

# Projektiranje naprave za korozijsko ispitivanje uranjanjem

---

**Mance, Goran**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2008**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:688101>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-09**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

## **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:  
Prof. dr. sc. Ivan Juraga

Goran Mance

**Zagreb, 2008.**



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**  
Odbor za diplomske ispite  
Povjerenstvo proizvodnog smjera



Zagreb, 08.09.2008.

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

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **GORAN MANCE**

Mat. br.:35954397

Naslov: **PROJEKTIRANJE NAPRAVE ZA KOROZIJSKO ISPITIVANJE URANJANJEM**

Opis zadatka:

Izučiti, obraditi i prikladno prikazati pojavu elektrokemijske korozije koja se događa na uronjenim konstrukcijama.

Korozijskim ispitivanjem uranjanjem se izuzetno vjerno mogu provjeriti i utvrditi korozijska svojstva najrazličitijih konstrukcijskih materijala u različitim otopinama.

Izučiti i prikazati zahtjeve standardiziranog korozijskog ispitivanja cikličkim uranjanjem.

Projektirati i izraditi napravu za „Korozijska ispitivanja uranjanjem“, te provesti početna ispitivanja.

Zadatak zadan:

11. rujna 2008.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Ivan Juraga

Rok predaje rada:

13. studenog 2008.

Predviđeni datum obrane:

19.-21.studenog 2008.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Franjo Cajner

## **SAŽETAK**

Diplomski rad se sastoji od teorijskog, eksperimentalnog i praktičnog dijela.

U teorijskom dijelu opisano je korozijsko djelovanje na materijale te detaljno objašnjene reakcije i mehanizmi elektrokemijske korozije. Posebno su naglašene korozijske reakcije u slanim vodenim otopinama budući da su relevantne za kasnije prikazana ispitivanja uranjanjem. U sklopu priprema za konstruiranje naprave analizirana je norma ASTM G44 koja propisuje način ispitivanja cikličkim uranjanjem. Poštivajući odredbe norme, pristupilo se prvo izradi idejnog, a zatim i konačnog konstrukcijskog rješenja naprave za ispitivanje uranjanjem.

U praktičnom djelu rada, naprava je izrađena u jednom primjerku prema dokumentaciji iz konstrukcijskog rješenja. Naprava je postavljena u prostorije Laboratorija za zaštitu materijala Fakulteta Strojарstva i Brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu te pripremljena za početak rada.

U eksperimentalnom dijelu rada ispitivane su dvije serije uzoraka u različitim trajanjima (5 sati i 90 sati). Prvim ispitivanjem je utvrđena točnost i pouzdanost rada naprave. Drugo ispitivanje je provedeno na šest uzoraka od ugljičnog čelika uronjenih u različite korozivne vodene otopine.

Drugo ispitivanje je pokazalo ubrzanost odvijanja korozije pri cikličkom uranjanju te neučinkovitost inhibitora korozije ukoliko su primijenjeni u nedostatnoj količini.

Naprava za ispitivanje naizmjeničnim uranjanjem je uspješno konstruirana, izrađena i puštena u rad bez poteškoća, čime je u potpunosti ispunjen zadatak ovog diplomskog rada.

## **SUMMARY**

*This thesis includes theoretical, experimental and practical part. Theoretical part describes corrosion influence on materials and specifies reactions and mechanisms of electrochemical corrosion. Special attention was given to corrosion reactions in salty aqueous solutions as they are relevant to later described immersion testing. As a part of preparations prior to apparatus construction standard ASTM G44 was analyzed. Standard ASTM G44 provided guidelines for alternating immersion testing. Respecting directions of the standard the draft design was produced first and was later followed by final construction design for the immersion apparatus.*

*Concluding practical thesis part, single apparatus was produced according to final design blueprints. Apparatus was installed and prepared for operation in the Laboratory for material protection on the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture in Zagreb University.*

*Experimental part describes immersion testing of two sets of specimens for different duration periods (5 hours and 90 hours). Purpose of the first test was to establish apparatus precision and reliability. Second test was conducted for six carbon steel specimens immersed in various corrosive aqueous solutions. This testing demonstrated accelerated corroding during alternating immersion and inefficiency of corrosion inhibitors if applied inadequately.*

*Alternating immersion testing apparatus was successfully constructed, manufactured and applied which fulfils the goal of this thesis.*

## SADRŽAJ

1.	UVOD	1
2.	KOROZIJA	2
2.1.	OPĆA KOROZIJA	8
2.2.	LOKALNE KOROZIJSKE POJAVE	10
2.2.1.	Korozija u procijepu	11
2.2.2.	Rupičasta korozija	11
2.2.3.	Interkristalna korozija	12
2.2.4.	Napetosna korozija	12
2.2.5.	Galvanska korozija	12
2.2.6.	Fazna ili selektivna korozija	13
2.3.	KEMIJSKA KOROZIJA	14
2.4.	ELEKTROKEMIJSKA KOROZIJA	16
2.5.	SKLONOST MATERIJALA PREMA STVARANJU MIKROČLANAKA	17
2.5.1.	Oksidacija i redukcija (redoks proces)	19
2.5.2.	Depolarizacija	22
2.5.2.1.	Kisikova depolarizacija	22
2.5.2.2.	Vodikova depolarizacija	23
2.6.	ŠTETE UZROKOVANE KOROZIJOM	24
3.	ISPITIVANJE KOROZIJE	28
4.	PROJEKTIRANJE, IZRADA I ISPITIVANJE NAPRAVE ZA ISPITIVANJE KOROZIJE URANJANJEM PREMA ZAHTJEVIMA NORME ASTM G 44	29
4.1.	PRIJEVOD NORME ASTM G 44	29
4.1.1.1.	Opseg norme	29
4.1.1.2.	Referentna dokumentacija	29
4.1.1.3.	Kratak opis primjene	30
4.1.1.4.	Značaj metode i upotreba	30
4.1.1.5.	Nedostaci metode	30
4.1.2.1.	Ispitni uređaj	31
4.1.2.2.	Držači uzoraka	32
4.1.3.1.	Reagensi	32
4.1.3.2.	Stanje otopine	32
4.1.3.4.	Atmosfera	33
4.1.4.1.	Umjeravanje i standardizacija	34
4.1.4.2.	Ispitni postupak	34
4.1.4.3.	Ukupno trajanje ispitivanja	35
4.1.4.4.	Priprema ispitivanja	35

4.1.5.	Interpretacija rezultata	36
4.1.6.	Zaključak o provedenom ispitivanju	36
5.	NAPRAVA ZA ISPITIVANJE CIKLIČKIM URANJANJEM	37
5.1.	PRIPREMA IDEJNOG RJEŠENJA, OSNOVNI ZAHTJEVI	37
5.2.	RAZRADA IDEJNOG RJEŠENJA	37
5.2.1.	Vertikalno gibanje uzoraka	37
5.2.2.	Kućište, ležaji, nosači ležaja	38
5.2.3.	Upravljanje i automatizacija	39
5.2.4.	Prenosivost, fleksibilnost, trajnost	40
5.2.5.	Jednostavnost konstrukcije	41
5.2.6.	Sigurnost	42
5.3.	RAZRADA PROJEKTA	43
5.3.1.	Faze oblikovanja	43
5.3.1.1.	Oblikovanje kućišta	43
5.3.1.2.	Oblikovanje pogona i prigona	43
5.3.1.3.	Konstruiranje električnog upravljanja	43
5.3.1.4.	Faze izrade kućišta	48
5.3.1.5.	Faze strojne obrade	49
5.3.1.6.	Faze izrade električnog upravljanja	49
5.3.1.7.	Faze površinske zaštite	49
5.3.1.8.	Faza finalizacije	49
5.3.1.9.	Transport	50
5.4.	ISPITIVANJE UZORAKA OD UGLJIČNOG ČELIKA (PROBNO ISPITIVANJE)	57
6.	ISPITIVANJE UZORAKA OD UGLJIČNOG ČELIKA CIKLIČKIM URANJANJEM	59
6.1.	ANALIZA REZULTATA DOBIVENIH ISPITIVANJEM	67
7.	ZAVRŠNO OPREMANJE NAPRAVE ZA URANJANJE	69
8.	ZAKLJUČAK	70
9.	LITERATURA	72
10.	PRILOG – DODATNA FOTODOKUMENTACIJA	73

## POPIS SLIKA

- Slika 1.** Prijelaz željeza ruda-metal-hrđa (ruda)
- Slika 2.** Opća korozija čeličnog lijeva u morskoj atmosferi
- Slika 3.** Erozija unutarnjeg dijela čelične prirubnice
- Slika 4.** Mikrobiološka korozija cijevi od nehrđajućeg čelika
- Slika 5.** Hrđava skulptura Dušana Džamonje
- Slika 6.** Brončana skulptura Ivana Meštrovića ispred zgrade Sveučilišta u Zagrebu zaštićen patinom
- Slika 7.** Shematski prikazi i slike pojavnih oblika korozije
- Slika 8.** Osnovni mehanizam elektrokemijske korozije
- Slika 9.** Redoks proces, metal u vodenoj otopini
- Slika 10.** Zelena hrđa
- Slika 11.** Crvena hrđa
- Slika 12.** Magnetit
- Slika 13.** Korozija u vodenoj otopini NaCl
- Slika 14.** Depolarizacija kisika
- Slika 15.** Depolarizacija vodika
- Slika 16.** Kolaps mosta u Minneapolisu
- Slika 17.** Eksplozija plina u Guadalajari (Meksiko)
- Slika 18.** Havarija tankera "Prestige"
- Slika 19.** Detalj korodiranog brodskog trupa
- Slika 20.** Uronjeni uzorak za vrijeme ispitivanja
- Slika 21.** Izgled mogućeg ispitnog uređaja
- Slika 22.** Čelično kućište uređaja
- Slika 23.** Trodimenzionalni model nosača blazinice
- Slika 24.** Izrađeni i montirani nosač blazinice
- Slika 25.** Okretni kotač postolja
- Slika 26.** Lančani prijenos
- Slika 27.** Remenski prijenos
- Slika 28.** Logička shema upravljanja
- Slika 29.** Shema automatskog upravljanja
- Slika 30.** Shema električnog napajanja
- Slika 31.** Shema spajanja mikroprekidača
- Slika 32.** Montažni nacrt donjeg dijela kućišta
- Slika 33.** Montažni nacrt gornjeg dijela kućišta
- Slika 34.** Montažni nacrt vratila i užnica
- Slika 35.** Montažni nacrt naprave
- Slika 36.** Primjer radioničke skice (rovašena matica M18×2,5 )
- Slika 37.** Idejni izgled gotove naprave

