrokemijske kinetike u elektrolitima dok kemijska nastaje prema zakonima kemijske kinetike heterogenih reakcija u plinovima i parama (korozija peći, motora s unutarnjim izgaranjem, oksidacija metala pri zagrijavanju, itd.) i neelektrolitima (korozija srebra u otopini joda u kloroformu, korozija bakra u benzinu, itd.). Također, korozija se može podijeliti i na osnovu izgleda korozijskog napada stoga se razlikuje makroskopski i mikroskopski oblik lokaliziranog napada.

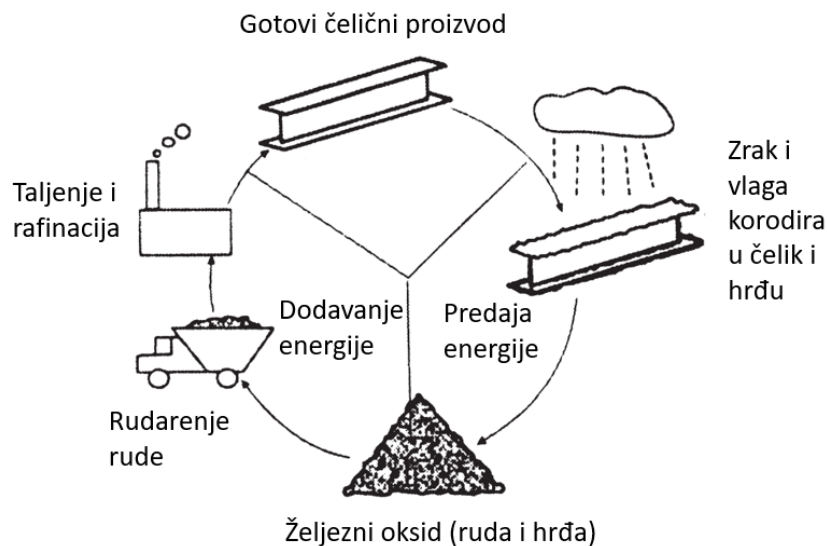
Korozija ima utjecaj na društvo u više aspekata, ponajviše u ekonomskom pogledu jer uzrokuje mnoge troškove, a samim time i gubitke produktivnosti. Stoga se posvećuje velika pažnja problemima oštećenja od korozije tj. razaranju metalnih materijala. Značajna sredstva se godišnje izdvajaju za sprječavanje i kontrolu korozije. Također, korozija uzrokuje opasnu prijetnju za ljudske živote, jer može uzrokovati katastrofe (korodirani mostovi mogu oslabiti i urušiti se, korozija metalnih spremnika za skladištenje kemikalija može uzrokovati curenje tih tvari u tlo ili vode, što ima štetan utjecaj na ekosustave i zdravlje ljudi, itd.).

1. OPĆI DIO

1.1. OSNOVE KOROZIJE

Korozija metala predstavlja postupno trošenje, tj. propadanje materijala izazvano kemijskim ili elektrokemijskim utjecajem sredine na površini metala. Sama riječ korozija dolazi od latinske riječi "corrodere", što znači nagrizati odnosno korodirati.^{1,2} Korozijski proces se definira kao nenamjerno razaranje konstrukcijskih materijala, koji može biti uzrokovan raznim fizikalnim, fizikalno-kemijskim ili biološkim sredstvima. Mehanizmom korozije mogu biti zahvaćeni metalni i nemetalni materijali (keramika, beton, staklo, itd.), ali zbog velike električne vodljivosti i brojnih reakcija između metala i okoline, ipak je proces korozije skloniji metalima.

Korozija se ne može spriječiti jer predstavlja spontani process, ali se može usporiti. Tijekom korozije odvija se niz kemijskih i elektrokemijskih promjena tijekom kojih metal prelazi iz elementarnog stanja u stabilne spojeve sličnim onima u prirodi. Prilikom toga dolazi do smanjivanja slobodne energije i metali prelaze u stanje niže energije što se može prikazati na primjeru željeza i čelika koji se spajaju s kisikom i vodom da bi postigli željeno stanje, točnije formirali hrđu, nalik izvornom željezu.^{1,3} Proces korozije je ireverzibilan proces suprotan proizvodnji metala iz rude (slika 1.).³



Slika 1. Ciklus korozije željeza.¹

Korozijsko ponašanje materijala ovisi o okolini u kojoj se nalazi, a korozivnost okoline ovisi o materijalu koji je izložen tom okruženju. U nekim interakcijama metala i okoline nema štetnog utjecaja (prirodne kombinacije koje pružaju zaštitu od korozije) dok u nekim rezultiraju jakim korozijskim oštećenjem metala zbog izlaganja nepoželjnom okruženju.¹

1.1.1. Oblici korozije

Obzirom na mehanizam djelovanja, korozivnu sredinu u kojoj je prisutna korozija i izgled korozijskog napada, mogu se uočiti različiti oblici korozije. Najčešća podjela korozije definira se usporedno sa sredinom u kojoj je prisutna, pa se prema tome razlikuje; atmosferska korozija, korozija u tlu, korozija u suhim plinovima, korozija u elektrolitima i korozija u neelektrolitičkim tekućinama. Posebne vrste korozije su kontaktna korozija, korozija kod naprezanja, biokorozija, korozija zbog lutajućih struja i dr.¹⁻³

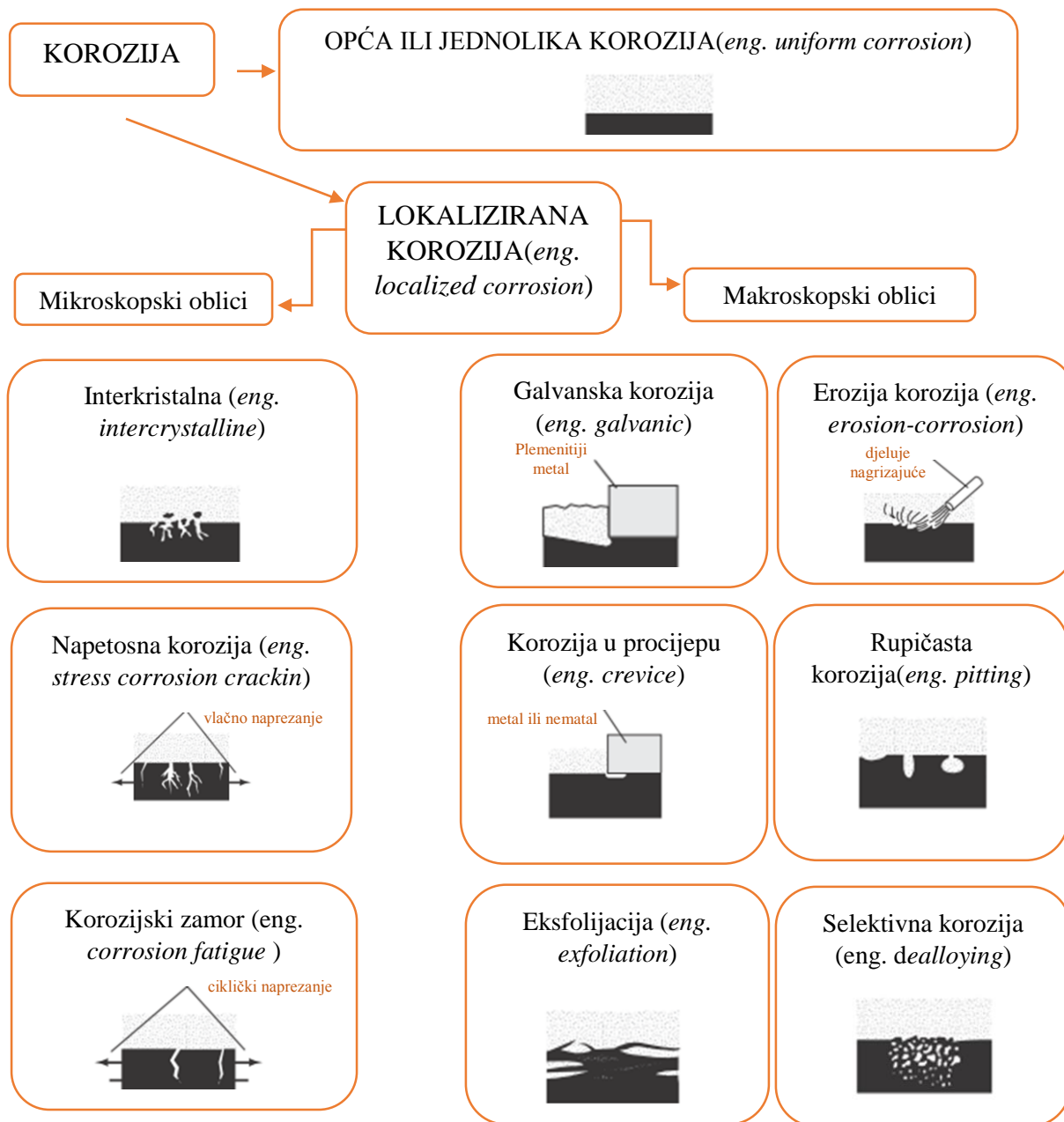
Postoji li prisutnost vode, vlage ili nekih sličnih tekućina radi se o „mokroj koroziji” u kojoj je voda elektrolit koji potiče brzi prijenos elektrona i iona, odnosno potiče brzinu odvijanja reakcija, a samim time i korozijski napad. S druge strane postoji i „suha korozija” ako je riječ o plinovima s višim temperaturama gdje se reakcija odvija između metala i plinova u atmosferi.¹

Obzirom na mehanizam djelovanja korozije postoje elektrokemijska korozija i direktna kemijska korozija. Nadalje, u obzir se uzima i izgled samog materijala jer o njemu ovisi hoće li korozija zahvatiti cijeli metal ili pak samo njegov dio. Na temelju vizualne procjene izgleda, mogu se izvući mnogi zaključci, kao što su vrsta korozije, stupanj napredovanja problema i potencijalna rješenja.⁵

Na osnovu izgleda korozijskog napada dolazi se do novih podjela korozije: opća korozija, rupičasta korozija, galvanska korozija, erozija-korozija, korozija u procijepu, interkristalna korozija, selektivna korozija i napetosna korozija.¹⁻⁴

U klasifikaciji korozije na osnovu izgleda razlikuje se makroskopski lokalizirana korozija i mikroskopski lokalni napad. Makroskopski oblici korozije zahvaćaju veća

područja korodiranog metala i mogu se vidjeti golim okom za razliku od mikroskopskih napada. Na slici 2. vidljivi su makroskopski i mikroskopski oblici lokalizirane korozije.¹



Slika 2. Shematski prikaz različitih oblika korozije.¹

1.1.2. Podjela korozije prema vrstama korozivnih sredina

1.1.2.1. Atmosferska korozija

Atmosferska korozija je najrašireniji oblik korozijskog napada jer je prouzročena utjecajem atmosfere Zemlje i posljedica je prisustva kisika (slika 3.). Koliko brzo će teći određeni proces korozije ovisi o samom sastavu materijala, elektrolitu, temperaturi, vlažnosti, debljini elektrolita, oborinama i sl. Kao što je ranije definirano, za proces korozije potreban je elektrolit; iako atmosfera nije elektrolit ipak se atmosferska korozija odvija uz prisutnost vlage koja utjecajem zraka nastaje na metalnim površinama te tako ima svojstva elektrolita. Kada se postigne željena vrijednost vlažnosti na metalnoj površini stvara se tanki sloj, točnije film elektrolita.¹⁻⁴



Slika 3. Stari traktor napravljen od čelika ili bodljikava žica od metala koji su dugotrajno izloženi atmosferskim uvjetima poput kiše, snijega i vlage korodiraju.^{5,6}

