

Korozija i zaštita konstrukcije broda

Škuflić, Chiara

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Istrian University of applied sciences / Istarsko veleučilište - Università Istriana di scienze applicate**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:212:221901>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-24**



image not found or type unknown

Repository / Repozitorij:

[Digital repository of Istrian University of applied sciences](#)



image not found or type unknown

ISTARSKO VELEUČILIŠTE -
UNIVERSITÀ ISTRIANA DI SCIENZE APPLICATE

Chiara Škuflić

KOROZIJA I ZAŠTITA KONSTRUKCIJE BRODA

Završni rad

Pula, 2021.



ISTARSKO VELEUČILIŠTE -
UNIVERSITÀ ISTRIANA DI SCIENZE APPLICATE

Chiara Škuflić

KOROZIJA I ZAŠTITA KONSTRUKCIJE BRODA

Završni rad

JMBAG: 02330080989, izvanredna studentica

Studijski smjer: Politehnika

Kolegij: Tehnologija i proizvodna tehnika 2

Mentor: dr.sc. Davor Stanić, dipl. ing.

Pula, 2021.





IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Ja, dolje potpisana Chiara Škuflić, kandidatkinja za stručnu prvostupnicu inženjera politehnike ovime izjavljujem da je ovaj Završni rad rezultat isključivo mogega vlastitog rada, da se temelji na mojim istraživanjima te da se oslanja na objavljenu literaturu kao što to pokazuju korištene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da niti jedan dio Završnog rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz kojega necitiranog rada, te da ikoji dio rada krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za koji drugi rad pri bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili radnoj ustanovi.

U Puli, 2021. godine

Studentica



IZJAVA

o korištenju autorskog djela

Ja, Chiara Škuflić dajem odobrenje Istarskom veleučilištu – Università Istriana di scienze applicate, kao nositelju prava iskorištavanja, da moj završni rad pod nazivom "Korozija i zaštita konstrukcije broda" koristi na način da gore navedeno autorsko djelo, kao cjeloviti tekst trajno objavi u javnoj internetskoj bazi Sveučilišne knjižnice u Puli te kopira u javnu internetsku bazu završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice (stavljanje na raspolaganje javnosti), sve u skladu s Zakonom o autorskom pravu i drugim srodnim pravima i dobrom akademskom praksom, a radi promicanja otvorenoga, slobodnoga pristupa znanstvenim informacijama.

Za korištenje autorskog djela na gore navedeni način ne potražujem naknadu.

U Puli, 2021. godine

Potpis

Sadržaj

1. Uvod	7
1.1. Problem i objekt istraživanja	7
1.2. Ciljevi rada	8
1.3. Metode rada	8
1.4. Hipoteza rada.....	9
1.5. Struktura rada	9
2. Korozija.....	10
2.1. Korozija općenito.....	11
2.1.1. Povijest korozije i zaštite od korozije	11
2.1.2. Kemijski procesi korozije željeza	12
2.1.3. Termodinamički uzrok korozije	16
2.2. Oblici korozije.....	16
2.2.1. Prema mehanizmu korozije	17
2.2.2. Prema geometrijskom obliku korozije	17
2.2.2.1. Opća korozija	18
2.2.2.2. Lokalizirana korozija	19
2.2.2.3. Galvanska – bimetalna korozija	21
2.2.3. Prema materijalu korozije	22
2.2.5. Posebne vrste korozije	23
2.2.5.1. Zamorna korozija	23
3. Tehnike zaštite od korozije	25
3.1. Konstrukcijske mjere	25
3.1.1. Odabir materijala otpornijeg na koroziju.....	26
3.2. Katodna zaštita	26
3.2.1. Pasivna katodna zaštita.....	27

3.2.2. Katodna zaštita narinutom strujom	29
3.3. Primjena korozijskih inhibitora.....	30
3.4. Zaštita prevlačenjem	31
3.4.1. Priprema površine za prevlačenje	31
3.4.1.1. Mehanička priprema	32
3.4.1.2. Elektrokemijska i kemijska priprema	32
3.4.1.3. Odmašćivanje	33
3.4.2. Zaštita metalnom prevlakom.....	34
3.4.2.1. Galvanizacija.....	34
3.4.3. Zaštita anorganskom prevlakom – površinskom obradom	36
3.4.4. Zaštita organskom prevlakom.....	36
4. Zaštita od korozije konstrukcije broda.....	38
4.2. Sustavi katodne zaštite	40
4.2.1. Pasivna katodna zaštita.....	40
4.2.2. Katodna zaštita narinutom strujom	42
5. Zaključak	45
LITERATURA	46
POPIS SLIKA	49
Sažetak.....	50
Abstract	50

1. Uvod

U ovom završnom radu je opisana problematika nastanka procesa korozije i objašnjeni su postupci i mehanizmi zaštite od korozije na konstrukciji broda. Korozija je u svojoj osnovi iznimno štetna pojava propadanja materijala i kao takva veoma važna tematika proučavanja strojarstva. Njeni oblici, uzroci i načini djelovanja čine ju aktualnom problematikom gotovo svakog strojarskog područja. Od posebne je važnosti kada se o njoj govori u polju konstrukcija gdje dugotrajni učinci korozije moraju biti uzeti u obzir, ali jednako tako se mora i planirati adekvatna korozijska zaštita za navedene konstrukcije čime se osigurava njihova osnovna funkcionalnost, ali i dugotrajnost i samim time bolja eksploatacijska svojstva stroja ili konstrukcije na dulji rok. Zaštita je također polje koje je moguće sagledati pomoću različitih tehnika koje su prisutne za zaštitu osnovnog materijala, a prikaz antikorozivnih postupaka bez prethodno temeljito obrađene tematike korozije i njene prirode daje nepotpunu sliku i sprječava potpuno razumijevanje. Tek kroz potpuni prikaz svih oblika korozije, tehnika zaštite protiv korozije, te prikazom primijenjenih tehnika na konstrukciji broda moguće je dobiti cjelokupnu sliku jednog polja strojarstva i metalurgije u modernoj brodogradnji.

1.1. Problem i objekt istraživanja

Kao što je spomenuto u uvodu, osnovni problem istraživanja u završnom radu je sprječavanje korozije u svim njenim oblicima na konstrukciji broda. Predmet istraživanja je nastajanje korozije i osnovne tehnike kojima se sprječava korodiranje strojarskih dijelova. Objekt nad kojim se vrši istraživanje je priroda korozije, njeni uzročnici i faktori koji doprinose njenom stvaranju. Nastavno na navedeno stvara se osnovni teoretski okvir proučavanja korozije unutar kojega se prikazuju različite metode zaštite od nje kao i njihovi osnovni mehanizmi s kojima štite predmet od korozije. Svaka od prikazanih tehnika ima različite mehanizme putem kojih sprječava nastanak korozije i time omogućuje bolju i dugotrajniju eksploataciju strojarske konstrukcije ili stroja.

1.2. Ciljevi rada

Osnovni ciljevi ovoga rada su višestruki i multidisciplinarni, jer u svom zahvatu obrađuju odabrane tematike iz područja strojarstva, kemije i fizike, no u kratkim crtama moguće ih je prikazati na sljedeći način:

- Dati kratko objašnjenje korozije, njezin utjecaj i nastanak kroz kemijsku perspektivu i kroz strojarstvo materijala prikazati važnost unutar strojarstva.
- Prikazati osnovne čimbenike korozije.
- Dati uvid u različite oblike korozije.
- Prikazati sustave zaštite od korozije i njihove mehanizme djelovanja.
- Primijeniti znanja iz prethodnih poglavlja na primjeru konstrukcije broda i najraširenijih metoda korozivne zaštite konstrukcije i trupa broda.

1.3. Metode rada

Prilikom pisanja ovoga rada korištene su sljedeće znanstvene metode:

- Povijesna metoda je korištena pri proučavanju povijesnih izvora za pojedinačne povijesne činjenice koje su izložene unutar ovoga rada.
- Metoda analize i sinteze korištena je kod prikazivanja i sintetiziranja različitih znanja potrebnih vezanih uz osnove rada, prilikom analiziranja literature i sinteze saznanja u tekst ovoga rada.
- Metoda dokazivanja i opovrgavanja korištena je prilikom dokazivanja ili opovrgavanja hipoteze ovoga rada naspram saznanja stečenih prilikom proučavanja literature.
- Metoda deskripcije je korištena prilikom opisivanja sustava zaštite od korozije, ali i prilikom opisa samih korozivnih pojava i njenih uzročnika.

1.4. Hipoteza rada

Hipoteza ovoga rada se tiče problematike nastanka korozije na sustavima broda. Pojedinačno, ona glasi: Sustavi zaštite konstrukcije broda zahtijevaju više različitih načina zaštite kako bi se osigurala potpuna zaštita od nepoželjnih korozivnih pojava.

1.5. Struktura rada

Struktura ovoga rada je podijeljena na pet poglavlja:

- Kroz uvod daje se osnovni uvod u tematiku, prikazuje se problem istraživanja, objekt istraživanja i daje se cjelokupan prikaz rada u cjelini kroz njegovu strukturu.
- Unutar poglavlja „Korozija“ daje se osvrt na povijest korozije, njezine posljedice za strojarne strukture. Dodatno, prikazuje se par najosnovniji vrsta korozije s pripadajućim dijagramima tijekom pomoću kojih do njih dolazi, kao i grubo razvrstavanje korozije prema manifestiranom obliku.
- Treće poglavlje, „Tehnike zaštite od korozije“ bavi se temeljito tehnikama zaštite, gdje se one primjenjuju i nakon kratkog uvoda detaljnije se ulazi u najraširenije oblike zaštite korozije u modernom strojarstvu gdje se time prikazuju njihove prednosti i mane kao i polja primjene.
- Četvrto poglavlje, „Zaštita od korozije konstrukcije broda“, je svojevrsna sinteza prethodnih saznanja i prikaz tehnika kojima se štite od korozije različite brodske konstrukcije i osigurava njihov dulji eksploatacijski vijek.
- Peto poglavlje „Zaključak“ daje kratak opis svega što je prikazano kroz rad kao i rezimira i zaključuje rad sa stečenim saznanjima tijekom pisanja koja su opisana u prethodnim poglavljima.

2. Korozija

Koroziju odlikuje njena sveprisutnost nad gotovo svim materijalima. Posebice su njoj skloni metalni materijali, a time ona ima posebno mjesto u strojarскоj branši, gdje se oblikovanje i izrada strojarskih elemenata, tj. u pravilu od metalnih materijala, smatra osnovom struke. Ona je kompleksni i složeni proces pomoću kojega dolazi do promjene rafiniranog metala ili legure u okside, sulfate i druge kovalentne molekule koje su termodinamički znatno stabilnije u zemljinoj atmosferi od čistih elementarnih metala.

Strojarstvo je kroz njegovu povijest razvoja procvatelo tek kada su nastali alati s kojima je postalo moguće manipulirati metalima do izuzetne preciznosti, ali već i njegovim samim začecima, sveprisutnost korozije i time njena zaštita je postala od iznimne važnosti. Korozija željeza prikazana na slici 1., je osnovni primjer korozije koja se u naknadnom poglavlju detaljno prikazuje iz kemijske i fizikalne perspektive, no ona kao takva nije ograničena na željezo. Korozija na ostalim metalima je u ponekim slučajevima čak i poželjna osobina, a istovremeno korozija koja po svojoj definiciji označava promjenu osnovnog materijala zbog doticaja s vanjskim čimbenicima može jednako tako se odnositi na druge materijale koji po svojoj prirodi nisu metali. Nemetalna korozija je time prisutna u keramikama i polimernim materijalima gdje je, nerijetko, također negativna pojava i negativno utječe na osnovnu funkcionalnost i/ili trajnost predmeta. Iz tog je razloga važno proučiti povijesne pristupe koroziji i njenoj zaštiti kako bi se omogućilo modernom inženjeru adekvatne alate za konstruiranje i stvaranje budućih strojeva.