- Slika 38.** Bušenje profila za izradu kućišta
- Slika 39.** Zavarivanje kućišta MAG postupkom
- Slika 40.** Brušenje zavara kutnom brusilicom
- Slika 41.** Glodanje nosača blazinica
- Slika 42.** Montaža mehaničkih dijelova naprave
- Slika 43.** Montaža električnog upravljanja
- Slika 44.** Upuštanje naprave u probni rad
- Slika 45.** Nezaštićeni uzorci probne serije ispitivanja prije uranjanja
- Slika 46.** Zaštićeni uzorci probne serije ispitivanja prije uranjanja
- Slika 47.** Završetak probne serije ispitivanja
- Slika 48.** Nezaštićeni uzorak u destiliranoj vodi
- Slika 49.** Nezaštićeni uzorak u pripremljenoj morskoj vodi
- Slika 50.** Zaštićeni uzorak u pripremljenoj morskoj vodi
- Slika 51.** Zaštićeni uzorak u destiliranoj vodi
- Slika 52.** Odmašćivanje uzoraka acetonom
- Slika 53.** Nanošenje inhibitora na uzorke
- Slika 54.** Početak ispitivanja
- Slika 55.** Izgled uzorka broj četiri, nezaštićeni uzorak u morskoj vodi, sniman za vrijeme kontrolnih pregleda te na početku i kraju ispitivanja
- Slika 56.** Završetak ispitivanja, posljednji ciklus
- Slika 57.** Uzorci prije početka ispitivanja
- Slika 58.** Uzorci nakon završenog ispitivanja (nakon 90 sati)
- Slika 59.** Detalj površine uzorka br. 1, uzorak bez zaštite + destilirana voda
- Slika 60.** Detalj površine uzorka br. 2, uzorak bez zaštite + inhibitor VCI 611 u destiliranoj vodi
- Slika 61.** Detalj površine uzorka br. 3, uzorak zaštićen inhibitorom VCI 369 + destilirana voda
- Slika 62.** Detalj površine uzorka br. 4, uzorak bez zaštite + morska voda
- Slika 63.** Detalj površine uzorka br. 5, uzorak bez zaštite + inhibitor VCI 611 u morskoj vodi
- Slika 64.** Detalj površine uzorka br. 6, uzorak zaštićen inhibitorom VCI 369 + morska voda
- Slika 65.** Koagulat u uzorku broj pet
- Slika 66.** Naprava za ispitivanje uranjanjem prema normi ASTM G44 u Laboratoriju za zaštitu materijala Fakulteta Strojstva i Brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu 2008. godine



## POPIS TABLICA

- Tablica 1.** Osnovna podjela korozije prema mehanizmu djelovanja
- Tablica 2.** Podjela procesa degradacije materijala
- Tablica 3.** Podjela korozijskih procesa prema području djelovanja
- Tablica 4.** Podjela korozijskih procesa prema brzini djelovanja
- Tablica 5.** Reakcije oksidacije metala
- Tablica 6.** Reakcije redukcije u različitim otopinama
- Tablica 7.** Kemijske reakcije korozije željeza u slabo kiseloj vodenoj otopini
- Tablica 8.** Reakcije depolarizacije kisika
- Tablica 9.** Reakcije depolarizacije vodika
- Tablica 10.** Katastrofalne posljedice korozije
- Tablica 11.** Izravni troškovi uzrokovani korozijom
- Tablica 12.** Materijal upotrebljen za izradu mehaničkih dijelova naprave
- Tablica 13.** Stanje površine uzoraka od ugljičnog čelika i sastav korištene otopine

## **POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA FIZIKALNIH VELIČINA**

<b>Me</b>	Atom metala
<b>z</b>	Valencija metala
<b>x</b>	Faktor za uravnoteženje kemijske jednadžbe
<b>[W]</b>	Jedinica snage (elektromotora)
<b>[V]</b>	Jedinica napona
<b>i</b>	prijenosni omjer redukcije vratila
<b>[Nm]</b>	Jedinica okretnog momenta
<b>[kg]</b>	Jedinica mase
<b>[cm]</b>	Jedinica duljine
<b>[pH]</b>	Oznaka kiselosti otopine
<b>[l]</b>	Jedinica zapremnine

Izjavljujem da sam diplomski rad na temu " Projektiranje naprave za korozijsko ispitivanje uranjanjem" izradio samostalno uz potrebne konzultacije, služeći se stečenim znanjem i navedenom literaturom.

Goran Mance

Hvala supruzi Ines na beskrajnom strpljenju i podršci, majci i ocu što su usprkos mom dugogodišnjem studiju imali vjere u mene!

Posebno zahvaljujem svom mentoru profesoru Ivanu Juragi na izvrsnom vodstvu i strpljivosti, te što je dodijelivši mi ovaj diplomski zadatak pružio mogućnost da dokažem svoje sposobnosti!

Hvala asistentu Vinku Šimunoviću i znanstvenom novaku Ivanu Stojanoviću na pruženoj pomoći u pronalaženju pravog puta kroz mnoštvo literature koja mi je bila na raspolaganju!

Docentici Vesni Alar zahvaljujem na susretljivosti u korištenju laboratorijskih resursa i pomoći pri rješavanju problema iz područja kemije!

Također, hvala Dubravki Ulagi i svima koji su svojim radom i trudom doprinijeli oblikovanju mog diplomskog rada!

## 1. UVOD

Korozija je stalno prisutna pojava u svijetu koji nas okružuje kao prirodna sklonost materijala da se vrati u svoje kemijski ili fizički stabilnije stanje. Bez obzira da li je riječ o sitnim crvenkastim točkicama na upravljaču vašeg najdražeg bicikla ili o korodiranom trupu tankera koji zbog proboja spremnika ispušta naftu u Jadran, korozija svakodnevno prouzrokuje velike materijalne i ekološke štete. Materijalne štete se najčešće mogu izraziti kroz cijenu popravka ili zamjene oštećene konstrukcije no, ekološke štete mogu biti još veće, do te mjere da mogu nastupiti nepovratne promjene u okolišu.

Iz svega navedenog lako je zaključiti da je izučavanje i upoznavanje korozijskih procesa izuzetno važno za sigurnost i trajnost konstrukcija te prijeko potrebno za podizanje ekonomičnosti i isplativosti bilo koje industrijske grane.

Mnoge znanstvene ustanove i grupe stručnjaka već se dugi niz godina bave proučavanjem korozije no postoji još mnogo toga što treba otkriti, odrediti i izmjeriti kako bi se moglo reći da je određeni tip korozije potpuno definiran te konačno postoji potpuna kontrola određenog korozivnog procesa.

Dobro poznavanje mehanizama korozije omogućava primjenu preventivnih mjera te se time ostvaruje direktna i indirektna ušteda sredstava koja bi inače bila utrošena na popravljanje oštećenja nastalih korozijom. Proučavanje korozijskih procesa je složen i relativno dugotrajan postupak koji zahtjeva primjenu različite laboratorijske opreme. Provodi se u laboratorijskim, eksploatacijskim i različitim terenskim uvjetima. U tom smislu potrebno je za ispitivanje određenog tipa korozije konstruirati i izraditi prikladan laboratorijski uređaj o čemu će biti više riječi u završnom dijelu ovog diplomskog rada.

## 2. KOROZIJA

Korozija je spontani proces koji se može samo eventualno usporiti, ali ne i spriječiti.

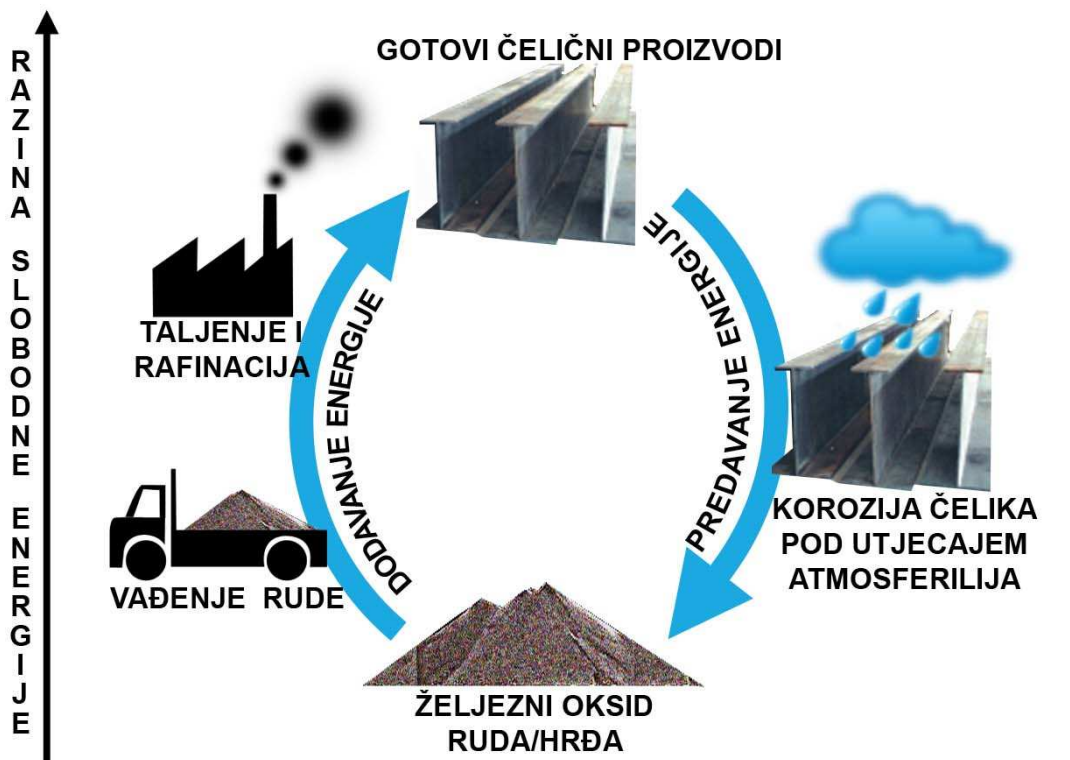
Korozijom, kemijskim i elektrokemijskim promjenama metal zapravo prelazi od elementarnog stanja u spojeve u kojima se najčešće nalazi kao ruda u prirodi.