Ukoliko se proces odvija pri konstantnoj temperaturi u nezagađenoj atmosferi i relativnoj vlažnosti ispod 100% potpuno čista metalna površina neće biti podložna koroziji. Zbog prisutnosti površinskih čestica, nečistoća u atmosferi te temperaturne razlike između atmosfere i površine metala, metalna površina korodira jer se u tim uvjetima stvara mikroskopski površinski sloj elektrolita pri znatno nižem nivou vlažnosti. Tanki sloj elektrolita može varirati od nekoliko slojeva molekula vode do vidljivog elektrolita od 10 i 100 μm . Na osnovu debljine sloja vlage, atmosferska korozija dijeli se na: suhu koroziju, vlažnu koroziju i mokru koroziju.³

1.1.2.2. Korozija u tlu

Korozija u tlu odnosi se na konstrukcije koje su ukopane u tlo kao što su cjevovodi za prijenos plina i nafte, spremnici, itd. Najčešće se za takve metalne konstrukcije koristi obični čelik, lijevano željezo, aluminij, nehrđajući čelik i bakar dok se kao nemetali koriste polivinil klorid (PVC), akrilonitril-butadien-stiren (ABS) i polietilen (PE). Danas se sve više koristi termoreaktivna plastika ojačana staklenim vlaknima za podzemno skladištenje širokog spektra proizvoda (voda, benzin, itd.).¹

Korozija u tlu je kompleksna zbog raznolikosti tla i različitog utjecaja prilikom ukapanja metalnih konstrukcija. Obuhvaća lokalne elektrokemijske procese pod utjecajem vodene faze na površini metala te na nju djeluje vrsta tla, vlaga u tlu, količina kisika iz atmosfere, biološki i kemijski sastav tla, pH tla, sadržaj topljivih iona, itd. Korozija u tlu je definirana električnim otporom tla pa tako mali otpor uzrokovan prisutnošću vlage i topljivih soli uzrokuje veću koroziju. U većim dubinama zbog male prisutnosti kisika korozija je ograničena, ali je moguća veća agresivnost tla zbog prisutnosti sulfatnih anaerobnih bakterija.³

1.1.2.3. Korozija u suhim plinovima

Korozija u suhim plinovima je kemijska korozija te pri visokim temperaturama i utjecaju plinova nastaju metalni oksidi i drugi kemijski spojevi ovisno o atmosferi u kojoj se nalazi.³

1.1.2.4. Korozija u neelektrolitičkim i elektrolitnim tekućinama

Korozija u neelektrolitičkim tekućinama je kemijska korozija koja se javlja u nafti, organskim otapalima, itd. Ukoliko je prisutna vlaga i anorganske soli ova kemijska korozija prelazi u elektrokemijsku koroziju.³ Korozija u elektrolitima je elektrokemijska korozija prisutna u vodenim otopinama kiselina, lužina i soli.³

1.1.2.5. Korozija zbog lutajućih struja

Korozija zbog lutajućih struja je poseban tip elektrokemijske korozije koja se javlja uslijed istjecanja struje iz nekog metalnog objekta. Primjer ove vrste korozije su kolosijeci u gradu i ukopane metalne cijevi, cjevovodi, itd. U slučaju ovog tipa korozije na tračnici se pod utjecajem struje koja izlazi iz tračnice formiraju anoda i katoda, a elektrolit predstavlja korozivni okoliš u kojemu se tračnica nalazi.^{3,7}

1.1.2.6. Biokorozija

Biokorozija nastaje djelovanjem bioloških organizama koji su prisutni u gotovo svim prirodnim vodenim sredinama. Neki od njih su vidljivi i mogu se promatrati golim okom (rakuši, dagnje, školjke, itd.), dok su drugi mikroskopski (bakterije, alge, itd.).¹ Organizmi imaju tendenciju da se vežu za metal uronjen u neku vodenu sredinu i rastu na njemu, što rezultira stvaranje biološkog filma ili biofilma. Sam film može varirati od mikrobiološkog sluznog filma do teške naslage organizama koji se obraštaju s tvrdom ljuskom na konstrukcijama u obalnoj morskoj vodi.^{1,3}

Biofilmovi koji se stvaraju na površini gotovo svih konstrukcijskih metala i legura uronjenih u vodenu okolinu imaju sposobnost utjecati na koroziju tih metala i legura. Organizmi imaju sposobnost da mijenjaju varijable okoline kao što su oksidacijska moć, temperatura, brzina, koncentracija, itd. Dakle, vrijednost početnih parametara na granici metal/voda se mijenja pod djelovanjem biofilma. Rezultat može biti početak korozije pod uvjetima u kojima ih ne bi bilo da nema filma, promjene oblika korozije (od uniformne do lokalizirane) odnosno povećanje ili smanjenje brzine korozije.¹

Mikrobiološku koroziju uvjetuju bakterije *Desulfovibrio*, *Clostridium*, *Thiobacillus thiooxidans*, *Gallionella*, itd., koje djeluju na način da spojeve iz svog okoliša metaboličkim procesom pretvaraju u nove spojeve koji stimuliraju koroziju.³

1.1.3. Vrste korozije prema mehanizmu djelovanja

1.1.3.1. Kemijska korozija materijala

Direktna kemijska korozija odvija se u neelektrolitima i suhim plinovima, odnosno u mediju koji ne provodi struju za razliku od elektrokemijske korozije koja se odvija u elektrolitima. Oksidi i sulfidi su najčešći spojevi koji nastaju kada metali reagiraju s nemetalima. U praksi, neelektroliti poput vrućih plinova i organskih tekućina kao što su bezvodna goriva i maziva imaju veliki utjecaj. Kada se dogodi korozijska reakcija, izgled metala se mijenja, a na njegovoj površini stvara se opna. Značajan oblik ove korozije je korozija plinovima i javlja se kada plinovi izgaraju pri visokim temperaturama. Kemijska korozija definirana je reakcijom 1.³



gdje su: a i b stehiometrijski koeficijenti, Me označava atom metala, a X označava agresivnu komponentu okoline.

Na brzinu kemijske korozije mogu utjecati mnogi čimbenici kao što su svojstva metala koji korodira, agresivna okolina koja ga okružuje, fizikalna i kemijska svojstva produkata korozije koja često stvaraju tanki sloj te tako usporavaju koroziju. Na brzinu korozije utječe i stanje površine metala (onečišćenja, hrapavost, itd.) i naprezanja koja ubrzavaju kemijsku koroziju. Fizikalni uvjeti među kojima se izdvajaju visoke temperature smatraju se bitnima za ubrzanje korozije jer ubrzavaju kemijske reakcije pa tako i sam proces korozije.³

1.1.3.2. Elektrokemijska korozija materijala

Elektrokemijska korozija predstavlja reakciju nekog metala, točnije metalnog materijala i njegovog okoliša, te se odvija u elektrolitima ili u sredini u kojoj postoji ionska vodljivost. Voda, kao i vodene otopine kiselina, lužina i soli su neki od najčešćih izvora elektrolita. Da bi došlo do procesa korozije mora postojati neka pokretačka sila odnosno oksidacijsko sredstvo čiji je elektrodni potencijal veći od elektrodnog potencijala metala.³

Mogućnost pojave elektrokemijske korozije metala određuje se pomoću Gibbsove slobodne energije (ΔG) to jest energije koja se oslobađa ili apsorbira u reverzibilnom procesu uz stalan tlak (p) i temperaturu (T). Gibbsova energija može biti pozitivno ili negativno definirana što ukazuje smjer odvijanja reakcije. Promjena slobodne energije (jed. 1.) kao termodinamičke funkcije stanja određuje se iz razlike sume energije reaktanata i produkata:

$$\Delta G = \sum \Delta G_{\text{produkata}} - \sum \Delta G_{\text{reaktanata}} \quad (1)$$

Negativna vrijednost za promjenu Gibbsove energije ukazuje da će metal spontano reagirati stvarajući koroziju. Tada se atom metala nalazi u stabilnijem ionskom stanju.⁴ Predviđanje elektrokemijske korozije metala čiji elektrodni potencijal ne zavisi samo o aktivnosti njegovih iona može se odrediti i na osnovu elektrodnih potencijala po Nernstovoj jednadžbi (jed. 2.):

$$E = E^o + \frac{RT}{zF} \ln \frac{a_{\text{oks}}}{a_{\text{red}}} \quad (2)$$

gdje je: E – elektrodni potencijal, E^o – standardni elektrodni potencijal, R – opća plinska konstanta, $8,314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$, T – termodinamička temperatura, z – broj elektrona, F – Faradayeva konstanta, a_{red} – aktivnost reducensa i a_{oks} – aktivnost oksidansa.

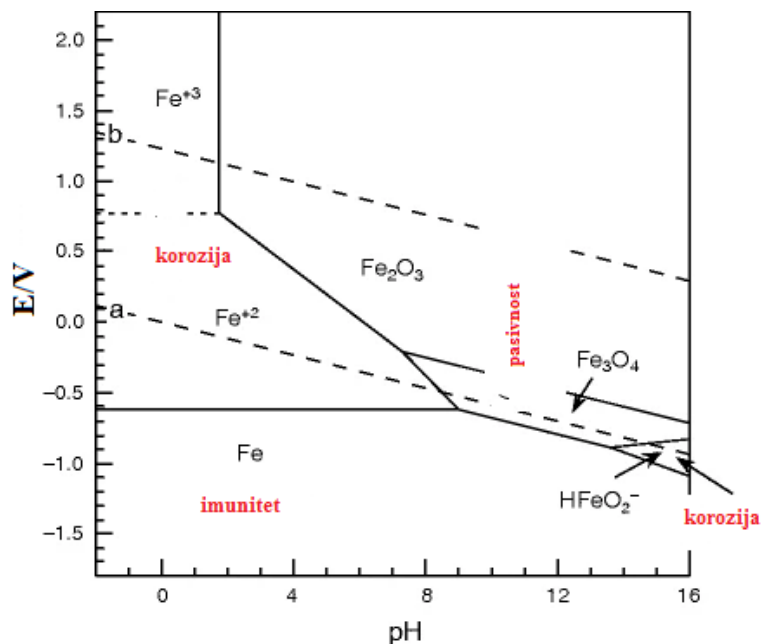
Razlika elektrodnih potencijala može se termodinamički prikazati (jed. 3.):

$$\Delta E = \frac{-\Delta G}{zF} \quad (3)$$

Termodinamički uvjet spontanosti korozijskog procesa osim $\Delta G < 0$ postaje i $\Delta E > 0$ i oba opisuju jakost pokretačke sile korozijske reakcije.⁴

Za predviđanje korozije metala također se koriste Pourbaixovi dijagrami ili dijagrami ovisnosti $E - \text{pH}$ koji termodinamičke uvjete prikazuju kao funkciju elektrodnog potencijala

(E) i koncentracije vodikovih iona izražene kao pH elektrolita. Primjer Pourbaixovog dijagrama za željezo prikazan je na slici 4.



Slika 4. Pourbaixov dijagram za željezo u vodi pri 25 °C (linija (a) pokazuje ravnotežni potencijal elektrodnih reakcija vodika, a linija (b) kisika).⁸

Tijekom elektrokemijske korozije odvijaju se tri osnovna procesa kao što su anodni proces (reakcija 2.), katodni proces (reakcije 3., 4., i 5.) i proces prijenosa elektrona metala te kretanje kationa i aniona u elektrolitu.⁴

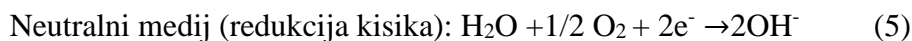
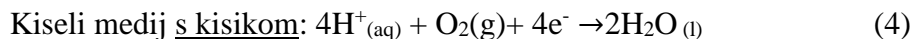
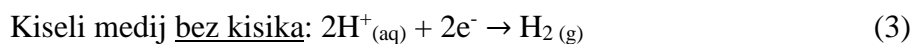
a.) Anodni proces¹⁻⁵

Anoda je elektroda na kojoj se odvija proces oksidacije ili ionizacije metala, a prostor oko anode naziva se anolit.