Slika 1. Primjer hrđanja željeza



Izvor: <https://monroeengineering.com/blog/wp-content/uploads/2017/06/chain11.jpg>

2.1. Korozija općenito

Korozija je kao takva iznimno nepoželjna pojava te se ovakvim pristupom daje prikaz ograničenja koje je strojarstvo pretrpjelo kroz svoju povijest zbog korozije, ali i moderna teorija korozije koja nam je omogućila bolje i efikasnije metode njene zaštite o čemu će više biti riječi u sljedećim poglavljima.

2.1.1. Povijest korozije i zaštite od korozije

Strojarstvo je kroz svoju povijest bilo iznimno ograničeno zbog korozije. Čovjek je u svojoj prošlosti prvo oblikovao metale koje je mogao pronaći relativno čiste u prirodi: zlato i bakar. Sljedeći koraci su bili napreci u stvaranju slitina bakra s kositrom, čime je započelo brončano doba civilizacije. Pravi zamah usprkos tome, započinje, tek 1500 godina prije nove ere, kada je došlo do otkrića rafiniranja željeza iz željezne rude i stvaranjem prvih željeznih alata. Upravo je tim prvim željeznim alatima započela borba tadašnjih izumitelja, i zanatlija, a danas inženjera s pojavom korozije. Korozija je time postala pojava koja se očekivala na željeznim predmetima te je, kako bi iskoristili sve prednosti željeznog alata, bilo potrebno osmisliti načine zaštite od korozije. U njenim počecima se to izvodilo mašćenjem ili lakiranjem željeza. Osim navedenih premaza, posebne načine zaštite je bilo moguće ostvariti posebnim postupcima tijekom kovanja kojima su se dobivale legure koje su manje ili više otporne na pojavu korozije. Dapače, povjesničari su uočili višu koncentraciju ugljika u drevnim željeznim predmetima nego što je to slučaj u današnjem, modernom željezu, čime se daje naslutiti da je navedeno izvedeno s namjerom bolje otpornosti na koroziju i duljem eksploatacijskom vijeku oruđa. Osim višem udjelu ugljika, antičko željezo je manje sklono koroziji zbog manjeg udjela sumpora koje se danas nalazi već u samom zraku zbog industrijske revolucije i korištenja fosilnih goriva. Iako je korozija bila štetna pojava, prvi napreci ka njezinom razumijevanju su ostvareni krajem 18. stoljeća kada je otkriveno da voda u doticaju sa željezom postaje lužnata. Pronalazak je Austin pogrešno pripisao amonijaku koji nastaje u takvom doticaju, kao dokaz tadašnjeg slabog razumijevanje periodnog sustava elemenata.

Napredak je i uz navedenu lošu pretpostavku nastavio, te je 1819. kemičar Thenard pripisao koroziju kao rezultat elektrokemijskih procesa unutar materijala.¹ Na njegov rad su se nastavili Faraday i Davy koji su u periodu od 5 godina tijekom 1820-ih godina otkrili mehanizme katodne zaštite metala.²

Time je osim prethodnih premaza, katodna zaštita postala još jedan alat i tehnika za borbu protiv korozije. Prve primjene su nedugo zatim prikazane na pojedinim plovilima britanske mornarice pomoću oblaganja dna bakrom, a kasnije su razvitkom zaštitnih premaza, tehnika postavljanja, pripreme ali i teoretskih osnova stvoreni preduvjeti za zaštitu današnjih konstrukcija brodova kakve poznajemo danas. Neovisno o navedenom, zaštita katodnom zaštitom je revolucionarizirala brodogradnju čime je stvoren preduvjet za današnju gradnju najsloženijih strojeva koje je ljudska ruka ikad stvorila, a sve zahvaljujući temeljnoj teoriji i razumijevanju korozije kao kemijskog procesa u svojoj osnovi.

2.1.2. Kemijski procesi korozije željeza

Korozivne procese je moguće promatrati iz perspektive elektrokemije. Uzme li se u obzir najraširenija pojava korozije: korozija željeza, moguće je prikazati njegove kemijske procese radi kojih dolazi do same korozije i time izolirati čimbenike korozije. Važno je napomenuti kako drugi materijali također prolaze kroz svoje specifične oblike kemijske korozije, no za svrhe ovoga rada dan je primjer iz svakodnevnog života

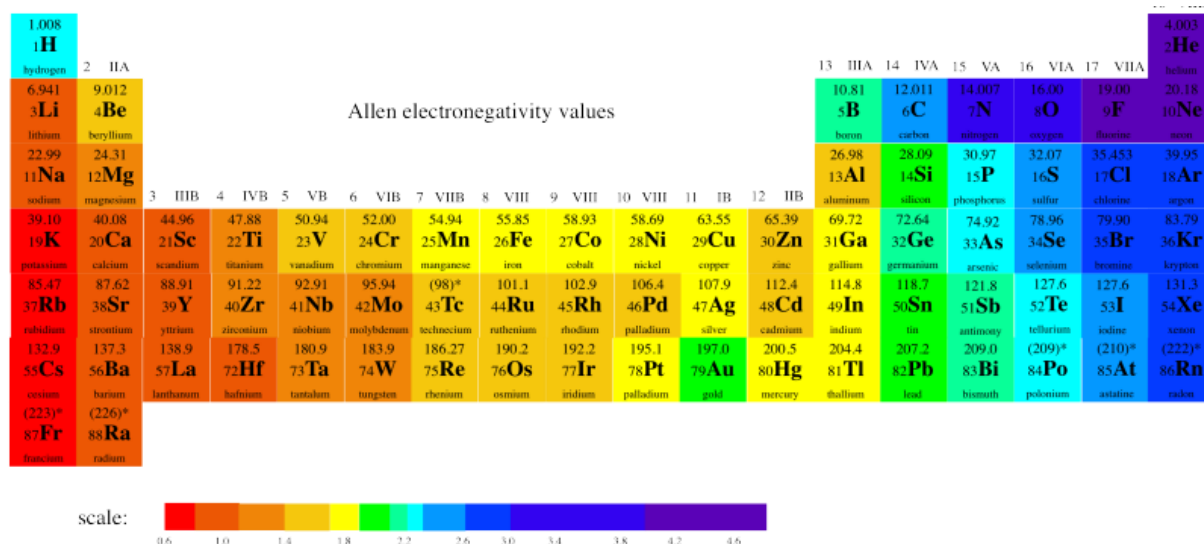
U slučaju da željezo i kisik dođu u izravan dodir s vodom u bilo kojem njezinom agregatnom stanju (primjerice voda u obliku vodene pare u zraku na sobnoj temperaturi, moguće ju je mjeriti kao „otopljenu“ vodu u zraku, tj. vlažnost zraka) dolazi do elektrokemijske reakcije zbog izražene razlike u elektronegativnosti koje ima željezo naspram kisika, tj. vodene pare u ovom slučaju. Unutar takve reakcije željezo posjeduje pozitivnu elektronegativnost, tj. tendenciju da gubi elektrone i stvara pozitivne ione – katione.

¹ Ulick R., E. (1948.) "Historical Theories on Corrosion", Corrosion Doctors

² Rajendran, S. (2018). Corrosion-Yesterday, Today and Tomorrow. Oriental Journal of Physical Sciences, br. 3. str. 68.-74.

S druge strane, kisik zbog svoje valencije ima visoko izraženu negativnu elektronegativnost, tj. tendenciju za stvaranje negativnih iona privlačenjem elektrona – aniona. U slučaju dvaju tako, suprotno nabijenih elemenata, važno je kvantificirati njihove potencijale za stvaranjem iona. Navedeno se postiže tablicom elektronegativnog potencijala. Vidljivom za cijeli periodni sustav elemenata na slici 2.

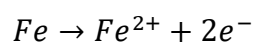
Slika 2. Periodni sustav elemenata prikazan prema elektronegativnosti



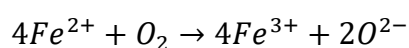
Izvor: <https://employees.csbsju.edu/cschaller/Reactivity/redox/PTCodeENeg.png>

Time se stvara tzv. redoks (skraćeno od redukcija i oksidacija) reakcija. Željezo prolazi kroz oksidaciju, a kisik kroz redukciju. Kada se navedena dva elementa nađu u bliskom kontaktu, kisik reducira, dok željezo oksidira. Oksidacija željeza je elektrokemijski toliko povoljna reakcija da se ona događa i u slučajevima kada je kisik vezan uz elemente znatno manje elektronegativnosti, poput vodika. No u takvim slučajevima potrebno je do krajnjeg oksida proći kroz više različitih redoks reakcija. Redosljed reakcija prikazan je sljedećim tijekom:

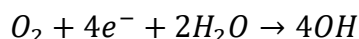
1. Željezo se prvo reducira i oslobađa svoja dva elektrona:



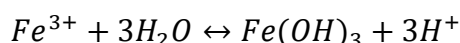
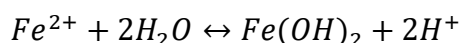
Dodatni izvor kationa željeza daje i sljedeća, pomoćna reakcija::



2. Slobodni kisik u zraku prolazi kroz oksidativnu reakciju u doticaju s vodom i stvara lužnate hidroksidne baze:

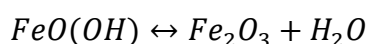
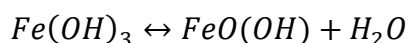
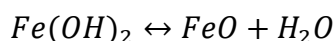


3. Kationi željeza potom reagiraju s vodom kako bi stvorili željezne hidrokside kroz sljedeće dvije reverzne reakcije:



Značaj činjenice što su ove reakcije reverzne je u tome što su one ravnotežne. Ravnotežne reakcije uvijek nastoje ostati u pojedinom stanju ravnoteže i reagiraju tek na promjenu vanjskih uvjeta zbog čega dolazi do neravnoteže elemenata reakcije s jedne ili druge strane. Ako ne dođe do promjene vanjskih uvjeta, jednadžbe ravnoteže bi se odvijale samo do određene mjere, već stalne, sitne promjene uzrokuju koroziju!

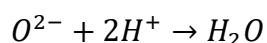
4. Ako zbog vanjskih uvjeta dođe do većeg broja željeznih hidroksida, lančano započinju sljedeće jednadžbe ravnoteže čime nastaju željezni oksidi:



Željezni oksidi koji nastanu ovim putem ovise o koncentraciji kisika u samom zraku ili mediju gdje se korozija događa. Trend koji je tu uočljiv je da s većom koncentracijom kisika dolazi do povećanog udjela težeg oksida Fe_2O_3 , što i ima smisla s kemijske perspektive ravnoteže kemijskih reakcija kako bi se neutralizirao višak kisika.³

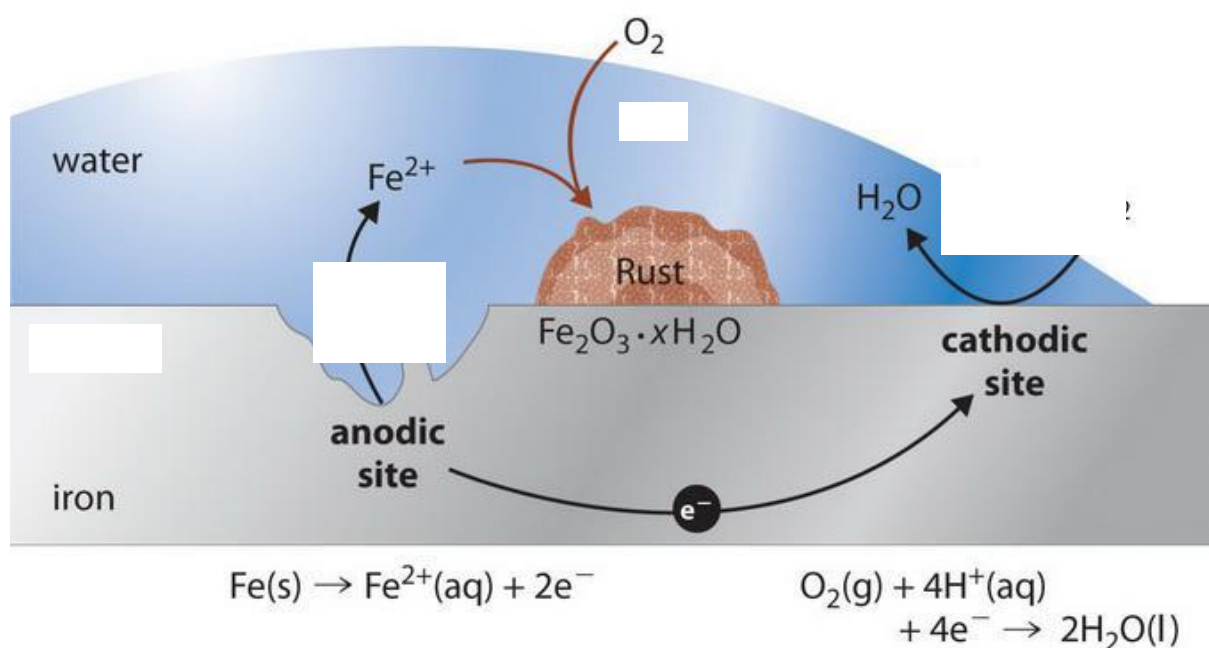
5. Iz prethodnih reakcija, viškovi iona se ponovo kemijski spajaju u vodu i time mogu ponovo započeti ciklus korozije:

³ Perez, N., (2004.), *Electrochemistry and Corrosion Science*, Mayaguez: Springer



Dodatno, voda potom prodire u kristalnu strukturu između molekula hrđe i time stvara hidrat što dodatno negativno utječe na njegove strojarske osobine i dovodi do izrazito slabe čvrstoće hrđe naspram čistog, elementarnog željeza. Proces hrđanja prikazan je na slici 3.