Da bi se od rude proizveo metal, ruda se raznim proizvodnim procesima prerađuje pri čemu se materijalu dovodi energija. Rezultat je kristalno stanje metala visoke razine slobodne energije.

Prirodna težnja metala je da reagira s drugim tvarima i odgovarajućim oslobađanjem energije prijeđe natrag u stanje niže energije. Smanjivanje slobodne energije čini pokretačku silu korozijskih procesa.

Sama korozija je proces suprotan proizvodnji metala, ali se odvija spontano. [1]

Na primjeru željeza je najlakše opisati prijelaz materijala s visoke na nisku energetska razinu (slika 1.).



**Slika 1.** Prijelaz željeza ruda – metal – hrđa (ruda) [1]

Metali koji imaju nisku energetska razinu kao što su zlato i platina lako odolijevaju prirodnom okolišu i ostaju postojani u metalnom obliku tisućama godina. Najbolji primjer su zlatne kovanice Rimskog carstva (31 BC - 476 AD ) koje nakon više od 1500 godina u tlu ostaju neoštećene i sjajne.

Korozija kemijski i/ili fizički troši materijal, a brzina kojom se odvija ovisi o termodinamičkim i kinetičkim uvjetima (temperaturi, tlaku, itd.) te o vanjskim i unutarnjim čimbenicima.

Vanjski i unutarnji čimbenici utječu na pokretačke sile korozije kao i na otpore koji se suprotstavljaju tim silama. Vanjski i unutarnji čimbenici su uzrok pokretačke sile kojoj je osnova prirodni afinitet između tvari koje se nalaze u sastavu materijala i medija s kojim je u interakciji.

*Afinitet* se mjeri kao maksimalni reverzibilni korisni rad reakcije ili kraće, reakcijski rad koji se može dobiti od nekog sustava u nekoj kemijskoj reakciji.

Korozija je spontana reakcija osim u slučajevima kada ne postoji afinitet u promatranom sustavu. U tim slučajevima korozija se može pojaviti uz prisutnost vanjske pokretačke sile u obliku električnog napona (elektromotorne sile).

Električni napon uzrokuje pojavu toka struje koji pak troši rad iz vanjskog izvora energije. Ovakav tip korozije je primjerice otapanje anoda kod elektrolize te korozija zbog utjecaja lutajućih struja.

Otpore koji se suprotstavljaju nastajanju i razvoju korozije možemo podijeliti na aktivacijske (kinetičke) i prijenosne (transportne) otpore.

*Aktivacijski otpori* su posljedica inercije odnosno niske energetske razine reaktanata u procesu stoga koroziju mogu izazvati samo reaktanti većeg sadržaja energije od prosječnog.

*Prijenosni otpori* su posljedica sporog prijenosa sudionika procesa (reaktanata) u zonu korodiranja, odnosno produkata iz te zone. [2]

*Brzina korozije* ovisi o međusobnom odnosu afiniteta i prisutnih otpora. Povećanjem afiniteta raste brzina korozije a obrnuto tome, povećanjem otpora brzina korozije se smanjuje. Veličine afiniteta i otpora ovise o trenutnim lokalnim čimbenicima na površini materijala.

Općenito se korozivne procese može podijeliti u tri glavne skupine kako je prikazano u tablici 1.

**Tablica 1.** Osnovna podjela korozije prema djelovanju [2]

NAZIV	MEDIJ
Kemijska korozija	električki nevodljivi fluid
Elektrokemijska korozija	električki vodljivi fluid
Mehanička korozija (degradacija)	svi fluidi


Osim navedene, postoje i drugi oblici razaranja kod kojih dolazi do istodobnog i/ili slijednog djelovanja različitih utjecaja (tablica 2.).

**Tablica 2.** Podjela procesa degradacije materijala [2]

POJAVA ILI PROCES	DEFINICIJA I GLAVNA OBILJEŽJA	NAJČEŠĆE POSLJEDICE
Korozija (slika 2.)	Kemijsko trošenje materijala djelovanjem plinovitog ili kapljevitoz medija pri čemu nastaju čvrsti, otopljeni ili plinoviti produkti.	Smanjenje mase i dimenzija (rjeđe – prividno povećanje mase i dimenzija zbog ostajanja čvrstih produkata na površini materijal), smanjenje opteretivosti, povećanje hrapavosti, pojava pukotina i perforacija, kvarenje izgleda, povećanje površinskog električnog otpora i onečišćenje fluida.

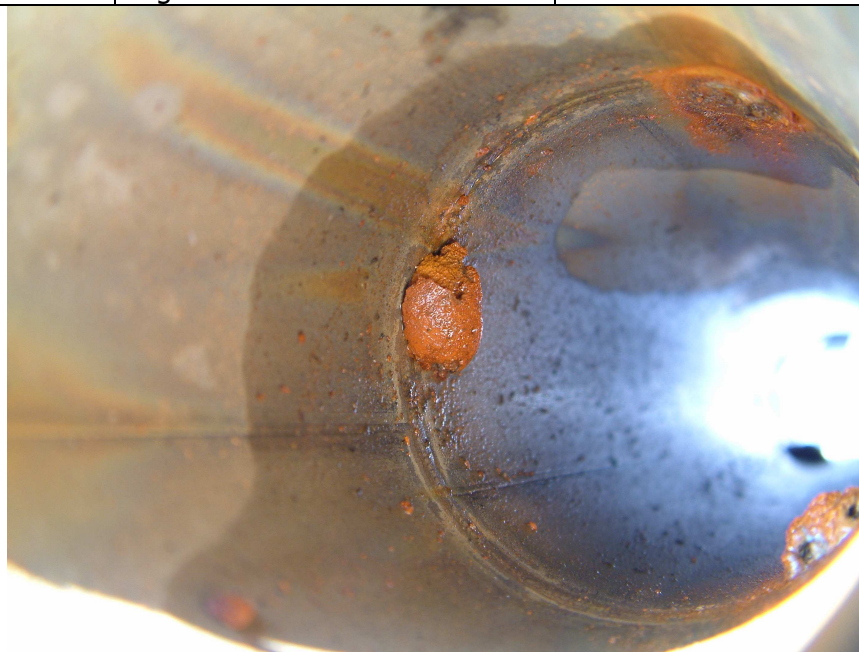


**Slika 2.** Opća korozija čeličnog lijeva u morskoj atmosferi

Izgaranje	Povišenjem temperature potaknuta nagla oksidacija drva i mnogih polimernih materijala kisikom iz zraka uz pojavu svjetla i razvijanje topline.	Rasplinjavanje organskih materijala u ugljikove okside, vodenu paru i druge plinove uz zaostatak pepela i eventualnu pojavu čađe, izobličenje, lom i potpuno izgaranje.
Truljenje	Biokemijsko razaranje drva djelovanjem gljivica i mikroorganizama (smeđa i bijela trulež).	Pogoršanje mehaničkih svojstava, kvarenje izgleda i lom.
Toplinski raspad (destrukcija)	Razgradnja molekula organskih materijala pri povišenim temperaturama.	Rasplinjavanje i pougljivanje materijala, smanjenje mase i dimenzija, pogoršanje mehaničkih svojstava, izobličenje i lom.
Degradacijsko starenje	Polagani, fizikalni i kemijski procesi oštećivanja materijala uz sudjelovanje ili bez sudjelovanja tvari iz okoliša. Starenje se ubrzava povišenjem temperature i povećanjem napreznja, a kod polimernih materijala i ultraljubičastim svjetlom te ionizirajućim zračenjem.	Pogoršanje mehaničkih svojstava, npr. pojava krhkosti polimera, pojava pukotina, runjenje i lom. Neke pojave starenja ne degradiraju materijal nego su korisne (npr. očvršćivanje legura precipitacijom ili nezasićenih polimera umrežavanjem, relaksacija napetosti, sušenje drva i sl.).
Abrazija (habanje)	Mehaničko trošenje materijala odrezivanjem čestica trenjem između dvaju čvrstih tijela.	Smanjenje mase, dimenzija i opteretivosti, promjena hrapavosti i kvarenje izgleda.
Erozija (slika 3.)	Mehaničko trošenje materijala odrezivanjem čestica trenjem pri relativnom gibanju materijala i fluida, osobito ako su u njemu dispergirane tvrde čestice.	Smanjenje mase, dimenzija i opteretivosti, promjena hrapavosti i onečišćenje fluida.
		
<b>Slika 3.</b> Erozija unutarnjeg dijela čelične prirubnice		



Kavitacija	Neravnomjerno mehaničko trošenje materijala u turbulentnoj struji kapljevine u kojoj se trenutno pojave mjehurići pare ili otopljenog plina, a pri njihovom kolabiranju na materiju dolazi do odrezivanja čestica.	Smanjenje mase, lokalno smanjenje dimenzija, smanjenje opteretivosti i povećanje hrapavosti.
Napad živih bića (slika 4.)	Mehaničko razaranje drva, betona i drugih materijala djelovanjem kukaca, školjki, račića, glodavaca, gljivica, biljnog korijenja i drugih živih organizama	Pogoršanje mehaničkih svojstava, povećanje hrapavosti, kvarenje izgleda, smanjenje mase, smanjenje dimenzija i opteretivosti.