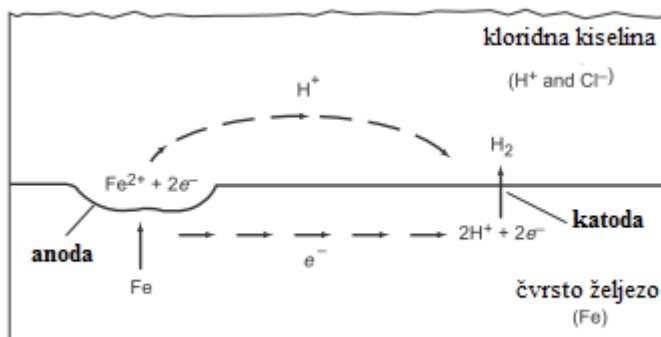
b.) Katodni proces¹⁻⁵

Katoda je elektroda na kojoj se odvija proces redukcije, a prostor oko katode naziva se katolit. Proces na katodi će se razlikovati ovisno o kemijskom sastavu i pH vrijednosti.¹⁻⁵



Mjesta za odvijanje katodnog ili anodnog procesa mogu biti stalna ili promjenjiva zbog toga što elektroni koji su dobiveni iz anodne reakcije na određenom mjestu mogu reagirati s postojećim oksidacijskim sredstvom na drugom mjestu te na taj način varira mjesto odvijanja samog procesa.

Elektrokemijska korozija metala ima sličnosti s radom galvanskog članka, u kojem se negativno nabijena elektroda otapa kada se nalazi u kontaktu s pozitivno nabijenom elektrodom na kojoj se reduciraju vodikovi ioni. Anodne i katodne regije na površini metala nastaju zbog prisutnosti stranih metala i nehomogenosti površine. Te regije podliježu koroziji kada su izložene elektrolitu.³ Na slici 5. prikazani su procesi oksidacije (anoda) i redukcije (katoda) na površini željeza u kloridnoj kiselini.



Slika 5. Prikaz elektrokemijske korozije željeza u kloridnoj kiselini.¹

Stupanj elektrokemijske nehomogenosti površine metala određen je razlikom potencijala katodnih i anodnih mjesta. Pokazatelj korozijske stabilnosti nekog metala očitava se iz vrijednosti standardnog potencijala metala određenog prema standardnoj vodikovoj

elektrodi. U tablici 1. prikazani su standardni elektrodni potencijali za neke metale gdje je "plemenitiji" metal onaj s pozitivnijim standardnim potencijalom.¹⁻³

Tablica 1. Standardni elektrodni potencijali metala¹

Elektrodna reakcija	Standardni potencijal /V
$\text{Au}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Au}$	+1,50
$\text{Ag}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag}$	+0,800
$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$	+0,337
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$	0,00
$\text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Pb}$	-0,126
$\text{Sn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Sn}$	-0,136
$\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ni}$	-0,250
$\text{Cd}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cd}$	-0,403
$\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}$	-0,440
$\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Zn}$	-0,763
$\text{Al}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Al}$	-1,66
$\text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mg}$	-2,37

1.1.4. Vrste korozije prema obliku oštećenja

1.1.4.1. Opća korozija

Opća ili uniformna korozija rezultira ujednačenim prodiranjem ili stanjivanjem površine duž cijele metalne površine.

Opća korozija javlja se kao rezultat podložnosti atmosferi, vodama, tlu ili različitim kemijskim kemikalijama. Hrđanje čelika (slika 6.), stvaranje zelene patine na bakru i potamnjenje srebra tipični su primjeri opće korozije. Dok većina metala biva zahvaćena ovakvom korozijom, postoje pasivni materijali poput nehrđajućeg čelika i nikal krom legure koji pokazuju koroziju samo na određenim mjestima (lokaliziranu), dok preostali dio površine ostaje zaštićen.

Ravnomjerna korozija može se spriječiti ili smanjiti pravilnim odabirom materijala, korištenjem premaza, inhibitora, katodnom ili anodnom zaštitom. Ove metode za sprječavanje korozije mogu se koristiti pojedinačno ili u kombinaciji.



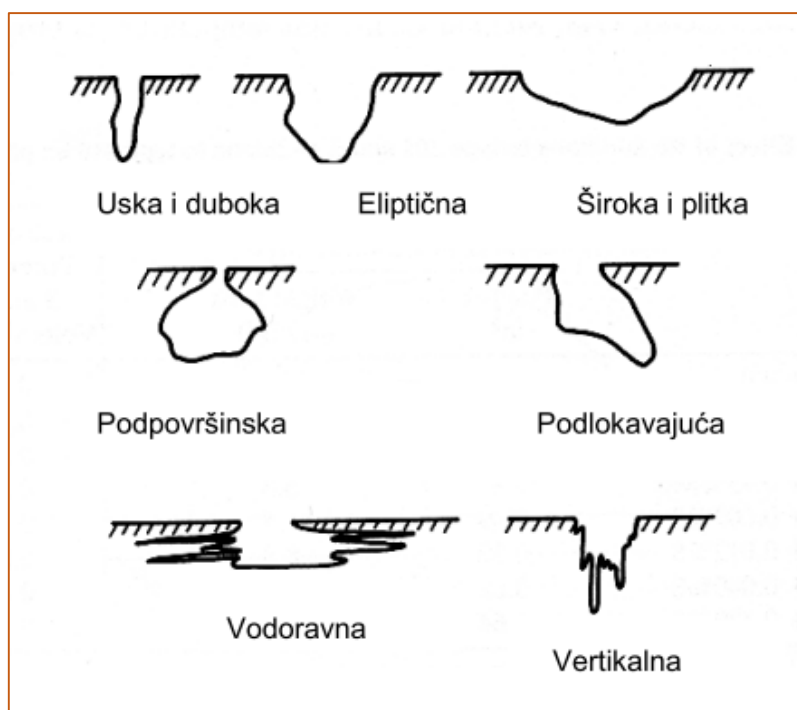
Slika 6. Opća korozija (hrđanje) čeličnog nosača mosta autoceste koji je izložen vremenskim utjecajima.¹

1.1.4.2. Lokalizirana korozija

Lokalna korozija uzrokuje brzo otapanje metala na pojedinim mjestima što dovodi do krtosti materijala i ranog mehaničkog kvara pri naprezanjima znatno ispod granice tečenja materijala. Lokalizirana korozija obično se javlja na mjestima gdje postoje nehomogenosti materijala ili promjene u lokalnom okruženju. Neki od uobičajenih lokaliziranih oblika korozije su rupičasta korozija i galvanska korozija, dok specifični uvjeti uz opterećenje materijala mogu dovesti do korozijskog zamora, pucanja uslijed korozije pod naprezanjem ili korozije u pukotinama.¹⁻⁵

1.1.4.2.1. Rupičasta korozija

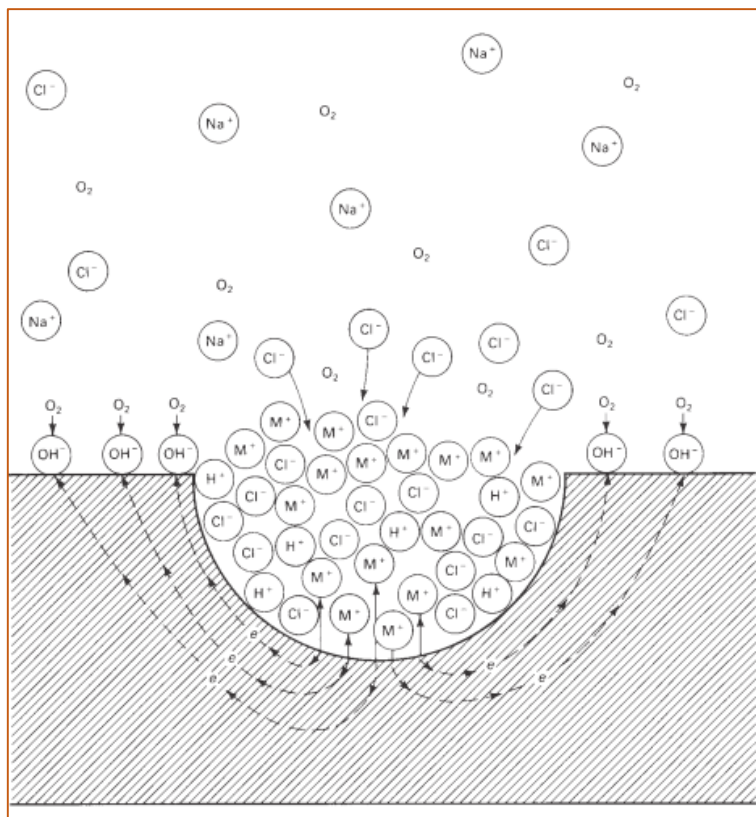
Rupičasta korozija (eng. *pitting*) predstavlja specifičan oblik korozije koja uzrokuje nastanak rupa različitih promjera i predstavlja najopasniji oblik korozije. Rupe su većinom malih dimenzija, mogu biti odvojene jedna od druge, dok s druge strane mogu biti veoma blizu te podsjećati na hrapavu površinu. Djeluje destruktivno na konstrukciju jer prodire duboko u masu metala, a zahvaćena je mala površina metala (slika 7.).



Slika 7. Mogući oblici poprečnog presjeka rupica.⁹

Mehanizam razvijanja rupica pri rupičastoj koroziji metala s mogućim produktima prikazan je na slici 8. Rupičasta korozija metala nastaje na mjestima slabljenja pasivnog filma ili lokalnog oštećenja metala. Taj mali, nezaštićeni dio površine postaje anoda. Dio površine gdje je pasivni film neoštećen predstavlja katodu. Površina anode je vrlo mala u odnosu na površinu katode pa je na tim mjestima brzina korozije velika te se formiraju rupice. Kada je medij preagresivan kao otopina natrijevog klorida dolazi do brzog otapanja metala, dok se redukcija kisika odvija na susjednim površinama. Brzo otapanje metala unutar rupe stvara višak pozitivnih naboja u ovom području, uzrokujući migraciju kloridnih iona u rupu što

rezultira u visokoj koncentraciji metalnih klorida i kao rezultat hidrolize prisutna je visoka koncentracija vodikovih iona. Vodikovi i kloridni ioni potiču otapanje većine metala i legura, a cijeli se proces s vremenom ubrzava. Katodna redukcija kisika na površinama uz rupe nastoji suzbiti koroziju na njihovim površinama.^{1,4}

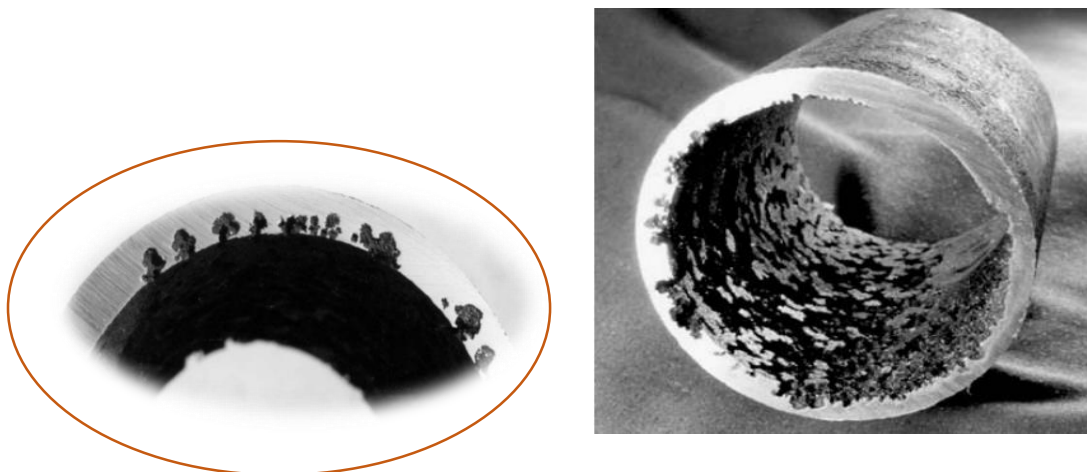


Slika 8. Autokatalitički proces pri rupičastoj koroziji.⁹

Velika većina metalnih materijala (željezo, nikel, aluminij, magnezij, bakar, cink, itd.) uključujući i njihove legure podložna je ovakvom načinu korozije koja se javlja kada dio metala preuzme anodne karakteristike u odnosu na ostatak površine.^{2,3}

Rupičasta korozija može predstavljati izazov pri detekciji jer su rupe obično male i teško ih je vidjeti golim okom, te se ne može u potpunosti zaključiti radi li se o koroziji ili samo o hrapavoj površini. U tu svrhu koriste se mnoge metode ispitivanja, kemijske analize i laboratorijski testovi. Rupice koje nastaju teško su primjetne u početnim fazama, često prođe nekoliko mjeseci, pa čak i godina kako bi postale vidljive golim okom (slika 9.).