Slika 3. Prikaz elektrokemijskih procesa prilikom hrđanja željeza



Izvor: https://puntomariner.com/images/electrochemical-corrosion-and-protection-against_3.jpg

Za ovaj prethodno opisani proces moguće je nabrojati različite uvjete pomoću kojih dolazi do korozije:

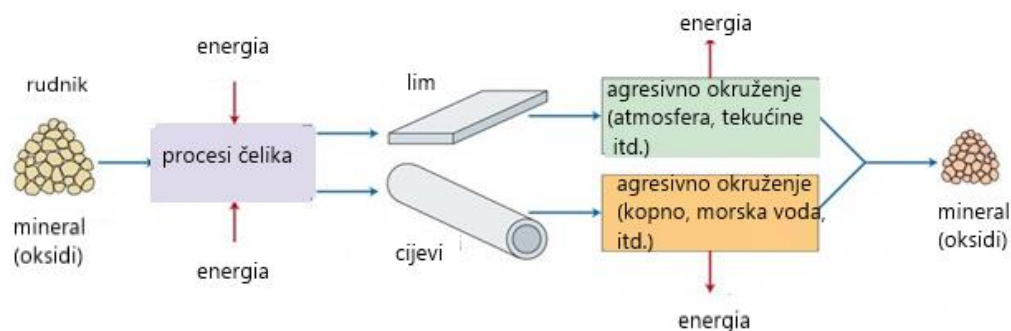
- Postojanje razlike potencijala između osnovnog materijala i okoliša.
- Direktni dodir reaktanata iz okoliša s osnovnim materijalom
- Postupna izmjena i promjena okolišnih uvjeta kako bi pogonili redoks reakcije.

Zaključak koji se može izvući iz ovoga je kako se cjelokupni proces može zaustaviti u slučaju da se ukloni jedan ili više čimbenika korozije.

2.1.3. Termodinamički uzrok korozije

Osim iz perspektive čiste kemije, moguće je promatrati koroziju kao fizikalni, termodinamički proces. Uslijed djelovanja atmosfere stabilno stanje većine elemenata čine molekule oksida, sulfata i dr., dok je elementarno stanje termodinamički nestabilno. Teorija termodinamike nam nalaže kako će navedeno stanje tijekom vremena pronaći kemijski put kako doći do oksidiranog stanja i time sebe dovesti u ravnotežno stanje. Navedeno je prikazano na slici 4.

Slika 4. Prikaz termodinamičkih procesa prilikom rafiniranja i oksidiranja željeza



Izvor: https://790331.smushcdn.com/1565578/wpcontent/uploads/2020/04/processi_corrosione_NG-02.jpg

2.2. Oblici korozije

Nasuprot prethodnom poglavlju koje se bavilo općim uzrocima korozije, korozija je jednako tako i specifična po obliku koji se pojavljuje ovisno o mehanizmu koji ju uzrokuje. Motivacija iza takve podjele leži u činjenici što se drugačije vrste korozije sprječavaju drugačijim tehnološkim metodama protiv korozije.

Ukratko, oblici korozije se mogu podijeliti prema više različitih kriterija:

- Prema mehanizmu koji uzrokuje koroziju
- Prema geometrijskom obliku same korozije
- Prema materijalu koji korodira

Osim ovih oblika korozije, postoje i posebne kategorije korozije koje iziskuju prethodno pažljivo planiranje kako bi se spriječile, a važne su u radu inženjera strojarstva. Naveden posebne vrste se navode u dodatnom potpoglavlju i objašnjava se njihov značaj u konstrukcijama.

2.2.1. Prema mehanizmu korozije

Osim prethodno prikazane *elektrokemijske korozije* željeza, prema procesu nastanka, može postojati još i *kemijska korozija*.

Razlika se temelji u sredstvu u kojemu se pojavljuje korozija, tj. pojavljuje li se uz elektrolit poput vode ili zraka ili ako takav elektrolit ne postoji:

- *Elektrokemijska korozija*
 - Zahtijeva prisustvo elektrolita.
 - Primarno nastaju slobodni ioni.
 - Postoje sekundarni procesi kojima nastaju produkti korozije.
 - Primjer: Hrđanje željeza u dodiru s vlagom u zraku i kisikom kroz više različitih sekundarnih redoks reakcija.
- *Kemijska korozija*
 - Ne zahtijeva elektrolit.
 - Atom osnovnog materijala direktno reagira s molekulama drugog spoja iz okoliša.
 - Nema sekundarni procesa.
 - Ne nastaju slobodni ioni, već kemijskom korozijom direktno nastaju produkti.
 - Primjer: Nagrizanje željeza sumpornom kiselinom čime nastaju sulfati željeza.

2.2.2. Prema geometrijskom obliku korozije

Sam geometrijski oblik korozije obuhvaća drugačije vrste procesa koji vladaju korozijom. Prema ovoj podjeli, klasifikacija korozije glasi:

- Opća korozija:
 - Ravnomjerna
 - Neravnomjerna
- Lokalna korozija

Važno je uočiti kako lokalna korozija može imati značajne različitosti ovisno o samom obliku te se iz tog razloga ona dijeli dodatno na:

- Pjegasta (školjkast) lokalna korozija.
- Točkasta lokalna korozija (*eng. pitting*).
- Kontaktna lokalna korozija
 - Bimetalna – Poznatija kao galvanska korozija zbog nastajanja galvanskog članka.
 - Pukotinska
- Potpovršinska lokalna korozija
- Selektivna lokalna korozija
- Interkristalna lokalna korozija

2.2.2.1. Opća korozija

Opća korozija je jedna od posebnih vrsta korozija i ona se uobičajeno pojavljuje po cijeloj površini elementa. Javlja se u pravilu zbog direktnog dodira s korozivnim medijem. Okoline koje čine takvu vrstu korozije mogu biti lužnate ili kisele, tj. imati visok ili nizak pH. Ravnomjerno djeluje po cijeloj površini elementa i zbog navedenog se ona mora uzeti u obzir prilikom projektiranja konstrukcija. Navedena vrsta korozije je sveprisutna na objektima morske tehnologije poput brodova, platformi, molova i dr. Nagrizajuće okoline ne moraju biti samo tekućine, već to mogu biti i plinovi poput vlažnog zraka s primjesama sumporovodika koji stvara korozivne kapljice koje utječu na osnovni materijal i time stvaraju izrazito korozivno djelovanje na površini, gdje mogu nastati sulfatni spojevi naspram klasične korozije, gdje nastaju oksidi. Primjer ovakve vrste korozije vidljiv je na slici 5., gdje je tijelo u konstantnom dodiru s nagrizajućom okolinom morske površine.

Slika 5. Primjer opće korozije vijka



Izvor: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4d/Rust_screw.jpg

2.2.2.2. Lokalizirana korozija

Lokalizirana korozija po svojoj prirodi ima znatno različit oblik koji je moguće prepoznati na osnovnom strojnom elementu. Vidljiva je po svojem lokalnom djelovanju, tj. u obliku pukotina koje se javljaju unutar samog predmeta. Po svojoj prirodi znatno je opasnija od opće korozije, jer uništava strukturalnu čvrstoću predmeta i zbog toga dovodi do moguće opasnosti ka gubitku stabilnosti konstrukcije. Kako je ona karakterizirana geometrijskim oblikom koji korozija poprima, ona po svojoj prirodi može biti raznolika, a prilikom planiranja konstrukcija od nehrđajućeg čelika važno je spomenuti točkastu koroziju kao klasičan primjer.

Točkasta korozija je korozivna pojava na nehrđajućim čelicima kod koje nastaju različite površine pukotine – rupe (*eng. pits*). Po svojem obliku moguće je vidjeti podjelu na slici 6. Karakterizira ju činjenica što se ona događa na dijelovima koji su u konstantnom kontaktu i trenju s drugim materijalima gdje dolazi do mikrozavara,

lokaliziranih galvanskih članaka i drugih korozivnih pojava koje utječu na njen krajnji oblik.

Osnovni mehanizam zaštite materijala od pitting korozije je pravilan odabir nehrđajućeg čelika. Navedeno je moguće odrediti prema iskustveno dobivenoj PREN formuli.

PREN faktor je moguće proračunati prema udjelima kroma, molibdena i nikla unutar legure čelika:

$$PREN = 16 \cdot (\text{maseni postotak Ni}) + (\text{maseni postotak Cr}) + 3.3 \cdot (\text{maseni postotak Mo})$$

Razlog za uzimanje u obzir upravo ovih elemenata pri korištenju formule je u činjenici što unutar zemljine atmosfere svi su metalni materijali obavijeni pasiviziranim slojem oksida, a pri konstantnom trljanju i mehaničkom dodiru dolazi do njegovog postupnog gubitka čime se dopušta utjecaj vanjske atmosfere na sve dublje slojeve i time dolazi do gubitka same strukturalne čvrstoće, ako se nije pravilno proveo proces konstrukcije ili strojarski element nije bio pravilno održavan, što je češći slučaj u praksi.

Slika 6. Vrste pitting korozije nehrđajućih čelika



Izvor: Stefanovski, T. (2015.) Utjecaj temperature na efikasnost antikorozivne zaštite

2.2.2.3. Galvanska – bimetalna korozija

Galvansku koroziju karakterizira elektrokemijski proces. U literaturi ju se najčešće naziva bimetalnom korozijom zbog karakterističnosti da nastaje na kontaktnoj-dodirnoj površini između dva različita metala. Posebno je značajna za bimetalne temperaturne sklopke poput onih na električnim bojlerima tople vode, radiatorima i sl.

U svojoj osnovi radi se o galvanskim strujama koje nastaju zbog različitosti prethodno spomenutog i prikazanog elektronegativnog potencijala. Pojedini metali imaju veći elektronegativnost i značajno jače prihvaćaju elektrone, dok pojedini metali slabije.

Iz tog razloga dolazi do nejednakosti elektronskih oblaka i nastanka kationa i aniona. Nakon nastanka metalnih iona, u pravilu dolazi do kemijske reakcije anionskih iona sa zrakom direktno ili putem drugih kemijskih reakcija čime nastaju oksidativni kemijski spojevi – oksidi. Unutar ovakve reakcije dolazi do zaštite katoda, tj. kationskih elementa, nauštrb korozije anodnog metala. Prikaz procesa moguće je vidjeti na slici 7.