**Slika 4.** Mikrobiološka korozija na cijevi od nehrđajućeg čelika

Vodikova bolest (oštećivanje vodikom)	Apsorpcija atoma vodika u metal, eventualna rekombinacija u molekule, spajanje metala u hidrid i druge reakcije.	Pojava krhkosti, šupljikavosti, raslojavanje, mjehuranje, pukotine i lom te povećanje hrapavosti.
Runjenje (mrvljenje, drobljenje)	Mehaničko razaranje heterogenih anorganskih nemetala pri promjenama temperature.	Npr. raspad betona i cigle pri smrzavanju vode u porama, raspad vatrootalnih materijala pri naglom grijanju ili hlađenju.
Adhezijsko trošenje	Lokalno taljenje i privarivanje metala i mnogih polimernih materijala te kidanje zavara pri trenju dvaju tijela.	Promjena mase i dimenzija, povećanje hrapavosti, sprječavanje gibanja (zajedanje, zaribavanje) osobito na kliznim ploham.
Taljenje	Prijelaz metala, stakla i nekih polimera u kapljevito stanje grijanjem.	Smanjenje mase i dimenzija, izobličenje a ako se događa zbog brzog gibanja kroz plin naziva se ablacijom.

Isparavanje (hlapljenje, sublimacija)	Prijelaz metala i drugih materijala u paru bez taljenja grijanjem (obično u vakuumu).	Smanjenje mase i dimenzija, ako se događa zbog brzog gibanja kroz plin naziva se ablacijom.
Elektroerozija	Trošenje metala i vodljivih nemetala (npr. grafita) pri električnom izbijanju iskrenjem ili lukom u obliku sitnih čestica.	Smanjenje mase i dimenzija, izobličenje, povećanje hrapavosti i eventualno požar.
Fizikalno otapanje	Otapanje polimernih materijala u organskim kapljevinama, anorganskih nemetala u nemetalnim talinama i metala u metalnim talinama.	Smanjenje mase i dimenzija te izobličenje.
Fizikalno izluživanje (ekstrakcija)	Otapanje omekšivača iz mekih polimernih materijala u organskim kapljevinama.	Otvrdnjavanje i pojava krhkosti, smanjenje mase i dimenzija te izobličenje.
Bubrenje (bujanje)	Upijanje vode u drvo i organskih kapljevinama u polimerne materijale.	Povećanje mase i dimenzija, izobličenje i pogoršanje mehaničkih svojstava.
Puzanje	Trajna (plastična) deformacija metala i drugih žilavih materijala statičkim naprezanjem osobito na visokoj temperaturi.	Izobličenje.
Oštećivanje zbog umora	Pri dinamičkom naprezanju materijal se umara tj. smanjuje mu se čvrstoća pa nakon dovoljnog broja ciklusa naprezanja može doći do preopterećenja (loma).	Pojava pukotina i lom.
Oštećivanje zbog napetosti	Učinak napetosti (zaostalih naprezanja) nakon zavarivanja ili oblikovanja plastičnom deformacijom.	Izobličenje, pojava pukotina i lom.
Udar groma	Naglo povišenje temperature i povećanje naprezanja u zoni atmosferskog električnog izbijanja.	Naglo taljenje i isparavanje, izobličenje, lom i požar.
Mehaničko preopterećenje	Preveliko naprezanje materijalu izuzetnim okolnostima zbog tehničke pogreške, ratnog napada ili prirodne nepogode.	Naglo izobličenje, pojava pukotina, lom i eksplozija.

Korozijske procese se može također podijeliti i prema načinu na koji korozijski proces zahvaća materijal kao i prema tijeku procesa kako je prikazano u tablicama 3. i 4. [2]

**Tablica 3.** Podjela korozijskih procesa prema području djelovanja [2]

<b>OBLIK KOROZIJE</b>	<b>VELIČINA ZAHVAĆENOG PODRUČJA</b>
Opća, ravnomjerna ili neravnomjerna korozija	čitava površina materijala; intenzitet oštećenja podjednak na svim zahvaćenim površinama
Lokalna korozija -jamičasta ( <i>pitting</i> ), školjkasta	oštećenja ograničena na pojedina mjesta na površini uz relativno veliku dubinu oštećenja
Interkristalna (intergranularna) korozija	oštećenja duž granica kristalnih zrna prema dubljim dijelovima materijala, na površini gotovo nevidljiva
Selektivna korozija	Oštećuje samo određene faze odnosno komponente materijala

**Tablica 4.** Podjela korozijskih procesa prema brzini djelovanja [2]

<b>BRZINA KORODIRANJA</b>	<b>OPIS</b>
Linearna	Brzina korodiranja je konstantna
Usporena	Protekom vremena brzina korodiranja je sve manja
Ubrzana	Protekom vremena brzina korodiranja je sve veća
Miješana	Brzina korodiranja se mijenja od ubrzanе do usporene i obratno, zavisno o fazi u kojoj se korozivni proces nalazi
Diskontinuirana	Korozivni proces se odvija različitim brzinama u različitim vremenskim razdobljima.

## 2.1. OPĆA KOROZIJA [3]

Opću koroziju karakterizira oštećivanje površine materijala koje jednoliko napreduje po čitavoj površini. Gubitak materijala napreduje do potpunog propadanja konstrukcije.

Prema gubitku materijala, ovo je najznačajniji oblik korozije koji godišnje "odnese" tone materijala.

Opću koroziju lako je mjeriti i predvidjeti njeno napredovanje pa bez obzira na navedena svojstva, ovaj oblik korozije rijetko dovodi do havarija.

Djelovanje ove vrste korozije lako je uočiti zbog promjena na površini, a kontrolirati se može jednostavnom primjenom katodne zaštite ili premaza.

Neki materijali (kao što su bakar i njegove legure) izloženi djelovanju atmosferilija stvaraju na površini spojeve (okside, sulfide i karbonate) koji čine homogeni film i štite materijal od daljnjeg prodiranja korozije, a nazivamo ih patinom. [4]

Iako koroziju doživljavamo kao estetski neprihvatljivu pojavu, u nekim se slučajevima može namjerno dopustiti njeno djelovanje kako bi se postigao poseban, željeni efekt (slike 5.i 6.).



**Slika 5.** "Hrdava" skulptura  
Dušana Džamonje, [5]



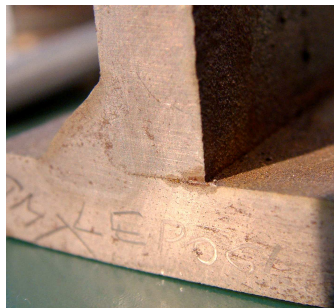
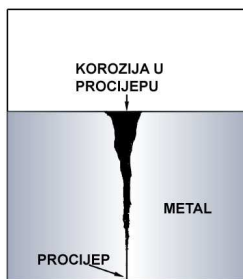
**Slika 6.** Brončana skulptura Ivana  
Meštrovića ispred zgrade  
Sveučilišta u Zagrebu zaštićen  
patinom [6]

## 2.2. LOKALNE KOROZIJSKE POJAVE

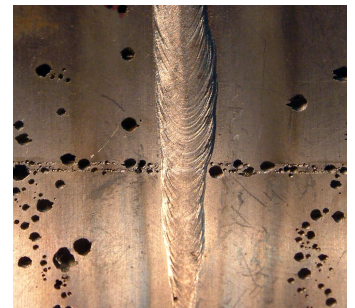
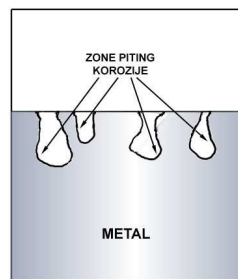
Za razliku od opće korozije lokalni oblici korozije (česti na nehrđajućim čelicima) pojavljuju se iznenada, što otežava njihovo pravovremeno zaustavljanje. U najgorim slučajevima mogu dovesti do havarije gotovo bez gubitka mase materijala.

Najčešći pojavni oblici lokalne korozije su (slika 7.):

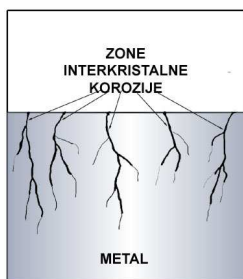
- korozija u procijepu
- rupičasta
- interkristalna
- napetosna
- galvanska i
- selektivna korozija.



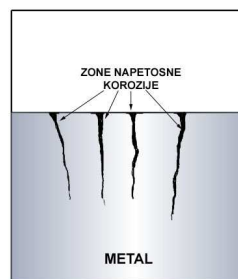
a) korozija u procijepu Cr-Ni čelika



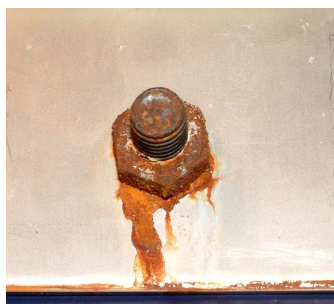
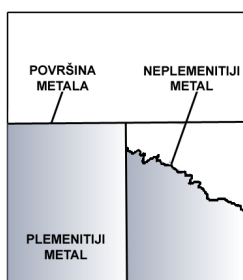
b) rupičasta korozija (piting) Cr-Ni čelika



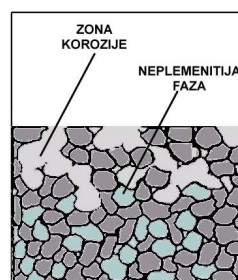
c) interkristalna korozija Cr-Ni čelika



d) napetosna korozija Cr-Ni čelika



e) galvanska korozija Cr-Ni čelika



f) selektivna korozija Cr-Ni čelika

**Slika 7.** Shematski prikazi i slike pojavnih oblika korozije

Glavni čimbenici koji utječu na iniciranje ovih korozijskih procesa su [1]:

- prisutstvo kritičnih koncentracija agresivnih ili inhibirajućih medija
- visoki korozijski potencijal uzrokovan prisutnošću oksidizirajućih spojeva
- povišena temperatura
- područja stagnacije medija
- heterogenosti površine i mikrostrukture te
- mikrobiološka aktivnost.