Ovakva korozija predstavlja spor proces razaranja metala i može rezultirati postupnim povećanjem veličine rupica tijekom vremena. Rano otkrivanje potencijalnih problema pomoću redovnih analiza i ispitivanja pomaže u rješavanju problema na početku i sprječava njihovu progresiju.¹



Slika 9. Oštećenja čelične cijevi izložene jakoj mineralnoj kiselini.¹

1.1.4.2.2. Galvanska korozija

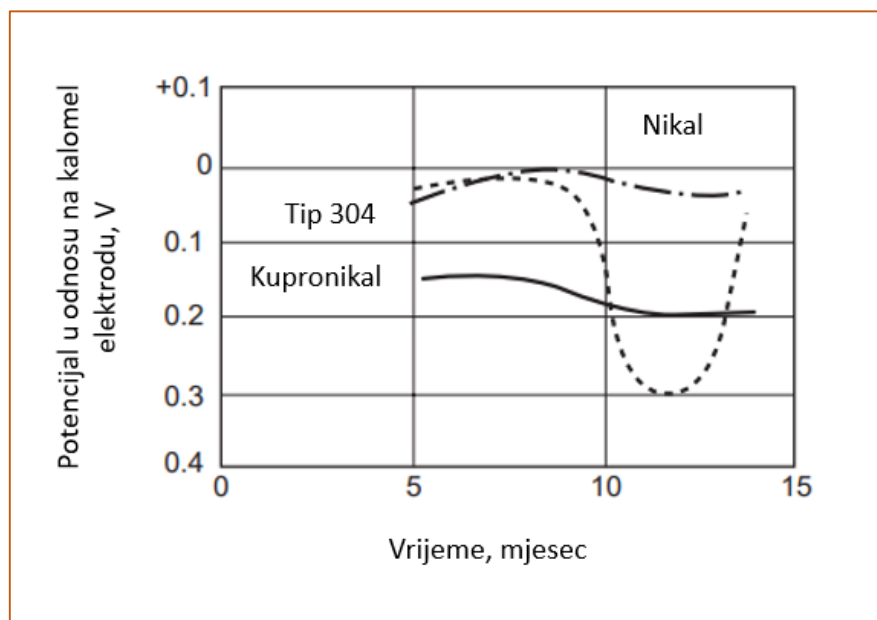
Galvanska korozija (eng. *galvanic*) rezultat je električne veze između dva različita metala ili legure izloženih elektrolitu. U sustavu različitih metala koji su uronjeni u zajednički elektrolit, a koji su međusobno izolirani te na taj način spriječen njihov izravni kontakt, galvanska korozija se neće dogoditi, bez obzira na blizinu metala, njihov relativni potencijal ili veličinu.^{1,8,9}

Kada se metali povežu galvanskim spojem, do korozije dolazi na metalu koji ima negativniji standardni elektrodni potencijal, što ga čini anodom, dok će se na "plemenitijem" metalu odvijati katodna redukcijska reakcija, što ga čini katodom. Potencijal koji se javlja među materijalima predstavlja pokretačku silu ove vrste korozije. Razlika u potencijalu između metala ili legura, priroda okoline, polarizacijsko ponašanje metala ili legura te geometrijski odnos između sastavnih metala ili legura su čimbenici koji utječu na opseg

rezultirajuće ubrzane korozije u galvanskom spoju.^{1,8,9}

Galvanski niz pruža vrijedne informacije o galvanskoj koroziji. Kroz galvanski niz, mogu se identificirati metali koji su osjetljivi na galvansku koroziju i one koji su otporni na nju. Ovaj niz rangira metale prema njihovom elektrokemijskom potencijalu, omogućujući prikaz ponašanja metala u galvanskom spoju te na temelju tih informacija, odabiru se odgovarajući metali ili se primjenjuju zaštitne mjere kako bi se minimizirala ili spriječila galvanska korozija. Galvanski niz je koristan alat za razumijevanje galvanske korozije, međutim često može dovesti i do zablude.¹

Materijali s najnegativnijim ili anodnim potencijalom imaju tendenciju ubrzano korodirati kada su električno spojeni na materijal s pozitivnijim ili katodnim (plemenitijim) potencijalom. Nedostaci korištenja galvanskog niza su nedostatak podataka o brzini korozije, pojava različitih potencijala za aktivno-pasivni metal, male promjene u elektrolitu koje mogu uzrokovati značajne promjene u potencijalu i potencijali mogu biti ovisni o vremenu.¹

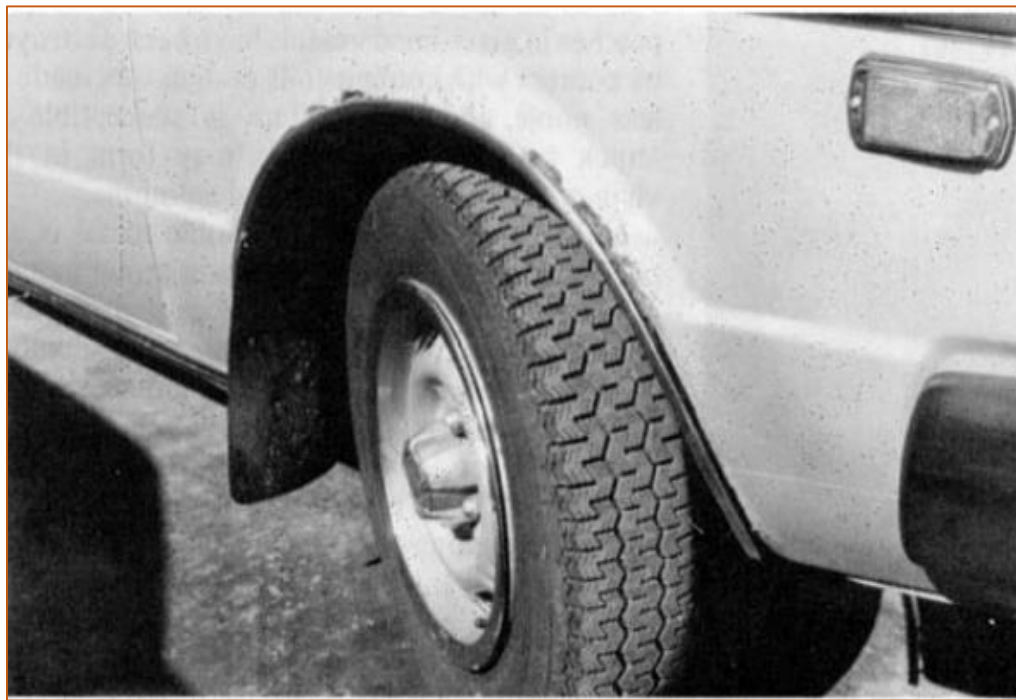


Slika 10. *Potencijal metala uronjenih u morsku vodu dulje od 15 mjeseci.*¹

Na slici 10. prikazan je potencijal nikla-200, nehrđajućeg čelika tipa 304 te legure bakra i nikla 70-30 mjereno odvojeno u odnosu na zasićenu kalomel elektrodu. Više od 15

mjeseci ovi elementi su bili uronjeni u morsku vodu, nikel i kupronikal imali su konstantno ponašanje tijekom ispitivanja dok se čelik tipa 304 mijenjao. Ovakvo ponašanje čelika rezultat je lokalizirane korozije, koja se javlja kada određeni dijelovi čelika prelaze iz pasivnog u aktivno stanje, te se zatim ponovno vraćaju u pasivno stanje.¹

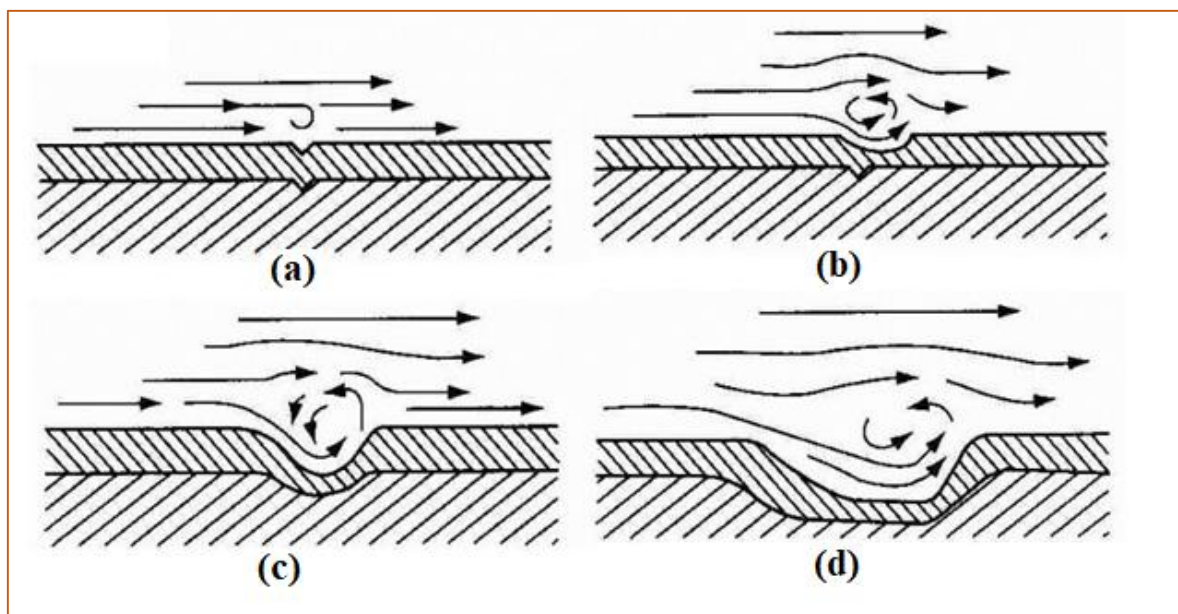
Galvanska korozija anodnog člana ili članova para može se manifestirati kao opća ili lokalizirana korozija, ovisno o specifičnostima para metala, formiranju zaštitnih filmova i karakteristikama uključenih materijala. Opća galvanska korozija nastaje kada cijela površina anodnog metala dolazi u kontakt s korozivnim okolišem, što uzrokuje brzu koroziju anode dok katodni metal djeluje kao zaštita sprječavajući koroziju na svojoj površini. Kombinacija različitih metala u inženjerskim projektima, poput zavojnica za grijanje ili hlađenje, izmjenjivača topline ili strojeva, može dovesti do pojave galvanske korozije (slika 11.).