Slika 7. Primjer galvanske korozije oplata oko vijka



Izvor: <https://www.belmontmetals.com/wp-content/uploads/2018/03/galvanic-corrosion-prevention.jpg>

Jedini način kako se izboriti protiv ovakve korozije je pravilan odabir metala i njihovo fizičko odvajanjem fizikalnom, najčešće gumenom barijerom poput podloške. Tablica metalnih elektroda i njihova primjenjivost vidljiva je na slici 8.

Slika 8. Tablični prikaz čestih metala i mogućnosti pojave galvanske korozije. Crveno označava nastanak galvanske korozije po anodnom metalu ako su u bliskom kontaktu

Anodni metali	Katodni metali																		
	Mg i legure	Zn i legure	Al i legure	Kadmij	Ugljični čelici	Lijevano željezo	Nehrđajući čelici	Pb, Sn i legure	Nikal	Mjedi, Ni-Ag legure	Bakar	Bronce, Cu-Ni legure	Ni-Cu legure	Ni-Cr legure	Titanijs	Srebro	Grafit	Zlato	Platina
Mg i legure																			
Zn i legure																			
Al i legure																			
Kadmij																			
Ugljični čelici																			
Lijevano željezo																			
Nehrđajući čelici																			
Pb, Sn i legure																			
Nikal																			
Mjedi, Ni-Ag legure																			
Bakar																			
Bronce, Cu-Ni legure																			
Ni-Cu legure																			
Ni-Cr legure																			
Titanijs																			
Srebro																			
Grafit																			
Zlato																			
Platina																			

Izvor: https://www.monarchmetal.com/wp-content/uploads/Galvanic-Corrosion_2.png

2.2.3. Prema materijalu korozije

Osnovni materijal je očito od presudne važnosti za proces korozije. Prethodno je spomenuto kako korozija ne mora biti ograničena na metale. Iz tog razloga korozija prema osnovnom materijalu se dijeli na:

- **Koroziju metala**
 - Ona se može događati i kemijsko i elektrokemijsko, ovisno o metalu i sredstvu.
 - Osnovni materijal čini metal ili njegove legure.
- **Koroziju nemetala**
 - Po svojoj prirodi veoma je slična kemijskoj koroziji zbog činjenice da nije potreban elektrolit.

- Direktno dio kristalne rešetke (ili amorfne strukture) reagira s molekulom bez prethodnog stvaranja iona.
- Dijeli se na koroziju anorganski i organskih materijala. Razlog takve podjele je u osnovnim reakcijama koje uzrokuju koroziju u pojedinim slučajevima.

2.2.5. Posebne vrste korozije

Osim prethodno objašnjenih podjela korozije, u strojarstvu i općenito u radu strojeva dolazi do značajnih korozivnih efekata u kombinaciji s drugim pojavama koje su inače uobičajene u strojarstvu. Osim mehaničkih, navedene pojave mogu biti zbog kemijskih, bioloških i drugih utjecaja. Primjerice ako dolazi do korozije u kombinaciji sa zamorom materijala, navedeno se naziva zamornom korozijom. Poradi toga dana je sljedeća lista posebnih vrsta korozija:

- Napetosna korozija
- Zamorna korozija
- Tarna korozija
- Erozijska korozija
- Kavitacijska korozija
- Fotokemijska korozija
- Biokorozija

U nastavku posebno se opisuje zamorna korozija zbog svojeg značaja prilikom projektiranja dinamički opterećenih strojnih konstrukcija i mogućih opasnosti koje leže u činjenici ako se ona zanemari.

2.2.5.1. Zamorna korozija

Zamorna korozija je poseban oblika korozije koji se javlja pri zamoru materijala. Zamor materijala čini iznimno negativnu pojavu koja se događa pri izmjeničnom dinamičko opterećenju. Klasičan primjer je pucanje spajalice repetitivnim savijanjem. Pojedino

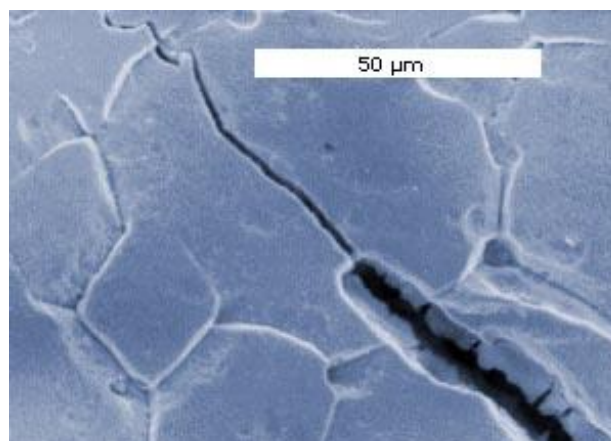
opterećenje iznad određene granice trajne čvrstoće materijala ne čini dovoljan uzrok ka gubitku stabilnosti i strukturalne čvrstoće. Međutim zbog repetitivnog djelovanja pojedinih naprezanja, tijekom vremena dolazi do gubitka mikrostrukture i zatim pucnja materijala što se naziva lomom uslijed zamora materijala. U slučaju da se u takav proces uvede dodatno djelovanje korozije, dolazi do ubrzanog korozivnog procesa koji je izrazito poguban za strukturalno čvrstoću a naziva se po svojoj prirodi zamorom uslijed korozije ili skraćeno zamornom korozijom materijala.

Proces kojim nastaje zamor uslijed korozije se svodi na sljedeći ciklus:

1. Uslijed djelovanja pittinga ili drugih procesa nastaje mikropore na osnovnom materijalu.
2. U navedene mikropore uslijed djelovanja korozivne atmosfere dolazi do povećanog korozivnog trošenja zbog ekspozicije osnovnog materijala korozivnoj atmosferi i uvjetima.
3. Dolazi do dubljeg prodiranja korozije i nastanka dodatnih mjesta lokalizirane oslabiljene čvrstoće osnovnog materijala uslijed čega dolazi do daljnjih mjesta mogućeg slabljenja materijala i nastanka pora u osnovnom materijalu.

Kada se takav ciklus provede do određene granice zamora materijala neminovno dolazi do havarije i katastrofalnog pucanja osnovnog strojnog elementa. Mikroskopski prikaz struktura koje su karakteristične za zamornu koroziju prikazan je na slici 9.

Slika 9. Mikroskopski prikaz zamorne korozije nad granicama zrna



Izvor: https://corrosion-doctors.org/Forms-fatigue/images/steel_corrosion_fatigue.jpg

3. Tehnike zaštite od korozije

Tijekom stoljeća ljudske borbe s korozijom, nastali su različiti pristupi borbi protiv korozije. Različiti pristupi su pokušali maknuti jedan ili više čimbenika koji su bili prethodno navedeni kao uvjeti za koroziju:

- Elektrokemijska korozija
 - Direktni kontakt osnovnog materijala s elektrolitom.
 - Postojanje značajne razlike elektronegativnosti.
- Kemijska korozija
 - Dodir s osnovnim materijalom, nije presudno postojanje razlike elektronegativnosti.

Općenito, izostanak korozije je rezultat adekvatno odabranog materijala i primijenjenih metoda za zaštitu od korozije. Svaka metoda za zaštitu od korozije iziskuje određenu cijenu i fazu u kojoj ju treba primijeniti. Redom kroz ovo poglavlje prikazane su metode kroz grupu konstrukcijskih mjera, katodne zaštite, inhibitorima i prevlačenjem površine.

3.1. Konstrukcijske mjere

Konstrukcijske mjere zaštite od korozije se svode na mjere koje se mogu provesti u fazama konstrukcije pojedine strojne konstrukcije. Po njihovoj prirodi svode se na dvije različite vrste:

- Pravilan odabir materijala kojim se sprječava korozija
- Pravilan odabir sustava protiv korozije kao i mjere dugotrajnog održavanja zaštite kojima se sprječava narušavanje eksploatacijskih osobina konstrukcije tijekom njegovog radnog vijeka.

3.1.1. Odabir materijala otpornijeg na koroziju

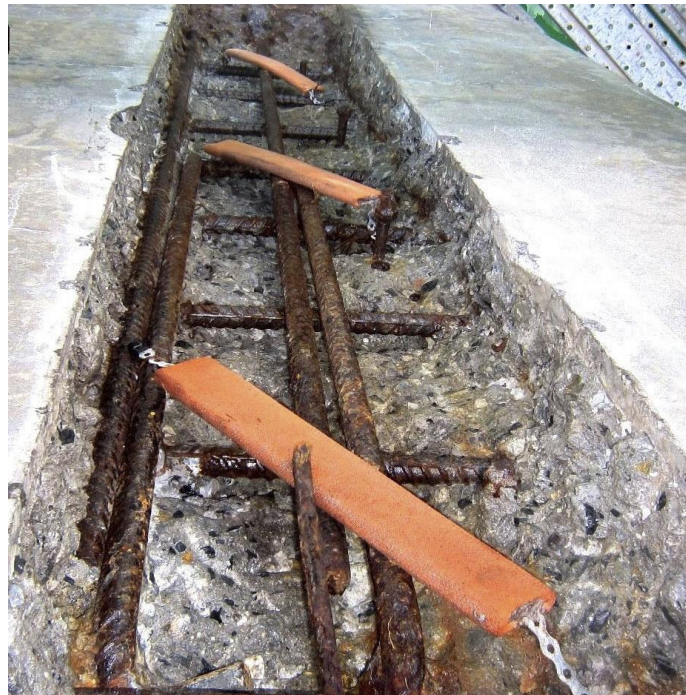
Odabir materijala otpornog na koroziju je moguće izvesti putem različitih metoda ovisno o vrsti korozije koju se pokušava spriječiti. U pravilu se odabir osnovnog materijala vrši prema slici 9 i provjeravaju se njegove interakcije s metalima s kojima će se nalaziti u direktnom dodiru prema tablici.

3.2. Katodna zaštita

Katodna zaštita predstavlja jedan od sustava zaštite osnovnog materijala. Unutar sustava katodne zaštite osnovni materijal se čini katodom unutar strujnog kruga čime je on zaštićen od djelovanja korozivskih efekata. Navedeno je moguće postići pasivno gdje je onda osnovni materijal katoda u elektrokemijskoj reakciji. Drugi način je narinutom strujom kojom se postiže jednak efekt, no potrošnjom električne energije na silu se čini osnovni materijal katodom i tako ga se zaštićuje od korozije. Katodna zaštite zbog svoje jednostavnosti moguće je postaviti na veoma širok raspon mjesta. Posebno je važno spomenuti njegovu široku upotrebu kod struktura poput cjevovoda, molova i dr. gdje se ne očekuje neko znatnije održavanje, već se pasivnom katodnom zaštitom osigurava cjelokupna struktura od negativnog djelovanja korozije. Neki uobičajen primjer svakodnevne upotrebe jesu grijači tople vode gdje se magnezijeve anode koriste kao žrtvene elektrode pasivne zaštite.⁴ Anode pasivne katodne zaštite armiranog betona moguće je vidjeti na slici 10.

⁴ Baeckmann, W., Schwenck, W. i Prinz W.,(1997.), *Handbook of Cathodic Corrosion Protection*, Houston:Gulf Professional Publishing

Slika 10. Primjer pasivne katodne zaštite nad betonskom armaturom



Izvor: https://img.archiexpo.com/images_ae/photo-g/157576-15262337.jpg

3.2.1. Pasivna katodna zaštita

Pasivna katodna zaštita prema svojoj ugradnji moguće je nazvati i galvanskom, ili bimetalnom metodom zaštite. Razlog za to leži u činjenici što se sustav sastoji isključivo od žrtvene anode – često zvanom cink-protektorom zato što se cink često koristi zbog svoje ekonomičnosti.

Posebno pogodna značajka pasivne katodne zaštite je činjenica što za razliku od premaza ili drugih oblika zaštite oštećivanjem zaštitnog sloja ili elektrode ne dolazi do pogubnih posljedica po osnovni materijal. Razlog za to leži u činjenici što je za rad katodne zaštite potreban isključivo bliski fizički kontakt dvaju metala putem kojih se vrši razmjena elektrona.