### **2.2.1. Korozija u procijepu**

Korozija u procijepu javlja se u procijepima i pukotinama konstrukcije. Ovaj oblik korozije je elektrokemijskog karaktera, a najčešće započinje zbog:

- nestajanja inhibitora u procijepu
- nestajanja kisika
- smanjenja pH vrijednosti medija u pukotini (raste kiselost) ili
- koncentriranja aktivnih slobodnih iona.

Područje procijepa postaje lokalna aktivna anoda u odnosu na ostatak konstrukcije na kojoj se pukotina nalazi. Zbog aktivnosti anodnog područja, može doći do stvaranja nakupina iona (npr. klor) te sve intenzivnijeg otapanja metala. Slobodni ioni nakupljaju se u pukotini povećavajući električnu vodljivost medija [1].

### **2.2.2. Rupičasta korozija (piting)**

Ovaj tip korozije karakterizira nastajanje rupica i pukotina na površini metala. Rupice mogu biti znatno međusobno udaljene ili pak usko zbijene stvarajući dojam opće korozije.

Ovaj tip korozije mogu inicirati:

- lokalna kemijska ili mehanička oštećenja zaštitnog pasivnog filma na površini metala
- nehomogenosti u strukturi metala ili
- lokalno djelovanje mikroorganizama.

Rupice su često ispunjene korozivskim produktima te su stoga teško primjetne. Dno rupice predstavlja anodno područje u odnosu na ostatak metala (katodu), tako da je trošenje vrlo intenzivno. Medij unutar pukotine ima smanjen iznos pH i visoki udio iona klora (posebno izraženo u morskoj vodi) [1].

### **2.2.3. Interkristalna korozija**

Interkristalna korozija jest proces koji se širi duž granica kristalnih zrna materijala s konačnim rezultatom potpunog razaranja strukture.

Interkristalna korozija može biti spor proces koji traje godinama, ali konačno dovodi do potpunog razaranja materijala i propasti konstrukcije [1].

### **2.2.4. Napetosna korozija**

Napetosna korozija se pojavljuje na opterećenim metalnim konstrukcijama u korozivnom mediju. Naprezanja metala mogu biti eksploatacijska (vanjska) ili zaostala (unutarnja). Zaostala naprezanja mogu biti posljedica hladnog deformiranja, nejednolikog hlađenja nakon toplinskih intervencija (najčešće zavarivanja), strukturnih promjena, toplinskih dilatacija i obrade odvajanjem čestica.

Navedena naprezanja (unutarnja i vanjska) uzrokuju razaranje pasivnog zaštitnog filma na površini metala. Zbog utjecaja korozivnog medija dolazi do transkristalnog ili pak interkristalnog napredovanja korozije.

Zbog slabe uočljivosti, ovaj oblik korozije je izuzetno opasan. Moguće su havarije konstrukcije bez značajnog, gotovo nikakvog gubitka mase materijala.

### **2.2.5. Galvanska (bimetalna) korozija**

Ranije navedeni oblici korozije (s izuzetkom napetosne) imaju sličan način odvijanja procesa korodiranja koji se najbolje može opisati galvanskom korozijom .

Galvanska korozija se pojavljuje ukoliko su dva metala različitih potencijala u kontaktu te uronjeni u vodljivi medij (elektrolit). Riječ je o elektrokemijskom procesu u kojem glavnu pokretačku silu čini potencijal između spomenutih metala u spoju. Brzina i intenzitet napredovanja korozije direktno ovisi o razlici elektrodnih potencijala. S povećanjem razlike potencijala raste i brzina korozije.

Bitni čimbenici za razvoj i napredovanje galvanske korozije su [7]:

- zajednički strujni krug
- zajednički elektrolit u koji su uronjeni
- različiti potencijali površine i
- geometrija dijelova koji se nalaze u kontaktu.

Proces bimetalne korozije zasniva se na principu galvanskog članka.

Protjecanjem struje neplemenitiji metal (anoda) podložan je progresivnom oštećivanju dok plemenitiji metal galvanskog članka ostaje netaknut. Na ovom principu se temelje i metode (aktivne i pasivne) katodne zaštite .

#### **2.2.6. Fazna ili selektivna korozija**

Fazna korozija može "napasti" materijale koji imaju heterogenu strukturu, tj. mješavina su više različitih faza.

U ovom procesu dolazi do selektivnog nestajanja neplemenitije komponente (faze) metala iz legure.

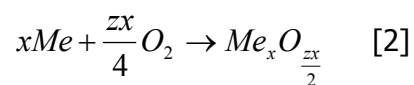
Postupak može biti ubrzan djelovanjem elektrokemijskih čimbenika [1].



### 2.3. KEMIJSKA KOROZIJA

Kemijska korozija nastaje kao izravna kemijska reakcija metala (materijala) i korozivnog medija. Nastali korozijski produkti se sastoje od različitih spojeva no najčešće su to oksidi i sulfidi. Ovaj tip korozije se pojavljuje u fluidnim neelektrolitima bez prisutstva vode. Fluidi pogodni za ovu vrstu korozije su vrući oksidni plinovi (vrući zrak, dimni plinovi) te organske kapljevine (naftna goriva i maziva). [2]

U navedenim fluidima oksidacija metala se odvija prema slijedećoj jednadžbi:



u kojoj su:

Me – atom metala,

z - valencija metala

x – faktor potreban za uravnoteženje jednadžbe ( $x \in \mathbb{N}$ ).

Neelektrokemijska korozija se često pojavljuje u industrijskim uvjetima, primjerice pri toplinskoj i plastičnoj obradbi metala (ogorina, okujina) ili pak na svim plohama strojeva koje se podmazuju. [2]

Razvoju kemijske korozije pridonosi i postojanje prirodnog afiniteta materijala prema stvaranju oksida i sulfida. Povećanjem temperature raste afinitet te najčešće i brzina korodiranja, ali samo do određene temperaturne granice kada se smjer odvijanja reakcije mijenja. Daljnjim povećanjem temperature nastali korozijski produkti se ponovno raspadaju na elemente od kojih su nastali. Za antikorozivnu praksu ovo saznanje nije od velike koristi jer je za većinu metala ova temperatura daleko iznad njihovog tališta te na ovaj način nije moguće povratiti nastali korozijski proces ili ukloniti korozijske produkte.

Općenito, afinitet za neelektrokemijsku koroziju ovisi o vrsti procesa, temperaturi te o prisutnoj koncentraciji i parcijalnom tlaku sudionika. [2]

Osim prisutnog afiniteta, postoje i otpori koji se suprotstavljaju njegovom djelovanju te time usporavaju brzinu odvijanja korozijske reakcije. Najznačajniji otpori su niska energetska razina reaktanata i zaštitna svojstva čvrstih korozijskih produkata.

Kao mjera energetske razine reaktanata najčešće su uzima temperatura iako može doći do promjene energetske razine površine i pod drugim utjecajima, npr. radijacije ili mlaza elementarnih energetskih čestica.

Energetska razina površine mora biti dovoljna da prevlada aktivacijsku barijeru reakcije koja je posljedica inercije reaktanata.

Oksidacija može nastupiti samo ako je kinetička energija atoma kisika koji udaraju u površinu metala veća od energije potrebne za raskid međuatomarnih metalnih veza u materijalu. Povećanjem temperature raste kinetička energija atoma te se broj "uspješnih" sudara povećava. Zbog ovog razloga, na sobnoj temperaturi se oksidacija gotovo ne odvija dok na izrazito visokim temperaturama može biti vrlo opasna i brza. [2]

Korozijski produkti kemijske korozije su, kao što je već navedeno, oksidi i sulfidi. Produkti su najčešće u čvrstom stanju te dobro prijanjaju na površinu metala. Tako nastali sloj (debeli) predstavlja barijeru za korozivni fluid te se posljedično korozija usporava. Ovakav zaštitni učinak korozivnih produkata će bit ostvaren samo ako su zadovoljeni slijedeći uvjeti:

- Volumen korozivskih produkata mora bit jednak ili malo veći od volumena korodiranog metala jer u protivnom neće pokrivati cijelu izloženu površinu (kao npr. MgO).
- Volumen korozivskih produkata ne smije biti prevelik jer će u protivnom doći do pojave tlačnih naprezanja u sloju te njegovog drobljenja i gubitka zaštitne sposobnosti (kao npr NiS).
- Korozijski produkti moraju bit kemijski stabilni odnosno ne smiju se mijenjati u druge spojeve koji neće imati zaštitni učinak.
- Korozijski produkti moraju biti fizikalno stabilni (ne smiju se taliti).
- Sloj korozivskih produkata mora biti kompaktan te mora usporiti difuziju atoma korozivnog fluida.