Slika 11. Galvanska korozija lakiranog čeličnog panela karoserije automobila u kontaktu s otvorom kotača od nehrđajućeg čelika.¹

1.1.4.2.3. Erozijska - korozija

Erozijska-korozija (eng. *erosion-corrosion*) nastaje kada metal bude izložen kombinaciji mehaničke abrazije i korozivne atmosfere. Zove se još i ubrzana korozija visokog protoka. Na erozijsko-koroziju utječe vrsta fluida, dinamička svojstva fluida, termodinamička svojstva fluida i okoline, svojstva materijala, veličina materijala, izrada i montaža. Kada tekućine i plinovi prolaze kroz cijevi brzim protokom, mogu imati kemijski agresivan učinak i pridonijeti koroziji tj. oksidaciji na metalnoj površini. Najvažniji faktor je brzina tekućine. Erozijska-korozija uzrokuje abraziju na površinama cijevi, ventila, propelera, pumpa, vodova, itd., i rezultira gubitkom stijenke, pojavom utora, padom protoka, itd. Na slici 12. prikazane su faze erozijsko-korozije.^{1,10}



Slika 12. Faze erozijsko-korozije.¹⁰

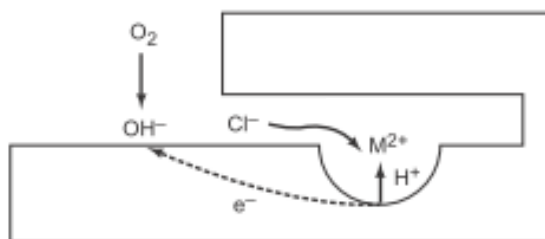
Na samoj površini metala javljaju se konačni proizvodi korozije koji se različitim načinima hvataju za nju. Izlaganje metalnih površina mehaničkim udarcima dovodi do erozije, odnosno do trošenja zaštitnog sloja metala, a stalni kontakt s agresivnim medijima rezultira kontinuiranim trošenjem metala (slika 13.).¹⁰



Slika 13. Erozija-korozija.¹⁰

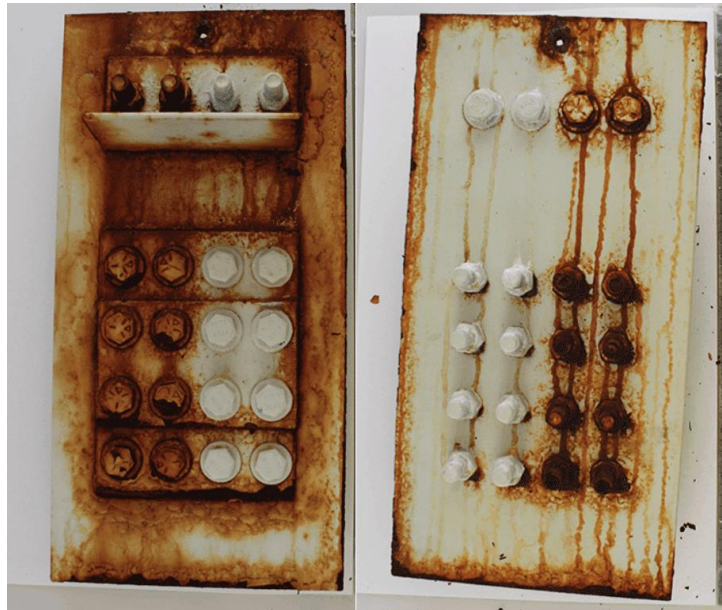
1.1.4.2.4. Korozija u procijepu

Korozija u procijepu (eng. *crevice*) nastaje kada su istovrsni metali u blizini pukotina, procijepa i drugih zatvorenih prostora. Ona se javlja kada postoji dovoljna zračnost u spoju između dva dijela da elektrolit može prodrijeti, ali je istovremeno premala da bi se osigurao obnovljen dotok elektrolita i kisika (slika 14.). Ovaj oblik korozije rezultat je loših konstrukcijsko-tehnoloških rješenja.



Slika 14. Mehanizam korozije u procijepu.¹

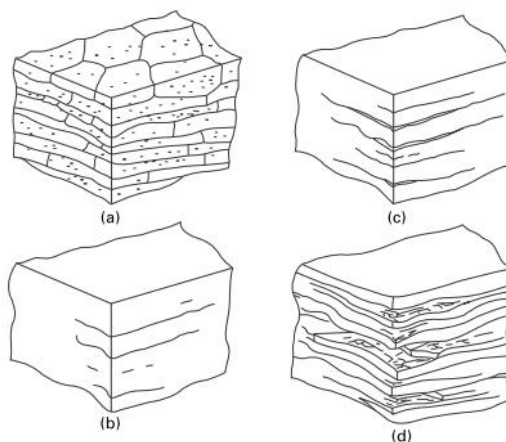
Ova vrsta korozije rezultat je galvanske ćelije između elektrolita unutar pukotine koji ima nedostatak kisika i elektrolita izvan pukotine koji ima višak kisika. Materijal unutar pukotine ili procijepa djeluje kao anoda, a vanjski materijal postaje katoda. Pukotine mogu nastati planirano ili slučajno te se pojavljuje na brtvama, priborima, gumenim prstenovima, šavovima zakovica, zaslona koji se preklapa, itd. (slika 15.).^{1,11}



*Slika 15. Primjer korozije u procijepu.*¹¹

1.1.4.2.5. Eksfolijacija

Eksfolijacija (eng. *exfoliation*) je oblik korozije koja se većinom javlja kod aluminijskih legura u industrijskom ili pomorskom okruženju. Korozija se odvija bočno od mjesta inicijacije na površini i općenito se nastavlja interkristalno duž ravnina paralelnih s površinom. Produkti korozije koji se nakupljaju duž ovih granica zrna vrše pritisak između zrna i krajnji rezultat je učinak podizanja ili listanja. Oštećenje često počinje na krajnjim zrcima na strojno obrađenim rubovima, rupama ili žljebovima i kasnije može napredovati kroz cijeli dio.^{1,12} Na slici 16. shematski je prikazan slijed eksfolijacije na leguri aluminijske.¹³



Slika 16. *Primjer eksfolijacije na leguri aluminija; a) izdužena zrnasta struktura i taloženje, b) početak korozije unutar granica zrna, c) raslojavanje između slojeva zrna i d) potpuni gubitak integriteta debljine legure.¹³*

1.1.4.2.6. Selektivna korozija

Selektivna korozija (eng. *dealloying*) je proces koji uzrokuje propadanje samo jedne faze ili jedne komponente materijala koji ima više faza ili komponenata. Decinkacija mjedi i grafitizacija sivog lijeva su najčešći primjeri selektivne korozije. Decinkacija mjedi je selektivni proces na razini komponente, dok je grafitizacija sivog lijeva selektivni proces na razini faze. U oba slučaja, korozija se usredotočuje samo na određenu komponentu ili fazu materijala, što rezultira specifičnim oštećenjima i slabljenjem mehaničkih svojstava materijala (slika 17.).¹

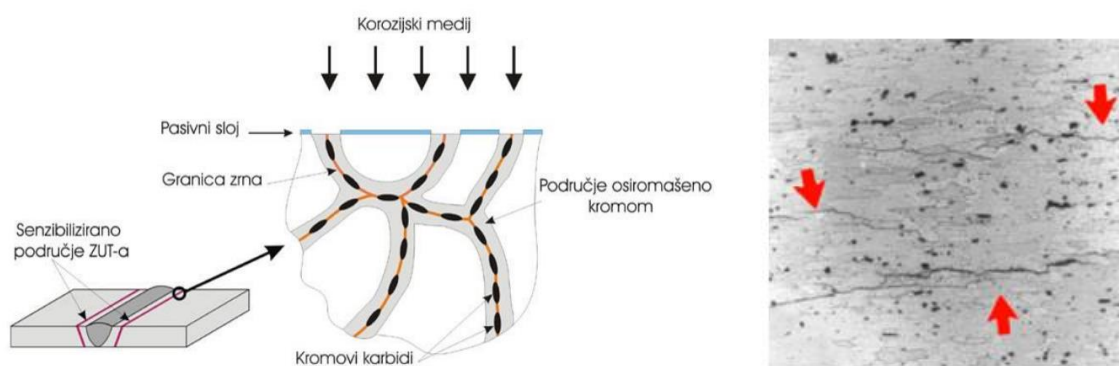


Slika 17. *Primjer selektivne korozije.¹*

1.1.4.2.7. Interkristalna korozija

Interkristalna korozija (eng. *intercrystalline*) je vrlo opasna jer se polagano širi duž granica kristalita u mikrostrukturi čelika, uzrokujući razaranje metalne veze među kristalitim. Ovakav oblik korozije često ostaje neprimjećen, ali vrlo brzo smanjuje čvrstoću materijala te u većini slučajeva zahvaća oblike poput nehrđajućeg čelika, legure nikla te aluminija. Interkristalna korozija može prouzročiti ozbiljne probleme jer može dovesti do potpunog raspada materijala. Stoga je važno prepoznati i adekvatno se boriti protiv ovog oblika korozije.^{1-4,14}

Interkristalna korozija uobičajena je kod austenitnih nehrđajućih Cr-Ni legura, posebno pri temperaturama od 400 do 800 °C. U ovim materijalima, difuzijski procesi i preferencija ugljika prema kromu rezultiraju formiranjem kromovih karbida Cr_{23}C_6 duž granica zrna (slika 18.).¹⁵ Ovi spojevi sadrže visok udio kroma (više od 70%), dok su područja oko njih siromašna kromom (manje od 12%). To stvara lokalitete sa smanjenim kromom duž granica zrna, što je ključno za osiguranje korozijske otpornosti. Zbog toga se formiraju malena anodna područja na mjestima s nižim udjelom kroma i velika katodna područja oko njih, omogućujući tako napredovanje interkristalne korozije. Ovaj proces nastavlja se razaranjem područja kroma duž granica zrna.^{14,15}

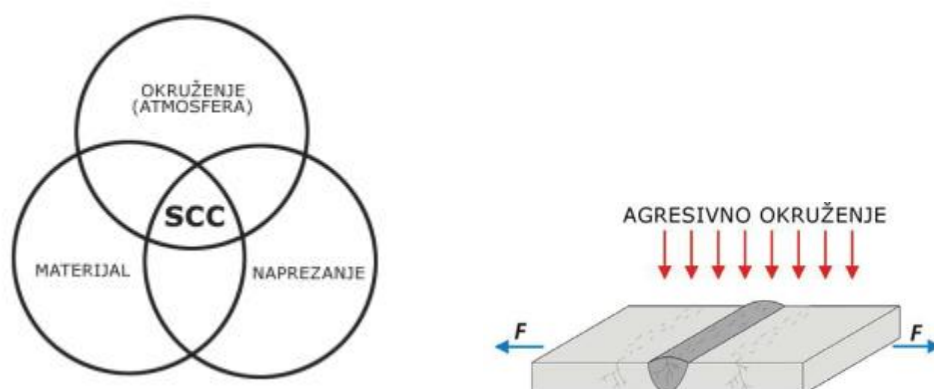


Slika 18. Proces nastajanja interkristalne korozije.^{14,15}

Interkristalna korozija u austenitnom nehrđajućem čeliku može se izbjeći kontroliranjem njegovog sadržaja ugljika ili dodavanjem elemenata čiji su karbidi stabilniji od kromovih. Za većinu austenitnih nehrđajućih čelika, ograničavajući sadržaj ugljika 0,03% ili manje spriječit će senzibilizaciju tijekom zavarivanja. Također titan i niobij tvore stabilnije karbide od kroma i dodaju se nehrđajućim čelicima kako bi se formirali stabilni karbidi koji reagiraju s ugljikom iznad 815 °C čime nastaju karbidi koji su jednoliko raspoređeni po matrici legure.¹

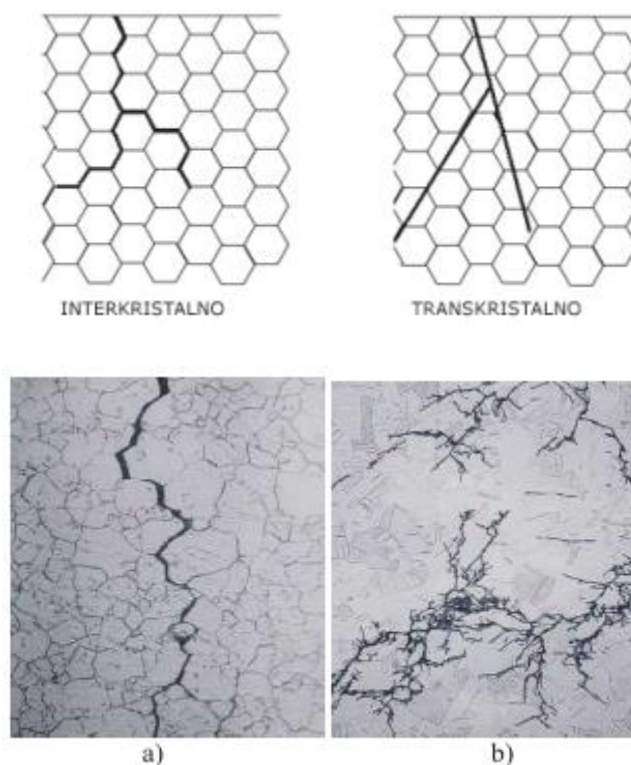
1.1.4.2.8. Napetosna korozija

Napetosna korozija (eng. *stress corrosion cracking*) je proces koji rezultira stvaranjem pukotina kada su prisutni osjetljivi materijali, određena naprezanja i specifična svojstva medija. U ovom procesu, kombinacija naprezanja i kemijskog djelovanja medija uzrokuje slabljenje materijala i formiranje pukotina. Predviđanje napetosne korozije često predstavlja izazov jer nema jasnih vidljivih znakova iniciranja pukotina ili loma prije njihovog pojavljivanja. Ovo čini napetosnu koroziju posebno problematičnom jer se pucanja mogu dogoditi neočekivano, što često rezultira visokim troškovima. Nedostatak vizualnih naznaka prije pojave pukotina otežava otkrivanje i sprječavanje ovog oblika korozije. Glavni čimbenici koji rezultiraju ovu vrstu korozije su: vlačna naprezanja, okoliš i samo svojstvo materijala (slika 19.).¹⁶