Razmjena elektrona se vrši zbog razlike u elektronegativnosti pojedinih elemenata. Upravo takvom razmjenom materijal koji u takvoj elektrokemijskoj reakciji djeluje kao katoda ima nuspojavu zaštite od korozije nauštrb žrtvene elektrode – anode koja ubrzano korodira. Pažljivim odabirom materijala anode poput magnezija, cinka ili

drugih sličnih legura izrazito niske elektronegativnosti stvara se električni krug između materijala i određenog medija. Upravo zbog ovoga električnog kruga i činjenice da za njegov rad nije presudan ostatak okoliša čini pasivnu katodnu zaštitu preferiranom metodom zaštite podzemnih struktura.

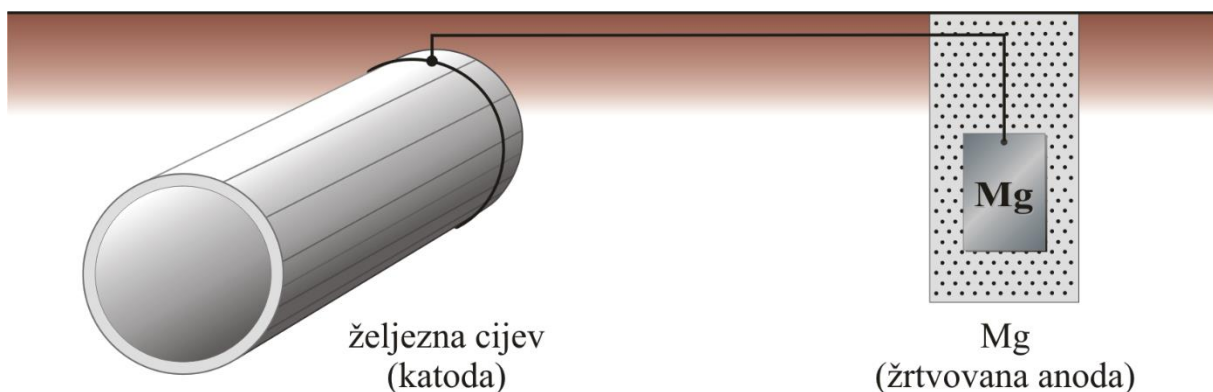
Zaštita podzemnih struktura se u takvim sustavima vrši tako da se željena struktura stavi u direktan dodir pomoću spojne žice sa žrtvenom anodom stvori konstantna struja koja sprječava značajnije proboje korozije.

Nedostaci takvog sustava su sama geometrija strukture zbog oblika električnih silnica koje putuju od žrtvene elektrode do strukture, te činjenica da zaštita nije potpuna već je u praksi poželjno kombinirati pasivnu katodnu zaštitu s određenim premazima kako bi se omogućio dulji radni vijek sustava katodne zaštite i osigurala struktura od drugih mogućih proboja korozije na mjestima gdje katodna zaštita nije potpuno zbog okolišnih uvjeta. S druge strane, prednosti pasivnih sustava katodne zaštite su:

- Ne zahtijevaju konstantno praćenje parametara.
- Ne zahtijevaju konstantan izvor energije.
- Jednostavno postavljanje.
- Ne zahtijevaju održavanje osim periodičke zamjene.
- Relativno nizak trošak sustava s obzirom na ukupni radni vijek.

Prikaz dijagrama sustava pasivne katodne zaštite moguće je vidjeti na slici 11.

Slika 11. Dijagramski prikaz primjera sustava pasivne katodne zaštite



Izvor: https://www.periodni.com/gallery/katodna_zastita.png

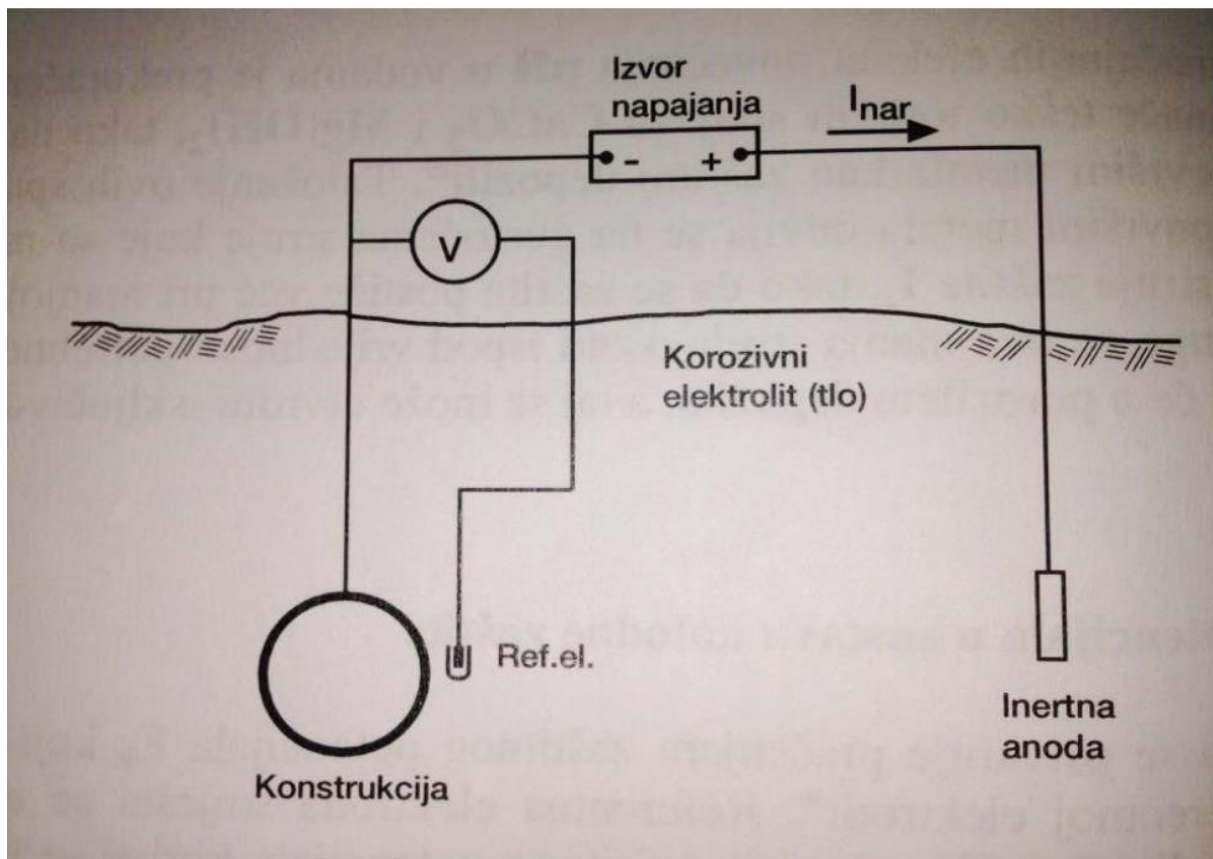
3.2.2. Katodna zaštita narinutom strujom

Slično kao i prethodna vrsta sustava, katodna zaštita narinutom strujom se svodi na isti princip postavljanja osnovnog materijala katodom u strujnom krugu elektrokemijske reakcije. Drugim riječima, postavljanjem osnovne strukture katodom, pozitivnom elektrodom u strujnom krugu. Kod narinute struje je specifično da se, za razliku od pasivne katodne zaštite, koristi zaliha električne struje i stvara se konstantni pozitivni potencijal nad osnovnom strukturom koji se vraća u krug preko strateški postavljenih anoda po strukturi.

Nerijetko se u praksi postavlja čak i referentna, tj. kalibracijska elektroda putem koje se regulira napon s obzirom na okoliš i eventualne korozivne pojave koje su već započele u osnovnom predmetu.

Njihova svrha je u sustavima gdje od izrazite važnosti kontrolirati korozivne efekte do te razine da se ne dopusti da igdje dođe do proboja ili možebitnog faktora s kojim se se narušava osnovna eksploatacija strojarskog elementa ili stroja. Glavni joj je nedostatak činjenica što su elektrode i potrošni elementi u pravilu skuplji, ali isto tako je potrebno održavati sustav opskrbljen električnom strujom što zahtijeva izvor električne energije. Navedeno nije moguće u svakoj primjeni, no tamo gdje misija i svrha konstrukcije zahtijeva izrazitu točnost i poništavanje korozije već u samom korijenu, sustav katodne zaštite s narinutom strujom pruža najveću moguću razinu sprječavanja korozije od svih mogućih tehnika zaštite. Dijagram sustava prikazan je na slici 12.

Slika 12. Dijagramski prikaz sustava katodne zaštite narinutom strujom



Izvor: Večerić, M. (2015.) Ispitivanje raspodjele potencijala u sustavu katodne zaštite

Posebnu primjenu ima na cjevovodima, naftnim platformama, brodovima i općenito drugim objektima morske tehnologije kojima dijelovi strukture ne smiju biti preopterećeni niti u bilo kojoj mjeri zahvaćeni korozijom čime bi došlo do havarije.

3.3. Primjena korozivskih inhibitora

Moguće je definirati inhibitore korozije kao tvari organskog ili anorganskog porijekla koje u vrlo malim koncentracijama smanjuju koroziju do tehnološki prihvatljivih vrijednosti čime se omogućuje razuman eksploatacijski vijek.

Postoje različiti mehanizmi, no u pravilu se svode na stvaranje barijere između okoliša i osnovnog materijala čime se sprječava prodiranja korozivnih elektrokemijskih efekata. Najčešću primjenu imaju u morskim uvjetima no nerijetko se koriste i za sprječavanje korozije i u atmosferi, primjerice na borbenim avionima.

Korozijske inhibitore se najčešće dodaju i u specijalne premaze kako bi se pospješila efikasnost premaza čime sprječavaju ionizaciju metala. Najčešće se nalaze u vodotopivim premazima zbog svoje anorganske prirode. Svrha njihovog korištenja kod temeljnih premaza je sprječavanje začetka korozivnih procesa tijekom sušenja premaza.

S obzirom na mehanizam na koji djeluju moguće ih je u grubo podijeliti na sljedeće skupine:

- Anodne – Inhibitori koji sprječavaju ionizaciju metala.
- Katodne – Inhibitori koji sprječavaju redukciju oksidansa.
- Miješani – Inhibitori koji sprječavaju oba procesa u nekoj mjeri.

3.4. Zaštita prevlačenjem

Prevlačenje osnovnog materijala je osnovni proces kojim se sprječava nastanak korozije. Poznat je od davnina, a najčešće se koriste organski premazi u obliku premaza nad velikim čeličnim konstrukcijama. Početkom devetnaestog stoljeća Humphry Davy je izumio katodnu zaštitu u obliku prevlačenja dna brodova bakrom i time otvorio put i za anorganske prevlake ali i metalne koje su danas u velikoj upotrebi u raznim poljima strojarstva. Neovisno o navedenom, najvažniji korak za prevlačenje je dakako priprema osnovne površine za prevlačenje i kasnije pravilno održavanje o čemu je više riječ u sljedećim poglavljima.

3.4.1. Priprema površine za prevlačenje

Kako bi se adekvatno zaštitio osnovni predmet potrebno je površinu strojarskog elementa očistiti i pripremiti za presvlaku. Kao takva pripremna faza se sastoji od više postupaka pripreme:

- Mehanička priprema
- Elektrokemijska priprema
- Odmašćivanje

3.4.1.1. Mehanička priprema

Mehanička priprema se odnosi na pripremu površinu tako da se s nje mehaničkim postupcima odstranjuju onečišćenje i rahla mjesta kojima bi se indirektno i direktno ugrozio premaz ili sloj presvlake.

Mehanički postupci kojima se priprema površina odnose se na:

- Brušenje – Mehanička obrada uz pomoć kolutova s abrazivnim medijem.
- Poliranje – Uz pomoć kojega se otklanjaju neravnine nakon brušenja.
- Obrada u bubnjevima – Najveću primjenu ima kod sitnih predmeta koji se ubace u bubanj s abrazivnim tvarima poput korunda.
- Četkanje – Metalnom četkom se skidaju rahli dijelovi površine.
- Pjeskarenje – Otkidanje rahlih i korodiranih dijelova površine uz pomoć pijeska ili drugog sitnog medija pod izrazito jakim mlazom komprimiranog zraka.
- Sačmanje – Izrazito sličan postupak u naravi kao i pjeskarenje, no razlikuje se u sredstvu jer se u sačmanju radi uz pomoć čeličnih kuglica – sačme.