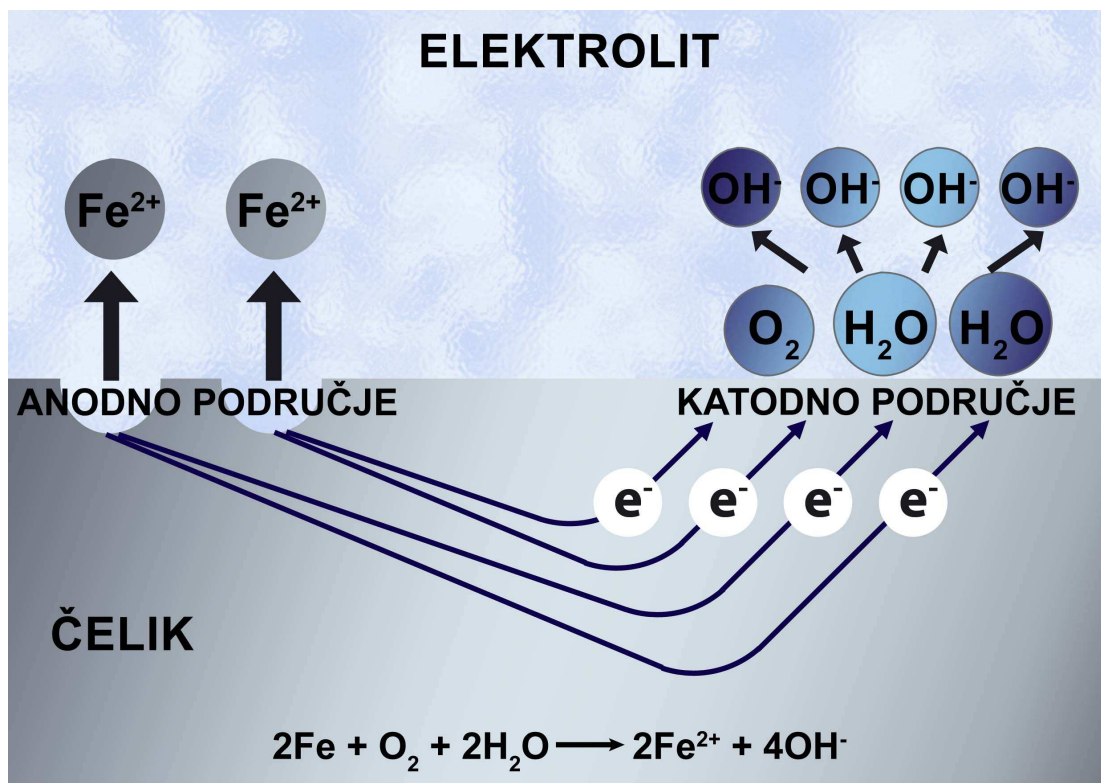
U praksi se mnogo češće od kemijske korozije pojavljuje elektrokemijska korozija. Kemijska korozija je opće prisutna kod svih motora sa unutarnjim sagorijevanjem kao i kod toplinskih postrojenja (termoelektrane, visoke peći, peći za toplinsku obradbu). Na tarnim plohama strojeva često se koriste za podmazivanje naftna maziva koja sadrže vrlo visoke koncentracije antifrikcijskih aditiva na bazi sumpora. Korozivska oštećenja tarnih ploha značajno smanjuju trajnost strojeva te postepeno smanjuju njegovu točnost i eksploataбилnost. Ova oštećenja su najčešće u rasponu od diskoloracije površinskih slojeva do dubokih jamičastih oštećenja koja bitno smetaju radu stroja. Kako bi se izbjegli učinci sumpornih spojeva na čeličnim površinama i površinama od sivog lijeva, nove generacije maziva sadrže zamjenske polimerne aditive, najčešće PTFE (politetrafluoretilen) koji je korozivno potpuno inertan. Nedostatak ovih maziva je visoka cijena i relativno slabija adhezivnost u odnosu na uobičajena maziva koja sadrže nanočestice molibden sulfida ( $\text{MoS}_4$ ).

## 2.4. ELEKTROKEMIJSKA KOROZIJA

Elektrokemijska korozija je najčešći oblik korozije. Više od 95% korozijskih oštećenja nastaje zbog elektrokemijskih reakcija između metala i okoline.

Proces elektrokemijske korozije odvija se zbog razlika potencijala različitih metala ili različitih faza istog metala zbog kojeg dolazi stvaranja galvanskog članka pri čemu metalni atomi izgube elektrone i postanu ioni koji se odvajaju od površine i tako dolazi do trošenja metala. Propagacijom korozije metal polako nestaje, a na njegovom mjestu ostaju korozijski produkti. Ova korozija se najčešće odvija u vodenim elektrolitima, ali i u svim medijima u kojima su prisutni slobodni ioni (npr. tlo, vlažni zrak). [1]

U elektrokemijskoj koroziji nastajanje galvanskog članka (ćelije) se može smatrati negativnim efektom jer njime započinje korozijski proces. Isti princip stvaranja galvanskih članaka neophodan je pri dekorativnom i zaštitnom elektroprevlačenju kao što su cinčanje ili niklanje (tzv. galvaniziranje) pa ga ne možemo uvijek smatrati potpuno štetnim (slika 8).



**Slika 8.** Osnovni mehanizam elektrokemijske korozije

Postoje dvije vrste galvanskih članaka:

- članci koji nastaju između dva različita metala uronjena u elektrolit povezana metalnom vodljivom vezom koja zatvara strujni put iona (funkcionira vrlo slično kao baterija)
- članci koji nastaju koncentrirano na malom dijelu površine istog metala i kroz isti metal zatvaraju potreban strujni put elektrona.

Elektrokemijska korozija može nastati ako su zadovoljena sva četiri uvjeta za nastajanje galvanskog članka:

- prisutnost aktivne anode iz koje izbijaju elektroni (na anodi dolazi do korozijskog trošenja)
- prisutnost aktivne katode koja je sposobna preuzeti ionski tok (katodno područje je zaštićeno od korozijskog oštećivanja)
- elektrolit odnosno fluidni vodič kroz koji se odvija migracija iona (elektroliti su najčešće vodene otopine kiselina, lužina i soli)
- povratni strujni put kojim se elektroni vraćaju u reakciju, a povezuje anodu i katodu (često je to donji neoštećeni sloj osnovnog metala na čijoj površini se odvija korozijska reakcija) [1].

Navedena četiri uvjeta se ujedno koriste za prevenciju korozije. Uklanjanjem samo jednog uvjeta korozija neće nastupiti. Zamjenom anode pogodnim metalom može se djelovanje struje u galvanskom članku pogodno promijeniti te na taj način zaustaviti oštećivanje osnovnog metala (npr. čelične konstrukcije). Na ovom principu se temelji katodna zaštita cinkom.

## **2.5. SKLONOST MATERIJALA PREMA STVARANJU MIKROČLANAKA**

Korodiranje heterogenih materijala započinje stvaranjem galvanskih mikročlanaka na površini materijala. Mikročlanci nastaju zbog različitih elektrodnih potencijala pri ionizaciji strukturnih faza. Korozija djeluje na neplemenitiju od dvije faze uključene u mikročlanak. Primjerice, korozija niskougličnih čelika napada feritnu fazu ( $\alpha\text{Fe}$ ) dok se na cementitu ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) odvija depolarizacija. Grafitizacija sivog lijeva je selektivna korozija u kojoj korodira feritna faza, a spužvasti grafit djeluje kao katoda.

Osim poznatih strukturnih faza (ferit, cementit, martenzit, itd.), ostali uključci i nečistoće u strukturi mogu djelovati kao anoda ili katoda galvanskog mikročlanka.

Sklonost ionizaciji i depolarizaciji ovisi također o položaju kristalita u materijalu. Metalni kristaliti imaju kaotičan položaj u strukturi pa je zbog različite istaknutosti bridova i ploha teško odrediti točno mjesto stvaranja mikročlanka. Bridovi, uglovi i plohe kristalita nemaju istu sklonost prema ionizaciji ili prikladnost za depolarizaciju.

Na pojavu mikročlanaka utjecaj imaju i nesavršenosti kristalne rešetke kao što su:

- distorzija rešetke
- dislokacije
- praznine
- pogreške slaganja rešetke
- područja smanjene ili povećane gustoće materijala.

Kvaliteta površine je još jedan važan čimbenik koji može znatno utjecati stvaranje mikročlanaka. Poznato je da su hrapave površine sklonije ionizaciji od glatkih. U slučaju nastanka mikročlanka, glatka površina je najčešće katoda.

Zaostala naprezanja u kombinaciji s povoljnim elektrolitom mogu biti uzrok nastanka galvanskih mikročlanaka. Prisutna naprezanja u materijalu možemo podijeliti na zaostala naprezanja i na naknadna naprezanja.

Zaostala naprezanja su najčešće posljedica plastične obrade deformiranjem (kovanja, valjanja, provlačenja), zavarivanja ili toplinske obrade.

Naknadna naprezanja su posljedica opterećenja narinutog na konstrukciju ili napetosti nastale zbog adsorpcije vodika u kristalnu rešetku. Bez obzira na vrstu prisutnog naprezanja, poznato je da napregnuta područja površine redovito postaju anode korozivnog mikročlanka. Posljedice mogu biti pojava napetosne korozije, pukotine i konačni lom konstrukcije.

Kemijsku koroziju (neelektrokemijsku) se često naziva i "suha" korozija zbog neprisutnosti vode odnosno elektrolita.

Elektrokemijsku koroziju se pak naziva i "mokra" korozija zbog potrebne prisutnosti vode (elektrolita) za reakciju.

Mokra korozija je najveći problem svih konstrukcijskih metala jer je više od milijun puta brža od suhe korozije (oksidacije u vrućem zraku).

Postoje tri važna razloga za brzo napredovanje mokre korozije prilikom korodiranja čelika:

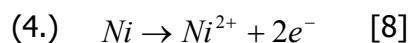
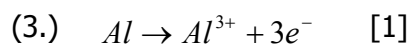
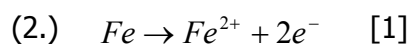
- $\text{Fe}(\text{OH})_2$  (željezni hidroksid) nastaje i brzo se izlučuje izvan metala, a ukoliko i ostane na površini, ne pruža nikakvu zaštitu
- željezni ion ( $\text{Fe}^{2+}$ ) i hidroksidni ion ( $\text{OH}^-$ ) se vrlo brzo kreću u tekućem mediju
- osnovni materijal je dobar vodič struje pa omogućava vrlo brzo kretanje elektrona.