Slika 19. Čimbenici napetosne korozije.¹⁶

Napetosnu koroziju izazivaju vlačna naprezanja koja su češća unutarnja (zaostala) nego vanjska (nametnuta), a uglavnom su posljedica zaostalih naprezanja zbog hladne deformacije ili zavarivanja u okolini povišene temperature, tlaka i opasnih otopina koje sadrže halogenide, kloride alkalijskih i zemnoalkalijskih metala, sumporovodika i sl. Pukotine napreduju okomito na smjer vlačnog naprezanja, a šire se interkristalno i transkristalno (slika 20.).¹⁶



Slika 20. Širenje pukotina kod napetosne korozije: a) interkristalna napetosna korozija AISI304 čelika, b) transkristalna napetosna korozija AISI 316 čelika.^{16,17}

Faze procesa napetosne korozije su inkubacija, inicijacija pukotine, prodiranje (propagacija) pukotine i lom. Mehanizmi koji utječu na nastanak napetosne korozije dijele se na anodne i katodne. U interakciji s materijalima mehanizmi koji uzrokuju ovu koroziju su apsorpcija medija u materijal, reakcija površine materijala, reakcije u pukotini materijala te površinski slojevi i filmovi materijala.¹⁶

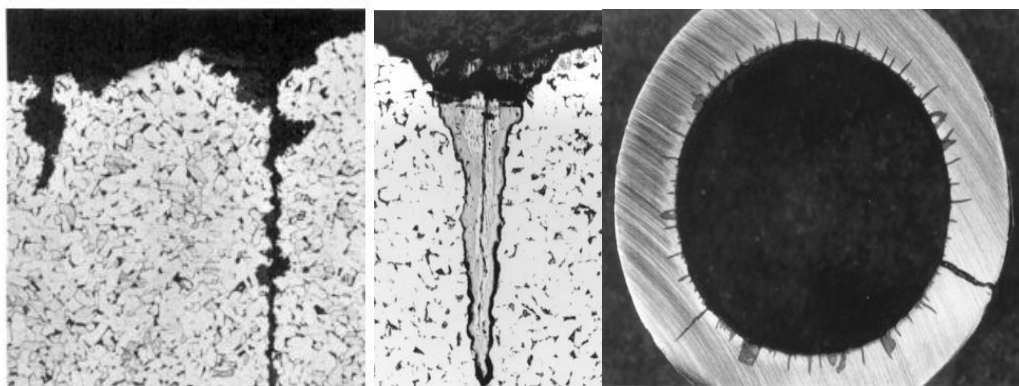
Posljedica napetosne korozije je rušenje mosta Silver Bridge preko rijeke Ohio, a rezultat je zaostalih vlačnih naprezanja, temperature i okoline (slika 21.).¹⁸



*Slika 21. Posljedica napetosne korozije.*¹⁸

1.1.4.2.9. Korozijski zamor

Korozijski zamor (eng. *corrosion fatigue*) je pojam koji se koristi za opisivanje fenomena pucanja, uključujući i inicijaciju i širenje u materijalima, a javlja se kombiniranim djelovanjem cikličkog stresa i korozivnog okruženja. Korozijski zamor stvara uske do široke pukotine s malo ili bez grananja (slika 22.) te se po tome razlikuje od korozijskih pukotina nastalih naprezanjem koje često pokazuju znatno grananje. Pukotine se mogu pojaviti pojedinačno, ali često se pojavljuju kao paralelne pukotine.¹



*Slika 22. Pukotine stijenke kotlovske cijevi uslijed zamora od korozije ispunjena produktima korozije.*¹

1.2. KOROZIJA MATERIJALA

Željezo, aluminij, čelik i bakar, zajedno s njihovim legurama, spadaju među najvažnije i najčešće korištene konstrukcijske materijale. Ovi materijali posjeduju različite karakteristike i svojstva koja ih čine prikladnim za različite vrste konstrukcija i primjene, kao što su čvrstoća, otpornost na koroziju, termalna vodljivost i obradivost.³

1.2.1. Željezo

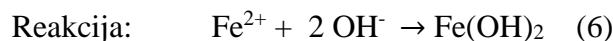
Željezo, kao metal, se ubraja među najvažnije tehničke metale, a široko je rasprostranjen unutar Zemljine kore s udjelom od otprilike 5% po masi. Ovaj izuzetno koristan metal u obliku svojih legura ima široku primjenu u raznim industrijskim sektorima, uključujući građevinarstvo, automobilsku industriju, energetiku i mnoge druge. Njegova visoka čvrstoća, dobra obradivost i magnetska svojstva čine ga iznimno vrijednim i poželjnim za različite svrhe. Također, željezo je osnovni sastojak čelika, koji je jedan od ključnih materijala u industriji zahvaljujući svojoj izdržljivosti i prilagodljivosti. Željezo u prisutnosti s kisikom gubi stabilnost, odnosno oksidira.

Slobodna entalpija:³ $\Delta G^0 (\text{Fe}/\text{Fe}_2\text{O}_3) = -742 \text{ kJ/mol Fe}_2\text{O}_3$

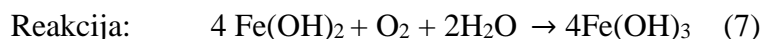
Standardni elektrodni potencijal:³ $E^0 (\text{Fe}/\text{Fe}^{2+}) = -0,440 \text{ V}$

$E^0 (\text{Fe}/\text{Fe}^{3+}) = -0,040 \text{ V}$

Prema standardnom elektrodnom potencijalu, primjećuje se da se pri korozijskim uvjetima otapanja željeza najprije formira Fe^{2+} u reakciji s hidroksidnim ionima (OH^-).



$\text{Fe}(\text{OH})_2$ reagira s kisikom iz zraka i postaje smeđi $\text{Fe}(\text{OH})_3$.



Glavni razlozi zbog kojih se korozija u prirodnim uvjetima brže odvija na željezu u usporedbi s nekim drugim elementima su nizak prenapon redukcije vodika, niska sposobnost pasiviranja, loša zaštita od korozije i niski prenapon izlučivanja vodika na željezu.

Kiseli mediji s pH vrijednošću manjom od 4, uz prisutnost vodika kao depolarizatora, mogu otapati željezo i čelik. Osim koncentracije kiselina, brzina korozije također ovisi o karakteristikama okoline i raspodjeli onečišćenja. Kada je željezo izloženo jako koncentriranim oksidirajućim kiselinama poput H_2SO_4 (sulfatne kiseline) i HNO_3 (dušične kiseline), dolazi do fenomena pasivacije željeza. U takvim uvjetima, formira se tanki pasivni sloj koji štiti željezo od daljnje korozije. Pasivni sloj sprječava prodor kiseline i smanjuje brzinu korozije. Ova pasivacija željeza rezultira smanjenom osjetljivošću metala na koroziju u prisutnosti ovih kiselina.³ U lužnatim otopinama pH veće od 9,5 željezo korodira uz stvaranje $HFeO_2^-$, a u otopinama soli korozija željeza ovisi o sadržaju kisika.

1.2.2. Čelik

Nehrđajući čelici, poznati i kao korozijski postojani čelici, su visokolegirani čelici koji su dizajnirani da pruže otpornost na korozijsko djelovanje različitih medija. Oni sadrže posebno legirane elemente koji pomažu u sprječavanju ili usporavanju korozijskih procesa. Najčešći legirani element u nehrđajućim čelicima je krom, koji stvara zaštitni oksidni sloj na površini metala koji sprječava daljnu koroziju. Kod izloženosti nehrđajućeg čelika kiselinama poput klorovodične ili sumporne kiseline pri višim temperaturama, javlja se opća korozija uslijed depasivacije čelika.³

Postoji pet skupina nehrđajućih čelika koji se razlikuju po mikrostrukтури: austenitni, feritni, martenzitni, duplex i precipitacijski očvrstnuti čelici. Austenitni čelici su najzastupljenija skupina nehrđajućih čelika. To su krom-nikal čelici koji sadrže manje od 0,10% ugljika, 18% kroma i 8% nikla.³

Hladno oblikovanje je proces koji se koristi za poboljšanje svojstava čelika. Tokom tog procesa, čelik se podvrgava velikim naprezanjima koja prelaze granice razvlačenja, što rezultira promjenom u njegovoj strukturi i povećanjem čvrstoće. Na taj način se dobivaju ultračvrsti čelici koji pružaju najveću otpornost i čvrstoću.³

1.2.3. Aluminij

Zahvaljujući izvanrednim svojstvima i širokim mogućnostima primjene, proizvodnja aluminija spada među vodeće industrije u svijetu. Aluminij se smatra jednim od najvažnijih metala, a njegova proizvodnja se nalazi odmah iza željeza među najvećim proizvodnjama metala na globalnoj razini.

Standardni elektrodni potencijal:³ $E^0(\text{Al}/\text{Al}^{3+}) = -1.662 \text{ V}$

Zbog svoje visoke reaktivnosti, aluminij brzo reagira s kisikom i vlažnim zrakom. Međutim, ta reaktivnost omogućuje formiranje zaštitnog sloja oksida. Budući da čist aluminij ima lošija mehanička svojstva, većina aluminija se prerađuje u legure (oko 90%). Među najpoznatije legure aluminija spada duraluminiji koji se sastoji od velikog djela aluminija između 93 do 95%, te mangana, bakra i magnezija u tragovima. Ove legure su po korozivnoj postojanosti lošije od tehničkog aluminija jer su nakon izlaganja višim temperaturama (200 – 500 °C) sklone interkristalnoj koroziji.³

1.2.4. Bakar

Bakar je vrlo žilav i rastezljiv metal, crvene je boje te je dosta mekan. Ima izvanrednu električnu vodljivost, toplinsku provodljivost te otpornost na koroziju. Osim u metalurgiji ima značajnu primjenu u elektrotehnici. Zbog velike toplinske vodljivosti upotrebljava se u termoenergetskim postrojenjima.