3.4.1.2. Elektrokemijska i kemijska priprema

Pod elektrokemijskom pripremom podrazumijevaju se pripreme površine za premazivanje koje spadaju u dvije skupine procesa: isključivo kemijske pripreme površine kao i elektrokemijski procesi pripreme površine.

Kemijska obrada površine može biti kiselinom ili lužinom a naziva se u naravi dekapiranjem. Ovakvim kupkama se osnovni materijal čisti od korozivskih produkata i stvara se kemijski čist okoliš za primjenu kasnijeg premaza.

Kiselinsko dekapiranje se najčešće provodi sumpornom (H_2SO_4) ili klorovodičnom kiselinom (HCl) za željezo i općenito vrste čelika dok se dušična kiselina (HNO_3) provodi za bakar. Otapanje osnovnog materijala se sprječava dodavanjem inhibitora korozije. (H_2SO_4 )

Elektrokemijski procesi pripreme s druge strane uključuju nagrizanje uz pomoć elektrokemijskih procesa i kasnije poliranje. Ovisno o vrsti ono može biti isključivo površine materijala i anodno ili katodno. Najčešće se provodi istosmjernom strujom.

U slučaju anodnog nagrizanja, nastaju pozitivni ioni (kationi) metala u otopini jer je u strujnom krugu metal spojen kao anoda. Postižu se iznimno dobri rezultati kod skidanja korozivskih produkata.

Kod katodnog nagrizanja metal je spojen kao katoda i stvara se vodik unutar kisele kupke zbog koje se skidaju korozivski produkti s površine. Neovisno o dobrom učinku skidanja korozije, iznimno je opasno provoditi je dugo ili nad tankim predmetima zbog opasnosti nastanka vodikove krhkosti, tj. inkluzije vodika u strukture kristala osnovnog materijala i time nepovratno narušavanje strukturalne čvrstoće elementa.

3.4.1.3. Odmašćivanje

Odmašćivanje obuhvaća postupak potpunog uklanjanja masnih tvari s površine metala. Izuzetno je važno sprovoditi ga prilikom kasnije presvlake organskim premazima, no ima svoju važnost i kod ostalih postupaka prevlačenja zato što se ostatkom masnog sloja na strojnom elementu onemogućava njegovo kasnije adekvatno prevlačenje i stvaraju se mjesta gdje se presvlaka nedovoljno pripija na površinu i time postaje eksploatacijski beskorisna.

Prema vrstama procesa mehanizmi odmašćivanja mogu se podijeliti na:

- Kemijsko odmašćivanje
 - Uz pomoć lužnatih otopina.
 - Uz pomoć kiselih otopina.
- Elektrokemijsko odmašćivanje
- Odmašćivanje ultrazvukom

Odabir procesa odmašćivanja ovisi o osnovnom materijalu strukture kao i pojedini zahtjevi koji su postavljeni pred zaštitom strukture, primjerice, je li ona već sastavljena, je li ona modularna ili monolitna – u jednom komadu i dr. uvjeti koji sveukupno utječu na proces pripreme za postavljanje protukorozivne prevlake.

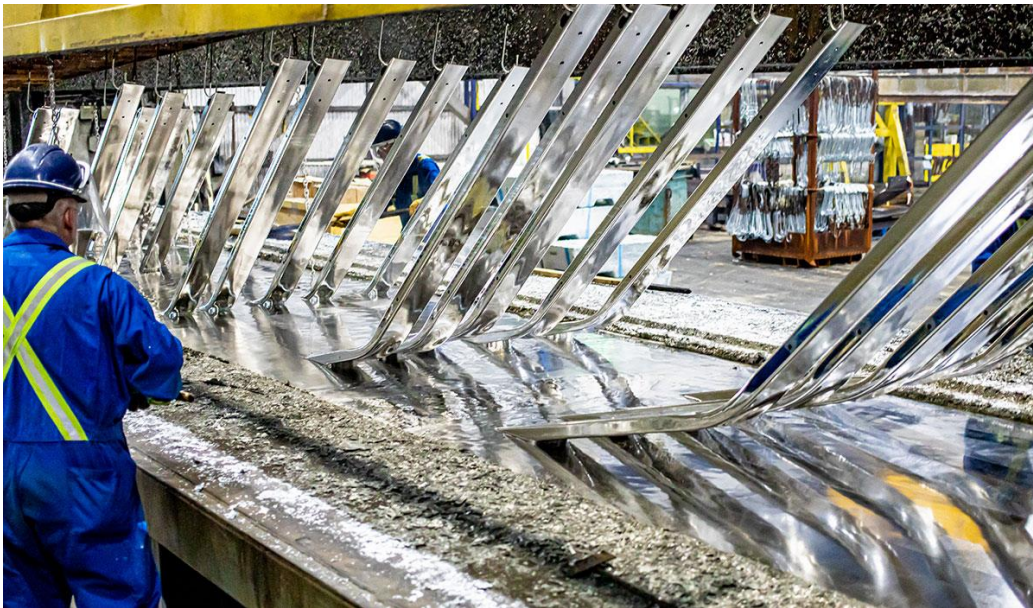
3.4.2. Zaštita metalnom prevlakom

Zaštita metalnom prevlakom je metoda presvlačenja u svojoj osnovi. Takav postupak prevlačenja metalom naziva se metalizacija ili platiranje. Osim poboljšanjem korozivnih svojstva moguće je poboljšati tvrdoću i otpornost na trošenje osnovnog materijala, dok galvanizacija kao takva ima posebnu ulogu u strojarstvu i pobliže se pojašnjava u sljedećem poglavlju.

3.4.2.1. Galvanizacija

Galvanizacija je zapravo tehnološki proces presvlačenja površina osnovnog metala cinkom. Najčešće se galvaniziraju željezo i različite vrste čelika. Takvom prevlakom ograničava se dodir osnovnog materijala s vanjskim okolišem i time se efektivno sprječava korozija. Dodatno, cink zbog svoje relativno niske elektronegativnosti djeluje poput anode nad osnovnim materijalom i time privlači korozivne efekte i žrtvuje se kako bi spriječio propadanje osnovnog materijala. Zaštita presvlačenjem cinka je toliko učinkovita da čak i u slučaju da dođe do fizikalnog oštećenja sloja cinka, elektrokemijski procesi žrtvuju preferencijalno cinčani sloj kako bi se strukturalna čvrstoća osnovnog materijala održala na zadovoljavajućoj razini. Preferirana je metoda zaštite dijelova koji iziskuju minimalno ili čak uopće se ne razmatraju u održavanju, a prikaz proces vidljiv je na slici 13. Galvanizirana površina također ima svoj specifičan uzorak koji je moguće vidjeti na slici 14.

Slika 13. Primjer procesa galvanizacije



Izvor: <https://cbrlaser.com/images/services/galvanisation-1200.jpg>

Slika 14. Prikaz karakterističnog uzorka koji posjeduje galvanizirani čelik



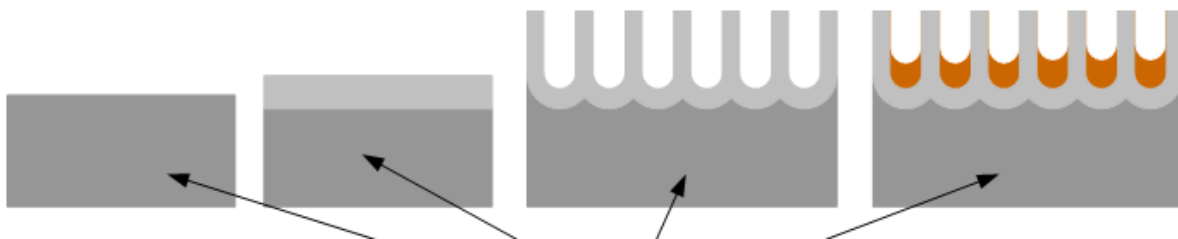
Izvor: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/8/89/Feuerverzinktes_Gel%C3%A4nder.jpg/1024px-Feuerverzinktes_Gel%C3%A4nder.jpg

3.4.3. Zaštita anorganskom prevlakom – površinskom obradom

Anorganske prevlake su prevlake koje se nanose na osnovni materijal, a u naravi čine ju anorganski spojevi, najčešće oksidi, fosfati, kromati i sl. Nerijetko se nanose kemijskim postupcima, a cilj je stvoriti zaštitni sloj oksida nad površinom osnovnog materijala kako bi ga se zaštitilo od štetnog utjecaja korozije. Nerijetko se kombinira s drugim vrstama prevlake, a najpoznatiji primjer je anodizacija aluminijske kuge.

Prilikom anodizacije aluminijske kuge elektrokemijskim putem se stvara dublji sloj oksida pri jednoj fazi struje, dok u suprotnoj fazi dijelovi tog sloja se ljušte i ostavljaju nezaštićen osnovni materijal. Time nastaju duboki slojevi oksida tj. u naravi anodnog materijala čime je aluminij iznimno dobro zaštićen od korozije tj. aluminijske kuge. Prikaz procesa anodizacije prikazan je na slici 15.

Slika 15. Površina aluminijske kuge na mikro razini prilikom anodiziranja



Izvor:

<https://www.substech.com/dokuwiki/lib/exe/fetch.php?w=&h=&cache=cache&media=anodizing.png>

3.4.4. Zaštita organskom prevlakom

Organska prevlaka čini jedan od najčešće korištenih postupaka i tehnika za zaštitu od korozije. Gotovo sve veće strukture su prvo zaštićene organskim premazima.

Organski premaz prednost ima u činjenici što njegovim postavljanjem nastaje barijera tj. opna između okoliša i osnovnog materijala. Najčešće se organske tvari nazivaju skupnim nazivom bojama i lakovima.

Premaz je po svojoj definiciji ograničen na tvari koje stvaraju „suhi“ film kristala na površini predmeta. Dok je lak kao pojam zauzet za organske tvari koje svojim svojstvima stvaraju amorfni film na površini predmeta.

Neki od uobičajenih postupaka nanošenja organskih prevlaka čine: plastifikacija, gumiranje i bitumenizacija, no i bojenje i lakiranje se smatraju osnovnim postupcima korozivne zaštite predmeta. Primjer zaštite premazom bitumena vidljiv je na slici 16.

Slika 16. Primjer bitumenizacije cjevovoda



Izvor:

https://lh3.googleusercontent.com/proxy/uU6roS2uvHba0kzPpQxhIqu8IKt96yOchZC6Jq8PfbAD9aSGNCTvMFB4kcLTM5n_82CAABLNoWxGEBH9W5JGPHTcrrliZneKR4T3Xq-ybBs

4. Zaštita od korozije konstrukcije broda

Brodovi po svojoj prirodi nerijetko čine najkompleksnije strojarske strukture koje je čovjek ikada izradio, no zbog činjenice da su gotovo uvijek u dodiru s vodom čine i jedne od najzahtjevniji struktura što se tiče korozivnih efekata. Posebno je štetna morska, slana voda koja stvara izrazito povoljnu atmosferu za nastanak korozije i prijevremeno propadanje strukture. Inženjeri strojarstva i brodogradnje su iz tog razloga na brodovima primijenili gotovo sve moguće vrste zaštite, a sam početak navedenog čini eksperiment Humphry Davy-ja 1820-tih godina kada su dokazali princip katodne zaštite na dnu brodova.

Od devetnaestog stoljeća, do danas tehnologije je bitno napredovala te se danas pri projektiranju i konstruiranju brodova koriste mnoge hibridne tehnike zaštite koje kombiniraju više prethodnih sustava kako bi se brodu omogućila potpuna i trajna zaštita od svih korozivnih faktora. U navedene svrhe, unutar ovoga rada prikazuju se ogledni primjeri triju najzastupljenijih tehnika zaštite od korozije:

- Premazivanje trupa broda.
- Sustavi pasivne katodne zaštite.
- Sustavi katodne zaštite narinutom strujom.