### 2.5.1. Oksidacija i redukcija (redoks proces)

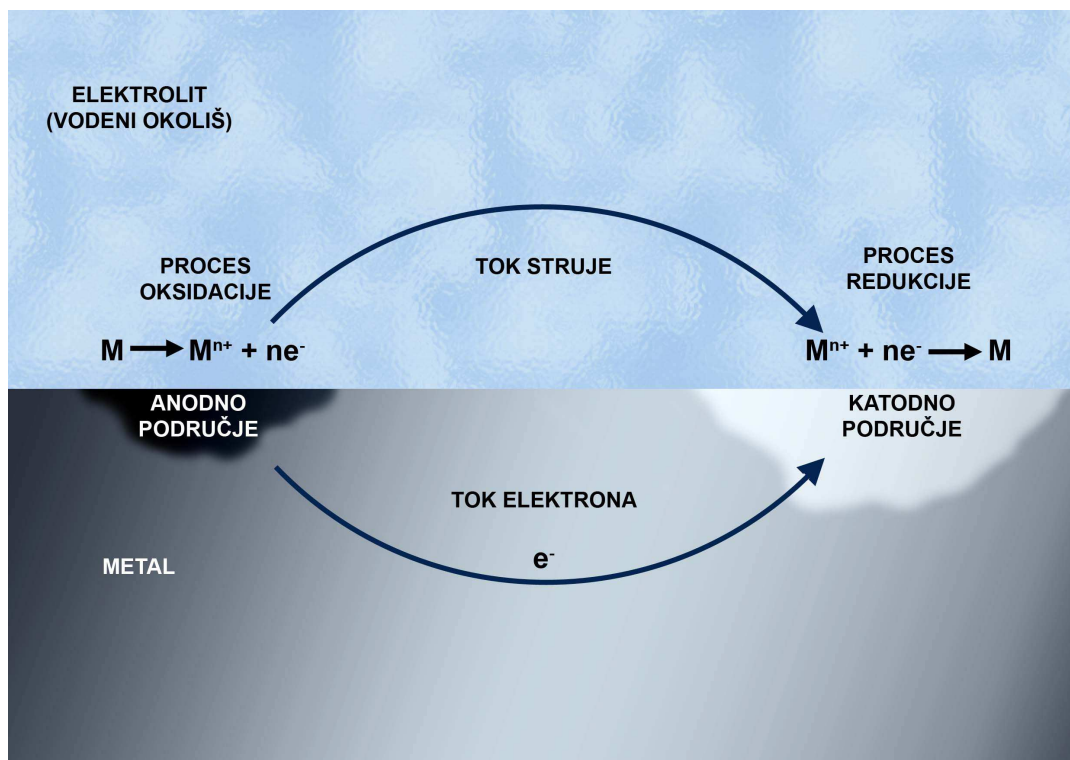
Prilikom odvijanja elektrokemijske korozije istovremeno se odvijaju dva procesa koja možemo prikazati dvjema odvojenim reakcijama.

U reakciji oksidacije atomi metala predaju elektrone i postaju pozitivno nabijeni ioni kako je prikazano poopćenom formulom (1.) i slikom 9. Primjeri reakcija nastajanja pozitivno nabijenog metalnog iona i negativnih elektrona dati su formulama 2., 3. i 4. u tablici 5. [1]

**Tablica 5.** Specifične reakcije elektrokemijske korozije



U elektrokemijskom članku, oksidacija se događa na mjestu anode pa se često naziva i anodna reakcija. Istovremeno se na katodi odvija proces redukcije pri kojem se elektroni nastali oksidacijom spajaju s pozitivno nabijenim ionima metala. Elektroni putuju prema katodnom području kroz vodič (osnovni metal), a metalni ioni kroz elektrolit. Redukcija se ne može odvijati bez oksidacije i obratno, a zajedno ih nazivamo redoks proces.



**Slika 9.** Redoks proces, metal u vodenoj otopini

U oksidaciji se elementu povećava oksidacijski broj. Elementi koji imaju sposobnost oksidirati druge nazivaju se oksidansima. Elementi sa sposobnošću redukcije drugih elemenata nazivaju se reducensima. [9]

U različitim otopinama događat će se različite reakcije oksidacije - redukcije zavisno o sastavu. Otopine s pripadnim redukcijskim reakcijama date su u tablici 6.

**Tablica 6.** Reakcije redukcije u različitim otopinama

OTOPINA	REDUKCIJSKA REAKCIJA	REZULTAT REAKCIJE
kisela otopina sa visokom koncentracijom $H^+$ iona	$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$	razvija se plinoviti vodik
kisele otopine s otopljenim kisikom ( $O_2$ )	$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 2H_2O$	voda kao rezultat redukcije
neutralne i lužnate otopine s otopljenim kisikom ( $O_2$ )	$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4(OH^-)$	viša koncentracija hidroksidnih iona u otopini
otopine sa metalnim ionima ( $M^{n+}$ )	$M^{n+} + e^- \rightarrow M^{(n-1)+}$ $M^{n+} + ne^- \rightarrow M$	

Najpoznatiji slučaj korozije jest oksidacija željeza u vodi koja sadrži otopljeni kisik. Korozija se odvija u nekoliko koraka kako je detaljno prikazano u tablici 7.

**Tablica 7.** Kemijske reakcije korozije željeza u slabo kiselj vodenoj otopini [10]

- (5.)  $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$
- (6.)  $4e^- + 4H^+ + O_2 \rightarrow 2H_2O$
- (7.)  $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$
- (8.)  $Fe^{2+} + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2$
- (9.)  $4Fe^{2+} + 4H^+ + O_2 \rightarrow 4Fe^{3+} + 2H_2O$
- (10.)  $Fe^{3+} + 3OH^- \rightarrow Fe(OH)_3$
- (11.)  $Fe(OH)_3 \rightarrow Fe_2O_3 \times H_2O$
- (12.)  $Fe(OH)_3 \rightarrow Fe_3O_4$

U prvom koraku dolazi do oksidacije željeza (uz stvaranje plinovitog vodika), koje zatim brzo prelazi u netopivi željezo(II)-hidroksid ( $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ) poznat i kao "zeleni hrđa" (slika 10.). Željezo(II)-hidroksid reagira sa vodikovim ionima i otopljenim kisikom te stvara željezo(III) ione. Željezo(II) ioni u reakciji s hidroksilnim ionima stvaraju željezo(III)-hidroksid. Zavisno o koncentraciji otopljenog kisika iz željezo(III)-hidroksida će nastati hematit (crveni hrđa,  $(\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O})$ ) (slika 11.) ili magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) (slika 12.). Kao korozijski produkti u slobodnoj atmosferi mogu također nastati spojevi željeznog pirita ( $\text{FeS}_2$ ) i siderita ( $\text{FeCO}_3$ ). [10] [11]



**Slika 10.** Zelena hrđa  
 $\text{Fe}(\text{OH})_2$  [10]



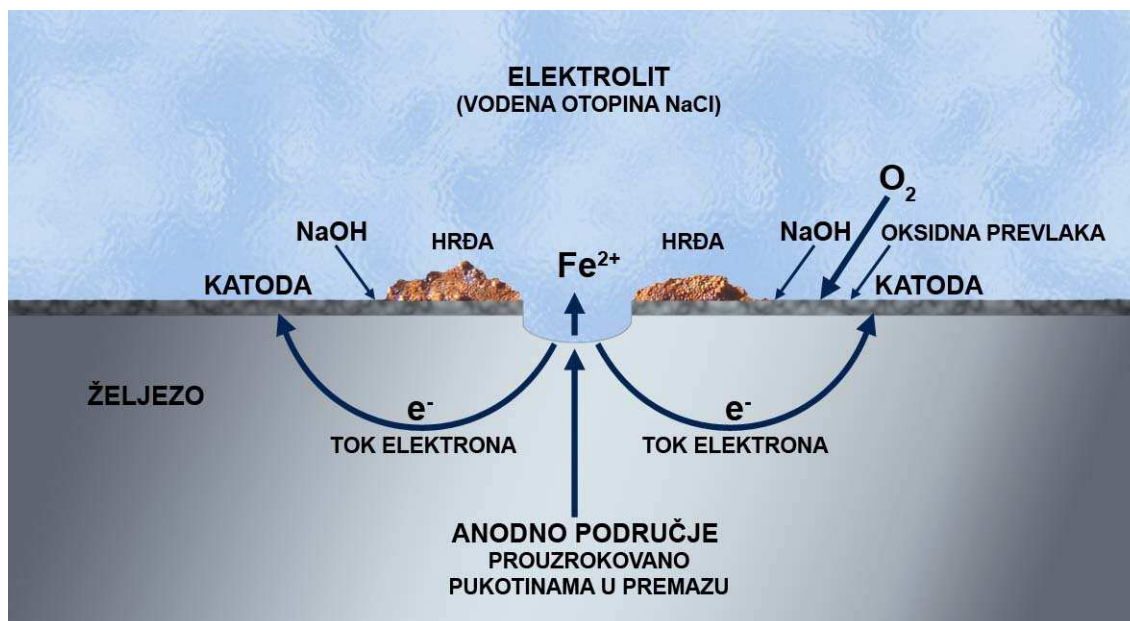
**Slika 11.** Crvena hrđa  
hematit  
 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$   
[10]



**Slika 12.** Crna hrđa  
magnetit  
 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  [10]

Na slici 13. prikazan je proces korodiranja čelika u otopini natrijeva klorida ( $\text{NaCl}$ ). Zbog pukotine u premazu dolazi do kontakta elektrolita i metala te se stvara anodno područje. Nastankom anodnog područja ostali dio površine metala postaje katoda. Između anode i katode nastaje brzi tok elektrona. Zbog velike razlike površine katode i anode, anodno područje se ubrzano troši. Željezni atomi se odvajaju i ulaze u otopinu kao pozitivni ioni. Ovakva reakcija se redovito događa u svim slanim otopinama, primjerice u morskoj vodi ili u razgaženom snijegu sa sipinom (zimsko soljenje kolnika).