Standardni elektrodni potencijal:³ $E^0(\text{Cu}/\text{Cu}^{2+}) = 0,337 \text{ V}$

$E^0(\text{Cu}/\text{Cu}^+) = 0,520 \text{ V}$

Bakar je otporan na neoksidirajuće kiseline jer ne korodira uz razvijanje vodika. Međutim, u oksidirajućem mediju, bakar se može brzo otopiti jer ne formira pasivni zaštitni sloj. Na otapanje bakra utječu kisikovi ioni, bakrovi i željezovi kationi te kiseline kao što su klorovodična, sumporna i dušična. Patina je zelenkasti i plavkasti sloj koji se formira na bakru u vlažnoj atmosferi ili vodi. Ovaj sloj predstavlja zaštitu bakra i njegovih legura, a može se pronaći na predmetima koji su stari čak nekoliko tisuća godina. Patina štiti bakar od daljne korozije i oksidacije te daje površini karakterističan izgled.³ Jedan od primjera je Kip slobode u New Yorku (slika 23.).³

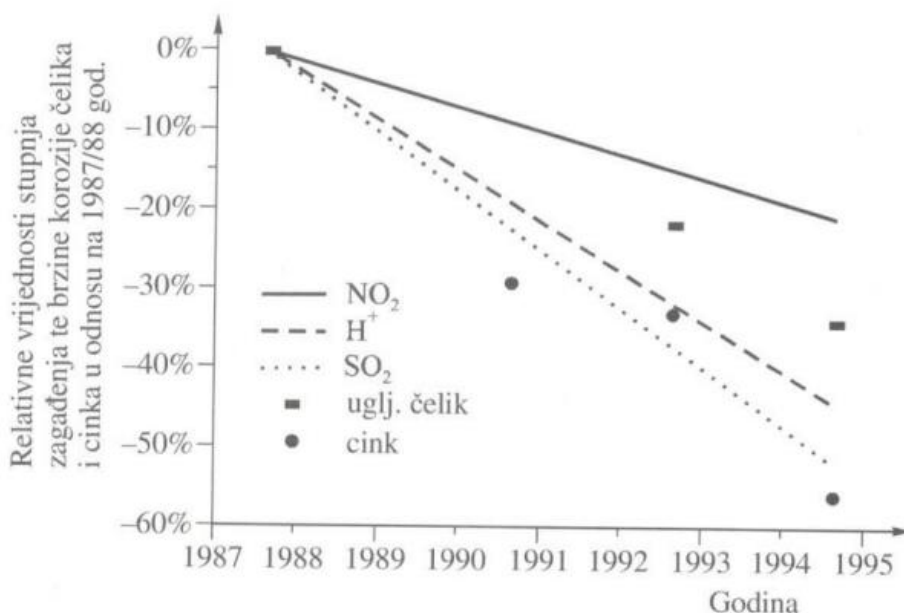


*Slika 23. Kip slobode u New Yorku.*³

Na samu koroziju mnogo su otpornije legure bakra nego sam bakar. Kao najpoznatija legura bakra bilježi se bronca, a tu su još mjed (legure s cinkom) i novo srebro (bakar, cink i nikel) koje se koristi za dekoraciju. Bronca je legura bakra s kositrom uz dodatak aluminijske, silicij, olova, fosfora, itd. Ovisno o njenom sastavu nastaju podjele na: pravu broncu, olovnu broncu, topovsku broncu, broncu za novce i medalje, fosfornu broncu i sl.¹⁻⁴

1.3. OVISNOST KOROZIJE O KLIMATSKIM UVJETIMA

Pojačana korozija uočena je kod kulturnih i povijesnih spomenika zbog zagađenosti atmosfere. Ekonomska komisija Ujedinjenih Naroda za Europu (eng. *UNECE*) je pokrenula projekt koji istražuje utjecaj zagađenja zraka na materijale.³ Cilj ovog projekta bio je kvantitativno proučiti utjecaj dušikovih i sumporovih spojeva, koji uzrokuju kisele kiše, na atmosfersku koroziju važnih konstrukcijskih materijala u kontekstu klimatskih parametara. Tijekom druge polovice 20. stoljeća provedeno je istraživanje u kojem su različiti polimerni materijali, prevlake, kamen i mnogi drugi metali bili izloženi atmosferskim uvjetima. Istraživanje je trajalo 8 godina, a u tom periodu bilježeni su klimatski uvjeti kao što su temperature, koncentracija, broj sati izloženosti materijala vlazi ili suncu te drugi relevantni parametri. Kao glavni rezultat istraživanja, dobivene su funkcije koje pružaju prikaz utjecaja koncentracije zagađivača i općenito klimatskih uvjeta na koroziju. Te funkcije formuliraju zbroj suhe i mokre korozije uzrokovane kiselim kišama. Istraživanje³ je pokazalo da se u tom periodu smanjio udio zagađenja zraka (slika 24.), a samim time i atmosferska korozija, te da je općenito zagađenje odnosno šteta koju uzrokuje SO_2 veća u zemljama s toplijom klimom.



Slika 24. Trendovi stupnja zagađenja i brzine zagađenja čelika i cinka u periodu od 1987-1995 g.³

Temperatura, kisele kiše, vlažnost zraka, UV zračenja samo su neki od klimatskih čimbenika koji potiču razvoj korozije. Kisele kiše sadrže visoku koncentraciju kiselina koje mogu direktno oštetiti površinu metala, dok visoka vlažnost i visoke temperature dodatno doprinose tom procesu.

1.4. EKONOMSKI ASPEKT KOROZIJSKIH PROCESA

Korozija metala uzrokuje troškove gospodarstva, a primjenom adekvatnih materijala otpornih na koroziju ti troškovi se mogu smanjiti. Prema studiji „*Economic Effects of Metallic Corrosion*“ u SADu, provedeni od *Battelle Columbus Laboratories* i *National Institute of Standards and Technology* (NIST) (1995. g.) procijenjeni su troškovi korozije na 300 milijuna dolara koji se mogu smanjiti primjenom adekvatnih mjera zaštite od korozije.¹

Najveći dio ovih troškova nastaje u proizvodnji i upotrebi motornih vozila stoga je taj sektor napravio najveći napredak protiv korozije. Napredak je bio u primjeni nehrđajućeg čelika, korištenjem kvalitetnijih prevlaka kao i kombiniranjem više zaštitnih prevlaka. Zamjena materijala koristila se kako zbog smanjenja korozije tako i zbog smanjenja težine. U ispitivanju sektora zrakoplova, cjevovoda i brodogradnje, također se napravio napredak.

Općenito ukupni troškovi uzrokovani korozijom mogu se smanjiti primjenom korozivno otpornih materijala, poboljšanjem prakse za sprječavanje korozije i ulaganjem u istraživanja vezana uz koroziju.¹ Neki od čimbenika koji utječu na koroziju prikazani su na slici 25.¹ Troškovi korozije se smanjuju primjenom dostupne zaštite od korozije, koja je podržana transferom tehnologije. Nova i poboljšana tehnologija korozije rezultat je istraživanja i razvoja. Ispravnom primjenom metoda za kontrolu korozije (npr. premazi, inhibitori i katodna zaštita) smanjuju se troškovi korozije. Troškovi korozije imaju tendenciju povećanja s čimbenicima kao što su odgođeno održavanje i produljeni vijek trajanja zgrada i opreme. Povećani troškovi korozije česti su pri zahtjevnijim izvedbama i nepovoljnijem okruženju. Također na rast troškova korozije utječu državni propisi koji zabranjuju korištenje dokazanih metoda zaštite zbog sigurnosnih i ekoloških razloga. Primjer je uklanjanje boja na bazi olova na kućama i mostovima, boje koje sadrže Cr(VI) spojeve kao inhibitore korozije na zrakoplovima i boje na uljanoj bazi (alkidno fenolne smole). Zamjenske boje na bazi vode u mnogim slučajevima ne pružaju ekvivalentnu zaštitu od korozije.¹



Slika 25. Faktori koji utječu na povećanje ili smanjenje troškova korozije.¹

Ukupni troškovi korozije variraju od industrije do industrije, a uključuju troškove korozije pri proizvodnji tj. nastajanju proizvoda na nekoliko načina, počevši od materijala, energije, rada, i tehničke stručnosti potrebne za proizvodnju proizvoda. Korozija također utječe na ostale operativne troškove, dio troškova održavanja i popravka te kapitalne troškove. Za krajnjeg korisnika ili potrošača, troškovi korozije nastaju radi potrage za proizvodima za sprječavanje i kontrolu korozije, održavanje i popravak te prijevremenu zamjenu.¹

Prema studiji *Battelle/NIST* na trošak korozije utječe deset elemenata: zamjena opreme, gubitak proizvoda, održavanje i popravak, višak kapaciteta, suvišna oprema, kontrola korozije, tehnička podrška, dizajn, osiguranje, popis dijelova i opreme.¹ Zamjena, gubitak proizvoda te održavanje i popravak smatraju se izravnim troškovima korozije.

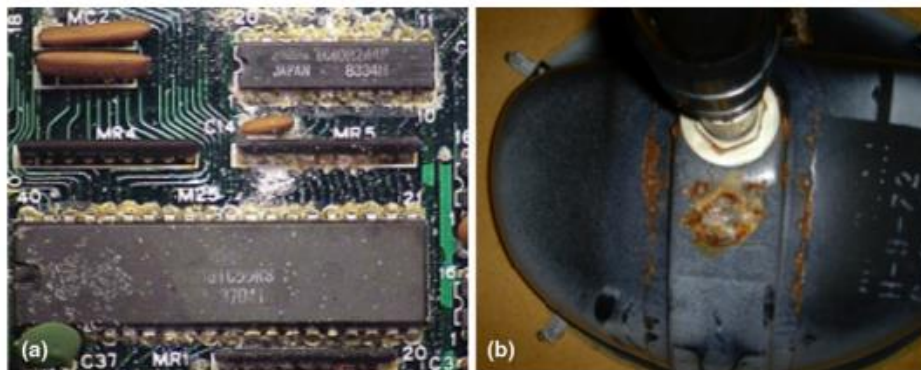
Troškovi kontrole korozije su jednostavni, kao i tehnički troškovi podrške (inženjering, istraživanje, razvoj i testiranje) koji su povezani s korozijom. Troškovi korozije povezani s dizajnom nisu uvijek očit. Posljednja dva elementa, osiguranje i zalihe, mogu biti značajni u određenim slučajevima.

Uz ovih deset kategorija, drugi manje mjerljivi faktori troškova, kao što je gubitak života zbog korozije, može imati veliki utjecaj. Pojedinačni katastrofalni kvarovi (primjerice curenje izazvano korozijom u naftovodu, s rezultirajućim gubitkom proizvoda i onečišćenje okoliša) mogu rezultirati skupom štetom koju je teško procijeniti ili popraviti kao i masivne zakonske kazne.¹

1.5. UTJECAJ KOROZIJE NA DRUŠTVO

Upravo zbog svoje nestabilnosti, mnogi metali i legure podložni su koroziji u Zemljinoj atmosferi, što rezultira njihovom pretvorbom u anorganske spojeve niže energije, kao što su karbonati, sulfidi ili oksidi. Legure i metali koji se danas koriste u inženjerstvu u metastabilnom su stanju te će podlijeći koroziji brzinom koja ovisi o okolišu, osim ako se ne poduzmu koraci njihovog sprječavanja.

Korozija je prisutna u svim inženjerskim materijalima, u okolišu, u životu ljudi, odnosno u svakodnevnim predmetima koje ljudi koriste, u građevinarstvu, arhitekturi, kipovima, skulpturama, umjetnosti i dr. Korozija može rezultirati značajnim financijskim troškovima, onečišćenjem okoliša te, što je još gore, ozljedama i smrću kao najtežim posljedicama korozije. Na slici 26. prikazani su neki oblici korozije prisutni u svakodnevnom životu ljudi.





Slika 26. Svakodnevni primjeri korozije: a) korozija ploče računala, b) pukotinska korozija na donjoj strani umivaonika, c) korozija limenke za hranu, d) rupičasta korozija posrebrnog vrča za vodu, e) korozija mjedene ploče, f) korozija armaturnog čelika izazvana solju za odležavanje u ojačanom betonskom mostu.¹⁵

Dugi niz godina ogromna se pažnja posvećuje problemu oštećenja od korozije i razaranju metalnih materijala. Iskustvo pokazuje da su kvarovi zbog problema s korozijom vrlo važni, a statistika na svjetskoj razini pokazuje da su štete nastale djelovanjem raznih oblika korozije znatne. Značajna sredstva se godišnje izdvajaju za sprječavanje i kontrolu korozije. U slučaju ignoriranja problema korozije kazna je financijska, dok se u drugim slučajevima radi o gubitku ljudskih života.