Ovi primjeri služe kao primjer prikaza prethodno proučenih tehnika zaštite i u dubinu se ulazi u njihove prednosti i mane, kao i način na koji se one međusobno upotpunjuju da bi osigurali totalnu zaštitu od korozije i dug eksploatacijski vijek.

4.1. Premazivanje trupa

Premaz trupa pruža zaštitu od korozije na tri načina:

- Efektom membrane
- Pružajući učinak inhibitora korozije
- Stvarajući galvanski zaštitni efekt nad trupom

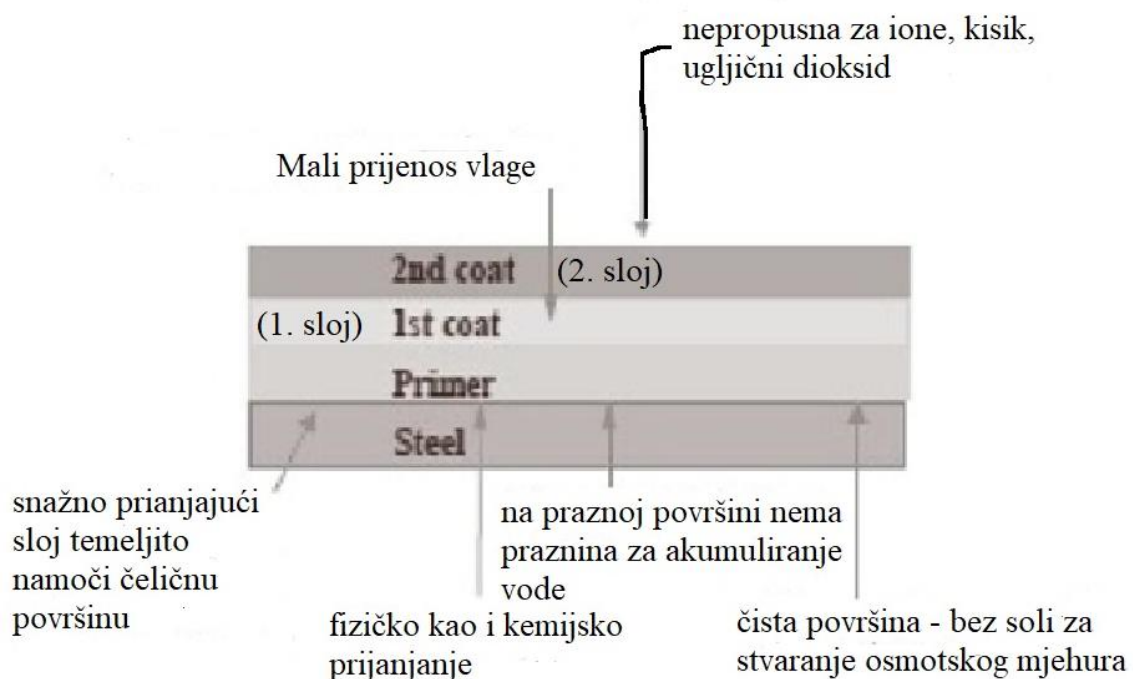
Kao što i samo ime govori, efekt barijere stvara prepreku između materijala i okoliša. U bojama nema pigmenata koji sprječavaju hrđu i pružaju samo barijeru. Većina boja,

mnogi temeljni premazi, svi međuslojevi i završni slojevi su ovakvog tipa zbog činjenice da boje koje u sebi sadrže inhibitore korozije na bazi galvanskih efekata nisu prilagođene za upotrebu ispod razine vode. U većini temeljnih boja, aluminijske i staklene čestice koriste se za povećanje i pojačanje efekta membrane. Boje s inhibitornim učinkom sadrže pigmente koji inhibiraju poput cinkovog fosfata. Važno je spomenuti kako boje sa zaštitnim elementima na bazi galvanske elektrokemije čine u pravilu temeljne premaze, no one nisu prilagođene za upotrebu ispod razine vode zbog čega se često izbjegavaju.

Boje koje koriste galvanski efekt sadrže čiste cinkove pigmente i koriste se samo kao temeljni premazi. Očigledna prednost ovakvih temeljnih slojeva leži u neposrednom zaštitnom efektu galvanskoj spoja: čak i ako premaz napukne ili se djelomično oljušti, čelik će i dalje biti zaštićen cinkovim pigmentima koji djeluju na čelik da se on ponaša kao katoda.

Nepropusna prevlaka služi kao inertna membrana za dodatnu zaštitu površine od korozije. Ilustrativni primjer sustava premaza i različitih slojeva prikazan je na slici 17.

Slika 17. Prikaz sustava zaštite premazom



Izvor: https://www.researchgate.net/profile/Yigit-Demirel/publication/264788310/figure/fig2/AS:669348419080199@1536596507266/An-impervious-coating-system-4_W640.jpg

Ono što je važno napomenuti je da bi se postigla zadovoljavajuća primjena zaštitnog sloja na brod, moraju biti ispunjeni sljedeći temeljni uvjeti:

- Adekvatno pripremljena površina
- Adekvatno pred-obrađena površina (očišćena, odmašćena i dr.)
- Primjena temeljnog, katodnog zaštitnog sloja
- Nanošenje zaštitnog sloja na temeljnu boju kako bi se pospješio vijek trajanja premaza.

4.2. Sustavi katodne zaštite

Katodna zaštita uz premaze stvara dodatni sloj zaštite broda. Moguće je izvesti dva različita sustava:

- Sustav pasivne katodne zaštite
- Sustav katodne zaštite narinutom strujom

Svaki od njih ima svoje prednosti i nedostatke, te se navedeno mora uzeti u obzir prilikom projektiranja broda i planiranja njegovog radnog vijeka.

Današnji je standard preporuke implementacija sustava s narinutom strujom, a posebnu primjenu imaju na brodovima za specijalne namjene poput ledolomaca i dr. kojima je trup izložen znatno većim opterećenjima nego kod drugih tipova brodova. Više o pojedinostima i primjeri sustava katodne zaštite slijede u narednim poglavljima.

4.2.1. Pasivna katodna zaštita

Sustave pasivne katodne zaštite karakteriziraju protektorske anode koje se postavljaju na posebno osmišljena mjesta na trupu broda. Prilikom projektiranja broda postoje kod upute za odabir legura anoda kao i lokacija na kojima se nalaze. Često je prisutna uputa da je idealno postaviti 15-20% protektora oko sustava od vitalnog značaja broda, tj. njegove krme, kormila i propelera čime se sprječava havarija pogonskog sustava i

sustava upravljanja brodom čak i u slučajevima da je došlo do znatnijeg neodržavanja ili drugo nepredviđenog incidenta zbog kojeg je zaštita zakazala.

Prednost sustava pasivne katodne zaštite je niska cijena implementacija radi čega se nerijetko ovakvi sustavi postavljaju na brodove koji prethodno nisu imali projektirane sustave zaštite od korozije unutar zahvata naknadne ugradnje i izmjene broda kakvi znaju sporadično nastati u brodogradnji. Međutim, njegov nedostatak je činjenica što sustav nije prilagodljiv iznenadnoj promjeni uvjeta poput prelaska iz slatke vode u slanu vodu i dugoročno ima više troškove održavanja nego sustav s narintom strujom tijekom radnog vijeka broda. Prikaz sustava zaštite cink protektorom na trupu broda vidljiv je na slici 18.

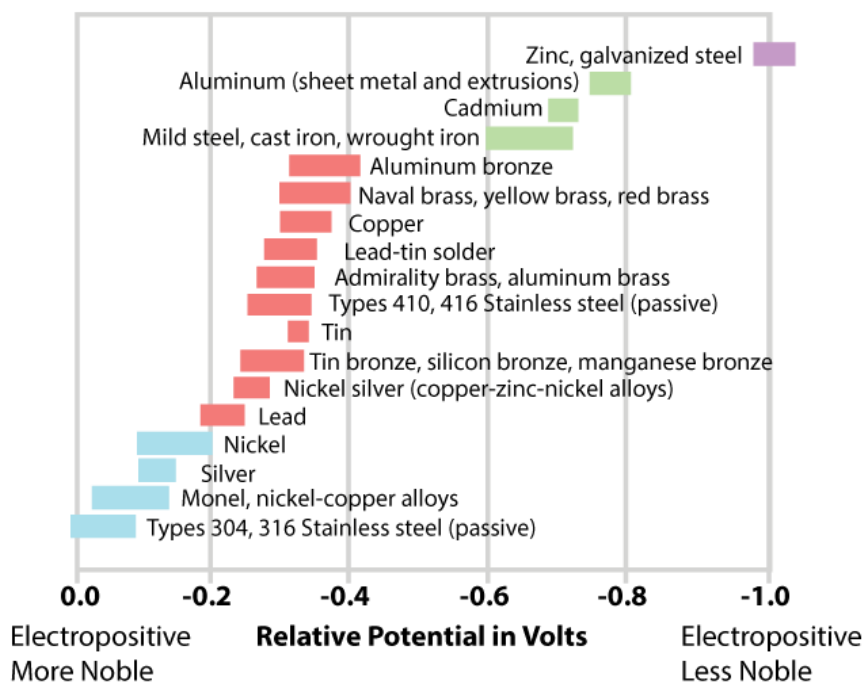
Slika 18. Primjer sustava pasivne katodne zaštite na brodu



Izvor: <https://korrosionsgruppen.se/wp-content/uploads/2019/11/Hull-Anodes.jpg>

Dodatno dan je i grafički prikaz relativnih potencijala različitih legura radi lakše selekcije pri projektiranju na slici 19.

Slika 19. Grafički prikaz relativnog potencijala u voltima



Izvor: <https://www.structuremag.org/wp-content/uploads/2017/02/0317-spr-1.png>

4.2.2. Katodna zaštita narinutom strujom

Sustavi katodne zaštite uz pomoć narinute struje funkcioniraju na istom principu – tj. zaštite katode. Najčešće se koriste za trupove brodova pri projektiranju po modernim standardima, kao što se vidi na slici 20., gdje su prikazane vrijednosti gustoće struje po površini, da bi se zaštitio osnovni materijal.

Slika 20. Preporučene vrijednosti struje za projektiranje sustava zaštite narinutom strujom

Vrsta broda	Standardna vrijednost u mA/m ²
Preko-oceanski brodovi(s remazom)	10
Postali preko-oceanski brodovi	12
Priobalni brodovi	14
Ribolovni brodovi	22
Tegljači	18
Dredger brodovi	24
Ledolomci	25

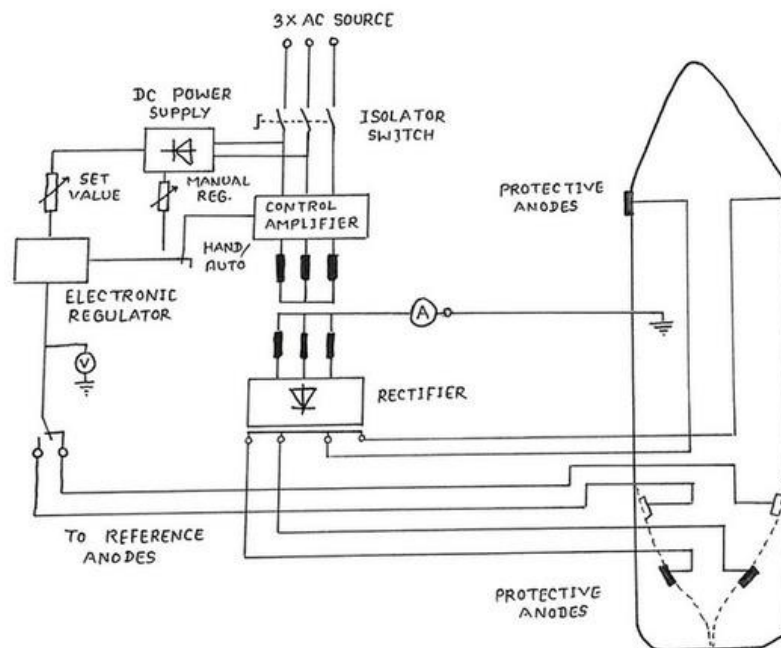
Izvor: Champion Technologies, (2012.) *Corrosion mitigation for complex environments*

Sustav se sastoji u pravilu od jedne referentne elektrode kojom se mjeri razlika napona i struje nad trupom broda. Uz navedenu referentnu elektrodu, centralna upravljačka jedinica modulira i mijenja napon i struju ovisno o potrebama trenutnog okruženja kako bi se spriječio pad vrijednosti narinite struje nad konstrukcijom ispod vrijednosti potencijala koji je potreban da bi se pokrenuli korozivni efekti. Naravno njezini nedostaci su relativno visoki troškovi početne implementacije, koji se nadomjeste tijekom radnog vijeka konstrukcije. Iz tog razloga idealno je ovakve sustave implementirati u sve novije gradnje za koje se očekuje dulje vrijeme rada od par godina.