Kvarovi nastaju kada komponenta ili struktura više ne može izdržati naprezanja koja nastaju tijekom eksploatacije. Obično su posljedica koncentracije stresa i mogu se pojaviti iz više razloga, uključujući strukturne greške (rupe, zarezi i prijelazne zakrivljenosti malih promjera, šupljine u mikrostrukturi materijala) kao i korozivni napadi (rupičaste pojave) koje stvaraju lokalne koncentracije naprezanja.¹⁹

Jedna od najznačajnijih korozijskih katastrofa je eksplozija u tvornici gnojiva i pesticida u Indiji (slika 27.). Kada su čelične cijevi korodirale voda je došla u doticaj sa spremnicima u

kojima se nalazio metilizocijanat. Produkti korozije željeza rezultirali su raznošenje postrojenja pri čemu je došlo do ispuštanja toksičnih plinova i smrti preko 8000 ljudi.^{15,20}



Slika 27. Ostaci tvornice pesticida Bhopal, Indija 1984.g.²⁰

Korozija i okoliš su u međusobnom odnosu i utječu jedno na drugo, mijenjajući se. Sam proces korozije ovisi o dobrim, ali i lošim karakteristikama okoliša, kao i o njegovom zagađenju. Naftni tanker Erika (1999.g.) raspao se na dva dijela i potonuo u Biskajskom zaljevu (slika 28.). Nije bilo žrtava, ali curenje nafte je rezultiralo velikom ekološkom katastrofom, a glavni uzrok nesreće bila je značajna korozija unutarnje strukture broda.¹⁹



Slika 28. Potonuće naftnog tankera.¹⁹

Strukturno oštećenje oplata na zrakoplovu Boeing 737 (Aloha Airlines, 1988. g.), također je doprinio stvaranju svijesti o starenju zrakoplova (slika 29.). Ovaj zrakoplov je stradao zbog vrlo ozbiljnog oštećenja uzrokovanog eksplozivnom dekompresijom tijekom leta. Na 8000 m iznad tla, veliki segment gornjeg dijela trupa bio je doslovno otkinut i napravio je veliku rupu u putničkoj kabini. Istraživanja su otkrila višestruka oštećenja pronađena u obliku pukotina uzrokovanih zamorom koji je doveo do konačnog strukturnog oštećenja.^{19,21}



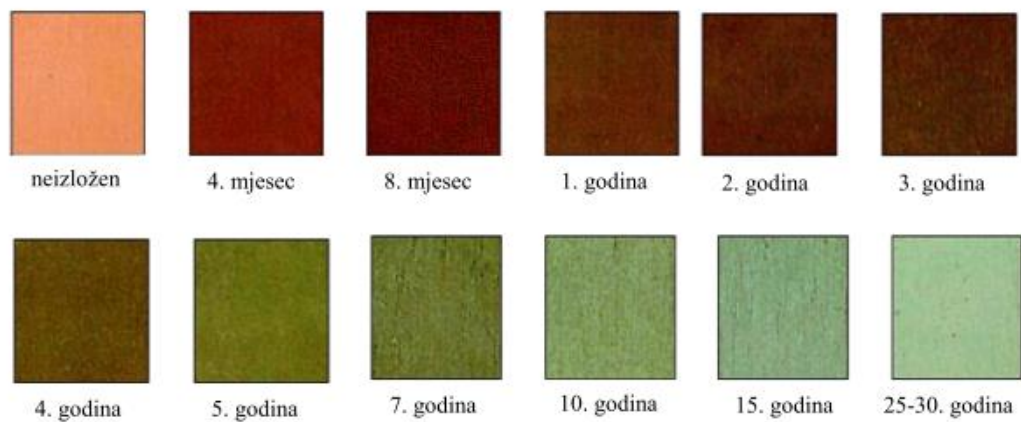
Slika 29. Simulacija leta aviona Boeing 737, Aloha Airlines, let 243.^{19,21}

Iako se korozija uglavnom definira u negativnom kontekstu, postoje oblici korozije koji su prihvatljivi, pa čak i poželjni. To se događa u procesima gdje krajnji rezultati korozije prekrivaju metalne površine te tako štite metal od korozije. Ljudi često koriste ovakve oblike korozije u građevinarstvu i u umjetnosti jer se boja produkata korozije razlikuje od boje metala. Jedan od primjera je atmosferska korozija bakrenih krovova, koja s vremenom dovodi do nastanka patine privlačne zelene boje (slika 30.).



Slika 30. Ljetna palača kraljice Anne, Prag.²²

Budući da svojstva korozivskih produkata ovise o vlažnosti, izloženosti suncu i općenito klimatskim uvjetima, njihova promjena boje rezultira stvaranjem raznih oblika skulptura i umjetničkih djela koje su umjetnici iskoristili. Na slici 31. prikazana je promjena boje patine na bakru tijekom godina.²³



Slika 31. Promjena boje patine na bakru tijekom vremena.²³

2. RASPRAVA

Proučavani su mehanizmi i oblici kemijskog napada te faktori koji utječu na koroziju. Uočavaju se različiti oblici korozije ovisno o mehanizmu djelovanja, korozivnoj sredini i izgledu korozivnog napada. Prema mehanizmu djelovanja korozije postoje elektrokemijska i direktna kemijska korozija. Obzirom na korozivnu sredinu razlikuju se „mokra“ i „suha“ korozija. Mokra korozija odvija se u prisutnosti vode dok se suha odvija u plinovima s višim temperaturama. Na osnovu izgleda korozijskog napada moguća je podjela korozije na opću koroziju, rupičastu koroziju, galvansku koroziju, eroziju-koroziju, koroziju u procijepu, interkristalnu koroziju, selektivnu koroziju i napetosnu koroziju.¹⁻⁴

Faktori koji utječu na brzinu korozije su svojstva metala koji korodira, agresivna okolina koja ga okružuje, fizikalna i kemijska svojstva produkata korozije koja često stvaraju tanki sloj te tako usporavaju koroziju, stanje površine metala (onečišćenja, hrapavost, itd.) i naprezanja koja ubrzavaju kemijsku koroziju. Također visoka temperatura ubrzava korozijske procese jer ubrzava kemijske reakcije.³

Pojedini tehnički materijali kao što su aluminij, željezo, čelik, bakar rijetko se koriste u elementarnom stanju. Radi poboljšanja kemijskih i mehaničkih svojstava dodaju im se drugi metali ili nemetali i tvore slitine ili legure.³

Ekonomski aspekt korozijskih procesa varira ovisno o primjeni materijala. Primjenom adekvatnih materijala otpornih na koroziju troškovi se smanjuju. Na smanjenje troškova korozije također utječe primjena dostupnih tehnologija, transfer tehnologija i istraživanje i razvoj novih materijala dok na povećanje troškova utjecaj imaju ekološki propisi, nepovoljnija okruženja, odgađanje održavanja, zahtjevnije izvedbe i produženje vijeka trajanja materijala.¹

Klimatske promjene vrlo su ozbiljna prijetnja i njihove posljedice utječu na mnoge aspekte naših života. Također prisutnost dušikovih i sumporovih spojeva u atmosferi uzrokuju pojavu kiselih kiša, a one uzrokuju koroziju važnih konstrukcijskih materijala.³

Korozija je prisutna u svakodnevnom životu ljudi te utječe na društvo. Može uzrokovati financijske troškove, onečišćenje okoliša te ozljede i smrt ljudi. Također postoje oblici korozije koji su prihvatljivi i poželjni tj. kada produkti korozije prekrivaju metalne površine te ih tako štite od korozije. Ovi oblici korozije koriste se u građevinarstvu i u umjetnosti jer se boja produkata korozije razlikuje od boje metala.^{15,19}

3. ZAKLJUČCI

Temeljem pregleda literature može se zaključiti:

- Korozijski procesi su spontani procesi između metala i komponenata okoline pri čemu metal prelazi u termodinamički stabilnije stanje.
- Korozija je prisutna u svim aspektima života tj, u inženjerskim materijalima, u okolišu, u životu ljudi, odnosno u svakodnevnim predmetima koje ljudi koriste, u građevinarstvu, arhitekturi, kipovima, skulpturama, umjetnosti i dr.
- Korozijski procesi smanjuju uporabnu vrijednost metala, skraćuju vijek trajanja konstrukcija, povećavaju troškove održavanja, uzrokuju gubitke u proizvodnji, zastoju u radu, havarije, nesreće, ugožavaju zdravlje ljudi, ekološke katastrofe, itd.
- Klimatski čimbenici kao što su temperatura, kisele kiše, vlažnost zraka, UV zračenja, znatno potiču koroziju. Kisele kiše sadrže visoku koncentraciju kiselina koje direktno oštećuju površinu metala, dok visoka vlažnost i visoke temperature dodatno doprinose tom procesu.
- Ekonomsko značenje korozije je veliko i ono raste s primjenom neadekvatnih materijala osjetljivih na koroziju. Ukupni troškovi uzrokovani korozijom mogu se smanjiti primjenom korozivno otpornih materijala, poboljšanjem prakse za sprječavanje korozije i ulaganjem u istraživanja vezana uz koroziju.

4. LITERATURA

- [1] *J. R. Davis*, Corrosion: Understanding the Basic, ASM International, USA, 2000.
- [2] *I. Eshil*, Osnove površinske zaštite, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2003.
- [3] *E. Stupnišek-Lisac*, Korozija i zaštita konstrukcijskih metala, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2007.
- [4] *S. Mladenović, M. Petrović, G. Rikovski*, Korozija i zaštita materijala, Hemijsko-tehnološki priručnik, Rad, Beograd, 1985. g.
- [5] URL: <https://pixnio.com/free-images/2018/09/22/2018-09-22-00-11-00-1152x702.jpg>
(7.7.2023.)
- [6] URL: <https://pixnio.com/free-images/2018/09/21/2018-09-21-23-55-04-1152x600.jpg>,
(7.7.2023.)
- [7] *E. Stanić*, Osnove elektrotehnike, Školska knjiga, Zagreb, 2007.
- [8] *E. McCafferty*, Introduction to Corrosion Science, Springer, New York, 2010.
- [9] *P. Marcus, J. Oudar*, Corrosion mechanisms in theory and practice, Marcel Dekker, Inc, New York, 1995.
- [10] *M. Güner, M. M. Özbayer*, Wear and its Effects in Centrifugal Pumps, YYU J AGR SCI, **29** (2019.) 569-582, <https://doi.org/10.29133/yyutbd.518139>
- [11] URL: <https://kta.com/kta-university/preventing-crevice-corrosion-steel-structures/>
(13.7.2023.)
- [12] URL: <https://www.ampp.org/technical-research/impact/corrosion-basics/group-2/exfoliation>
(13.7.2023.)
- [13] *M. Posada, L. K. Murr, C. S. Niou, D. Roberson, D. Little, R. Arrowood, D. George*, Exfoliation and related microstructures in 2024 aluminum body skins on aging aircraft, Materials Characterization, **38** (1997.), 259.

- [14] URL: https://bib.irb.hr/datoteka/843434.KEMIJSKA_POSTOJANOST.pdf
(14.7.2023.)
- [15] *C. M. Hansson*, The Impact of Corrosion on Society, *Metall Mater Trans A*, **42** (2011), 2952–2962, <https://doi.org/10.1007/s11661-011-0703-2>
- [16] *M. Horvat, I. Samardžić, V. Kondić*, *Napetosa korzija*, ISSN 1864-6168, <https://hrcak.srce.hr/file/124726>
- [17] *R. H. Jones*, *Stress corrosion cracking*, ASM International, Mat. Park, 1992.
- [18] URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Silver_Bridge (14.7.2023.)
- [19] *Z. C. Petrović*, Catastrophes caused by corrosion, *Military Technical Courier*, **64** (2016.) 1048-1064, DOI:[10.5937/vojtehg64-10388](https://doi.org/10.5937/vojtehg64-10388)
- [20] URL: <https://medium.com/kayla-anderson/the-1984-bhopal-disaster-in-india-a-message-for-industrialists-10abb3d1e8b6> (20.7.2023.)
- [21] *D. Miller*, *Corrosion Control Aging Aircraft: What is being done?*, *Materials Performance*, 1990.
- [22] URL: <https://www.tourismato.cz/hr/praha-letohradok-kralovny-anny-belveder-p129956#gallery-1> (21.7.2023.)
- [23] URL: <https://crescentcitycopper.com/why-does-copper-turn-green/> (21.7.2023.)