Prednost mu je i nešto niža potrošnja elektroda radi konstantne regulacije naspram pasivne katodne zaštite. Iz tog razloga je njegova dugoročna isplativost neupitna, a zaštita koja se pruža ovakvim sustavom gotovo najbolja. U kombinaciji s kvalitetnim odabirom sustava premaza, sustavi katodne zaštite narinutom strujom su se u praksi pokazali kao najisplativiji za kritične sustave kod kojih se ne smije dopustiti niti najmanja greška zbog mogućih korozivnih pojava.

Shema sustava katodne zaštite narinutom strujom nad oplatom broda prikazana je na slici 21.

Slika 21. Shema sustava katodne zaštite narinutom strujom za trup broda



Izvor: <https://www.marinerdesk.com/wp-content/uploads/2018/03/step0003.jpg>

5. Zaključak

O ovom radu je objašnjen i prikazan proces nastajanja korozije kao osnova za daljnje razumijevanje problema u trajnosti i funkcionalnosti strojarskih izrađevina. Proces korozije je izrazito nepoželjan u strojarskoj djelatnosti i zahtijeva posebne metode za sprječavanje nastajanje korozije. Korozija je po prirodi rezultat kemijskog i termodinamičkog procesa u određenim uvjetima, a njene posljedice mogu biti vrlo značajne, od prevelikih troškova za održavanje funkcionalnosti konstrukcija, pa do onih najgorih kao što su otkazivanje konstrukcija ili njenih sastavnih elemenata. U radu je predstavljen kratki prikaz različitih tehnika zaštite od korozije koje su danas dostupne i najčešće se koriste.

Konstrukcija broda se najčešće štiti kombinacijom različitih sustava zaštite od korozije. U konkretnom slučaju zaštite broda primijenjena su dva sustava zaštite: premazivanjem bojama i katodnom zaštitom s čime se povećava sigurnost i omogućuje komplementarni učinak zaštite broda korištenjem oba sustava. Trup je zaštićen premazom i sustavom katodne zaštite s narinutom strujom, a mogućnost kratkotrajnog prestanka rada sustava katodne zaštite neće dovesti do značajne i korozivne štete nad trupom.

Tom spoznajom zaključuje se da je osnovna hipoteza rada dokazana zato što se kombinacijom više sustava zaštite ostvaruje dulji radni vijek i poboljšava eksploatacijska svojstva broda i smanjeni troškovi održavanja i povećan životni vijek broda. Korozija je vječan neprijatelj protiv kojega inženjeri moraju dobro isplanirati borbu još pri projektiranju kako bi ga uspješno svladali. Korozija ima odlične uvjete nastanka i razvoja u elektrolitima i morskoj vodi, ali pravovremenim i prikladnim odabirom sustava zaštite moguće je koroziju zaustaviti u svojim počecima i time osigurati dugotrajnu eksploataciju broda i sprječavanje zastoja i havarija u njegovom radu.

LITERATURA

A) Članci:

- Lusk, D., Gupta, M., Boinapally, K., Cao, Y., (2008.) Armoured against corrosion, *Hydrocarb Eng*, br. 13., str. 115. do 118.
- Oyelami, B.O., Asere, A.A. (2012.) *Mathematical modelling: An application to corrosion in a petroleum industry*. NMC Processings Workshop on Environment. Abuja: Nigeria
- Champion Technologies, (2012.) *Corrosion mitigation for complex environments*, Houston: Champion Technologies
- Rajendran, S. (2018). Corrosion-Yesterday, Today and Tomorrow. *Oriental Journal of Physical Sciences*, br. 3. str. 68.-74., Dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/331835724_Corrosion-Yesterday_Today_and_Tomorrow (Pristupljeno: 15. ožujka 2021.).
- Corbin, D., Wilson, E., (2007.) *New technology for real-time corrosion detection*. USA: Tri-service corrosion conference
- U.S. Army Corps of Engineers (2004.) *Design: Electrical engineering cathodic protection*

B) Knjige:

- Baeckmann, W., Schwenck, W. i Prinz W.,(1997.), *Handbook of Cathodic Corrosion Protection*, Houston:Gulf Professional Publishing, Dostupno na:
- Roberge PR., (2000.), *Handbook of corrosion engineering*, New York: McGraw-Hill
- Parker, M. i Peattie, E., (1988.), *Pipeline Corrosion and Cathodic Protection* Houston: Gulf Professional Publishing
- Perez, N., (2004.), *Electrochemistry and Corrosion Science*, Mayaguez: Springer
- Stansbury, E. i Buchanan, R., (2000.), *Fundamentals of Electrochemical Corrosion*, S.A.D.:The Materials Information Society,

C) Internetski izvori:

- Cathwell, n.d., "What is corrosion?", Dostupno na: <https://cathwell.com/what-is-corrosion/> (Pristupljeno: 25. ožujka 2021.).
- Clark, J., "Electronegativity", (2020.) Dostupno na: [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_y\)/Physical_Properties_of_Matter/Atomic_and_Molecular_Properties/Electronegativity](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_y)/Physical_Properties_of_Matter/Atomic_and_Molecular_Properties/Electronegativity) (Pristupljeno: 19. ožujka 2021.).
- Corrosion Doctors, n.d., "Stray Current Corrosion Cells", Dostupno na: <https://corrosion-doctors.org/Corrosion-Factors-Cells/corrosion-cells-stray.htm> (Pristupljeno: 15. ožujka 2021.).
- CorrosionPedia, (2017.); "Impressed Current Cathodic Protection (ICCP)", Dostupno na: <https://www.corrosionpedia.com/definition/1237/impressed-current-cathodic-protection-iccp> (Pristupljeno: 23. ožujka 2021.).
- CorrosionPedia, (2017.); "Stray Current", Dostupno na: <https://www.corrosionpedia.com/definition/1032/stray-current> (Pristupljeno: 21. ožujka 2021.).
- NACE International, n.d., "Stress Corrosion Cracking (SCC)", Dostupno na: <https://www.nace.org/resources/general-resources/corrosion-basics/group-3/stress-corrosion-cracking> (Pristupljeno: 21. ožujka 2021.).
- Piping Technology & Products Inc., n.d., "Corrosion protection", Dostupno na: <https://pipingtech.com/resources/technical-bulletins/corrosion-protection/> (Pristupljeno: 15. ožujka 2021.).
- Riggs Larsen, K., (2020.), "Designing an ICCP System for the Hull of an Arctic Ice-Breaking Vessel", Materials Performance, Dostupno na: <http://www.materialsperformance.com/articles/cathodic-protection/2015/03/designing-an-iccp-system-for-the-hull-of-an-arctic-ice-breaking-vessel> (Pristupljeno: 17. ožujka 2021.).
- Schiroky, G., Dam, A, Okeremi, A. i Speed, C., "Pitting and crevice corrosion of offshore stainless steel tubing", (2013.), Dostupno na: <https://www.offshoremag.com/business-briefs/equipment-engineering/article/16761447/pitting-and-crevice-corrosion-of-offshore-stainless-steel-tubing> (Pristupljeno: 23. ožujka 2021.).

- Smith, C., (2020.), "Galvanic Reaction: Incompatible Metals Responsible for Corrosion", Monarch Metal Fabrication, Dostupno na: <https://www.monarchmetal.com/blog/galvanic-corrosion-common-questions-answered/> (Pristupljeno: 15. ožujka 2021.).
- Thomas industry, n.d., "Corrosion Resistant Coating for Various Types of Corrosion", Dostupno na: <https://www.thomasnet.com/articles/chemicals/corrosion-resistant-coatings/> (Pristupljeno: 17. ožujka 2021.).

POPIS SLIKA

Slika 1. Primjer hrđanja željeza	10
Slika 2. Periodni sustav elemenata prikazan prema elektronegativnosti	13
Slika 3. Prikaz elektrokemijskih procesa prilikom hrđanja željeza	15
Slika 4. Prikaz termodinamičkih procesa prilikom rafiniranja i oksidiranja željeza	16
Slika 5. Primjer opće korozije vijka	19
Slika 6. Vrste pitting korozije nehrđajućih čelika	20
Slika 7. Primjer galvanske korozije oplata oko vijka	21
Slika 8. Tablični prikaz čestih metala i mogućnosti pojave galvanske korozije. Crveno označava nastanak galvanske korozije po anodnom metalu ako su u bliskom kontaktu	22
Slika 9. Mikroskopski prikaz zamorne korozije nad granicama zrna	24
Slika 10. Primjer pasivne katodne zaštite nad betonskom armaturom.....	27
Slika 11. Dijagramski prikaz primjera sustava pasivne katodne zaštite	28
Slika 12. Dijagramski prikaz sustava katodne zaštite narinutom strujom.....	30
Slika 13. Primjer procesa galvanizacije	35
Slika 14. Prikaz karakterističnog uzorka koji posjeduje galvanizirani čelik.....	35
Slika 15. Površina aluminija na mikro razini prilikom anodiziranja	36
Slika 16. Primjer bitumenizacije cjevovoda.....	37
Slika 17. Prikaz sustava zaštite premazom	39
Slika 18. Primjer sustava pasivne katodne zaštite na brodu.....	41
Slika 19. Grafički prikaz relativnog potencijala u voltima	42
Slika 20. Preporučene vrijednosti struje za projektiranje sustava zaštite narinutom strujom.....	43
Slika 21. Shema sustava katodne zaštite narinutom strujom za trup broda.....	44

Sažetak

Opseg ovoga rada sačinjava temeljito istraživanje pojave korozije i njena zaštita na konstrukcijama brodova. Pod temeljitim istraživanjem prikazuju se osnovni uzročnici korozije, podjele različitih vrsta korozije kao i mehanizmi asocirani s pojedinačnim vrstama. Uz temeljito obradu korozije, prikazuju se korozivne tehnike zaštite i tehnike zaštite od pojedinih uzročnika korozije kroz strojarske pristupe i izolacijom, odnosno smanjivanjem učinka pojedinačnih čimbenika korozije. Za svaki pristup korozivnoj zaštiti prikazuje se način njegovog djelovanja kao i područje primjene i uvjeti pri kojima se navedeni proces zaštite može koristiti. Sintezu ovoga rada i njegovu primjenu čini prikaz tehnika zaštite od korozije koje se primjenjuju na samim konstrukcijama brodova i temeljito objašnjenje za razloge njihovog korištenja.

Ključne riječi: korozija, korozivna zaštita, konstrukcija broda

Abstract

The scope of this paper is a thorough analysis of the effects of corrosion. It includes the underlying cause of corrosion, its classification according to multiple criteria and the associated mechanisms that govern it through the different cases. Other than a thorough investigation into corrosion, this paper gives a broad description of all the different techniques and methods of applying corrosion resistance through different mechanical engineering disciplines and the way these methods mitigate the underlying causes of corrosion. The synthesis of this work constitutes its application towards understanding the different corrosion resistance methods implemented on ship construction and a complete explanation for the reasons of their use.

Key words: Corrosion, corrosion protection, ship construction.