**Slika 13.** Korozija u vodenoj otopini NaCl [1]

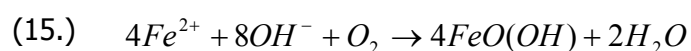
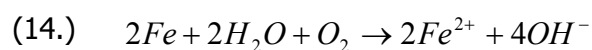
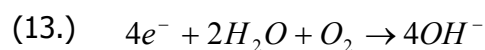
## 2.5.2. Depolarizacija

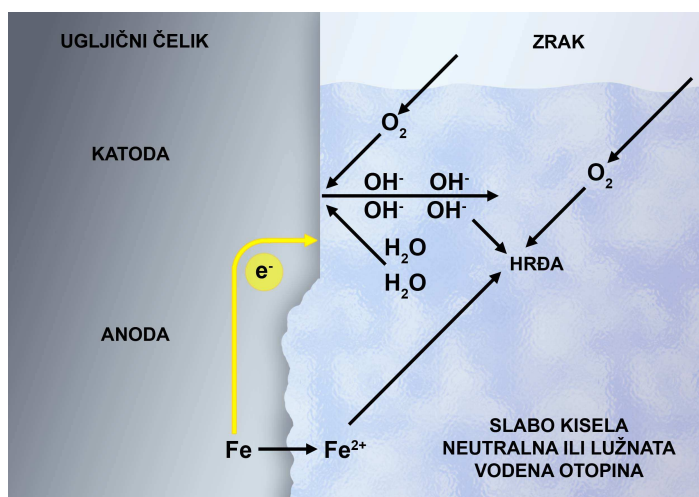
Zavisno o kiselosti elektrolita u kojem se redoks proces odvija, nastupit će vodikova ili kisikova depolarizacija.

### 2.5.2.1 Kisikova depolarizacija

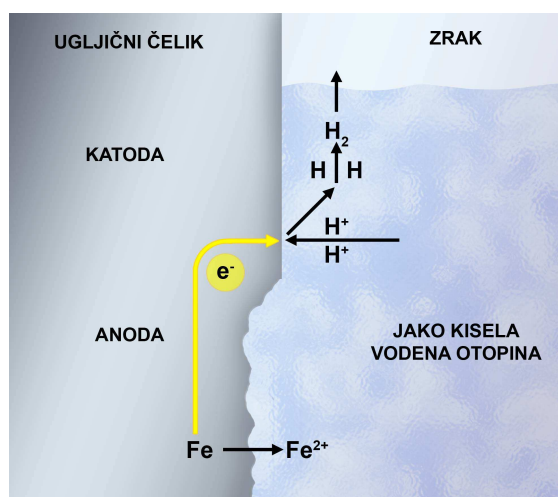
Proces depolarizacije kisika događa se u slabo kiselim, neutralnim ili lužnatim elektrolitima. Karakterizira ga stvaranje hidroksilnih iona rekombinacijom molekula vode i otopljenog kisika, (tablica 8., slika 14.).

**Tablica 8.** Reakcije depolarizacije kisika [1]





**Slika 14.** Depolarizacija kisika [1]

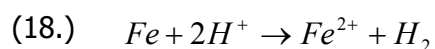
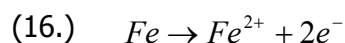


**Slika 15.** Depolarizacija vodika [1]

### 2.5.2.2. Vodikova depolarizacija

Proces depolarizacije vodika se događa u jako kiselim elektrolitima. U anodnom području nastaju metalni ioni, a na katodnom vodikovi ioni. Spajanjem vodikovih iona nastaju molekule vodika koji u obliku plina izlaze iz otopine. Ovaj proces je moguć zbog prisutnosti oslobođenih elektrona pri nastanku metalnih iona. (tablica 9., slika 15.)




**Tablica 9.** Reakcije depolarizacije vodika [9]



## 2.6. ŠTETE UZROKOVANE KOROZIJOM

Korozija je stalan i uvijek prisutan proces na svim metalnim i nekim nemetalnim konstrukcijama. Korozijom nisu zahvaćene samo velike konstrukcije (npr. mostovi, vijadukti) već i predmeti iz svakodnevne uporabe koji zbog utjecaja korozivnog okoliša postepeno propadaju. Istraživanja u Sjedinjenim Američkim Državama su pokazala da godišnje štete uzrokovane korozijom koštaju oko 100 milijardi dolara prema podacima iz 2000. godine.

**Tablica 10.** Katastrofalne posljedice korozije

<p><b>Slika 16.</b> Kolaps mosta u Minneapolis (SAD)</p>	 <p style="text-align: right; font-size: small;">Star Tribune / Brian Peterson via AP</p>	<p>Most na rijeci Mississippi kolabirao je 1.6.2007, zbog napetostne korozije na zakovanim spojevima glavnih nosača. Sedmero ljudi je poginulo, trideset je nestalo u rijeci. [12]</p>
<p><b>Slika 17.</b> Eksplozija plina u Guadalajari (Meksiko)</p>		<p>22.4.1992 dogodila se serija od deset uzastopnih eksplozija benzinskih isparenja u kanalizacijskom sustavu grada Guadalajara. Uzrok je galvanska korozija zbog blizine pocinčanih bakrenih cijevi gradskog vodovoda i postojećeg čeličnog cjevovoda za benzin. Poginulo je 206 ljudi, 500 je ozlijeđeno. [13] [14]</p>
<p><b>Slika 18.</b> Havarija tankera Prestige</p>		<p>14.11. 2002 godine, tanker Prestige natovaren teškim gorivom puca napola u oluji pred španjolskom obalom. Uzrok loma je korodirani bočni balastni spremnik. 77000 tona goriva dospijeva u more uz katastrofalne ekološke posljedice. [15]</p>

Kako bi se uštedilo, automobilska i avionska industrija SAD-a su primijenile niz administrativnih mjera te uvele mnoge promjene u svoju proizvodnju. U automobilskoj industriji se danas mnogo više pažnje pridaje kvaliteti premaza nego što je to bio slučaj u prošlosti. Šasije modernih automobila osim premazima, često su zaštićene i prevlakama (najčešće cinkom). Zbog želje za smanjivanjem ukupne težine automobila, u proizvodnji se sve češće koriste moderni materijali koji osim smanjene težine imaju i dobra antikorozivna svojstva (aluminij, kompoziti, polimeri). Upotrebom modernih materijal pokušalo se utjecati na ukupnu korozijsku izdržljivost automobila. Nažalost, navedeni materijali imaju veću proizvodnu cijenu pa ukupna ušteda nije tako velika. [16]

Korozija osim materijalnih šteta može uzrokovati gubitka ljudskih života ili nepovratno zagađenja okoliša. Primjeri nesreća uzrokovanih korozijom prikazani su u tablici 10.

Nažalost, potrebna je velika havarija i pogibija ljudi kako bi se koroziju shvatilo kao ozbiljan problem. U slučaju kolapsa mosta u Minneapolisu, državna inspekcija je dva puta te godine pregledala most i zaključila da je u dobrom i ispravnom stanju. U svijetu je u upotrebi mnogo čeličnih mostova i nosivih konstrukcija koje su stari preko šezdeset godina. Ulaganja u kontrolu i sprječavanje korozije su premalena zbog nerazumijevanja državne administracije i tehničkog neznanja. Većina starih konstrukcija je projektirana za manje nosivosti od danas nametnutih u modernom prometu (kamioni s prikolicama, teški tegljači, itd.) pa se faktor sigurnosti značajno smanjio. Smanjenjem faktora sigurnosti ne ostaje mnogo mjesta za pogreške i nesavjesno održavanje (monitoring korozije, bojenje, nadovarivanje, itd.). Zbog svih navedenih razloga, kontrola korozije na takvim objektima bi trebala biti jedan od prioriteta svake državne uprave.

Brodski prijevoz je grana industrije koja se već godinama aktivno bavi prevencijom korozije kao jednog od glavnih problema u svom poslovanju. Korodiranje brodskih trupova i spremnika svake godine stvara brodarima velike troškove (slika 19). Povećanjem troškova brodski prijevoz gubi na konkurentnosti i profitabilnosti. Nakon donošenja MARPOL konvencije (MARPOL – marine pollution) ekološke udruge izvršile su velik pritisak na brodare kako bi se povećala sigurnost brodova. Jedna od mjera povećanja sigurnosti bilo je konstruiranje tankera s dvostrukom oplatom. Dvostruka oplata smanjuje mogućnost proboja trupa zbog korozije ili mehaničkih oštećenja. Osim na moru, korozija uzrokuje velike troškove u svim granama privrede. Izravni utjecaj djelovanja korozije na privredu prikazan je u tablici 11.

**Tablica 11.** Izravni troškovi uzrokovani korozijom [16]

<b>TROŠAK</b>	<b>PRIMJER</b>
Zamjena korodirane opreme	Zbog korodiranja dolazi do opasnih oštećenja tlačnih spremnika. Spremnici za sirovu naftu na terminalima otkazuju zbog proboja stjenke.
Rušenje građevina	Korozija oštećuje vitalne dijelove te dolazi do kolapsa mostova, industrijskih hala i dizalica.
Oštećenje i/ili kvar gotovog proizvoda	Napetosna korozija uzrokuje lom kućišta ventila i procurivanje cjevovoda; opća korozija oštećuje uskladištene gotove proizvode.
Održavanje i popravak	Navarivanje korodiranog limenog krova, zamjena pumpi u naftnoj industriji, navarivanje korodiranih tarnih ploha strojeva,...
Instaliranje rezervne opreme	Ugradnja rezervnih sustava koji održavaju proces dok se zbog korozije vrši popravak glavnog sustava (npr. tri ugrađena ventilatora u tvorničkoj hali umjesto dva),...
Kontrola korozije	Stručne studije, monitoring, eksperimenti, nerazorna ispitivanja,
Inhibitori	Proizvodnja inhibitora, aplikacija i uklanjanje,...
Organski premazi	Često premazivanje drvenih dijelova konstrukcija (npr. građevinske oplata, krovne konstrukcije, prozori i vrata),...
Metalne prevlake	Prevlačenje cinkom, kromom, niklom s ciljem održavanja estetskog izgleda i antikoroziivnosti,...
Katodna zaštita	Cink protektori na brodskim trupovima, tramvajskim tračnicama,...
Razvoj novih materijala	Visoka cijena razvoja novih manje korozivnih materijala,...
Konstruiranje i primjena materijala	Češća upotreba nehrđajućih čelika u svim područjima industrije. Veće debljine stjenki spremnika kako bi se smanjila mogućnost korozijskog proboja. Nehrđajući čelici kao jedini materijal za aplikacije u prehrambenoj i industriji lijekova.
Osiguranje	Povećanje premija zbog opasnosti od korozijske havarije.
Rezervni dijelovi i oprema	Zbog opasnosti od korozijskog kvara potrebno je na skladištu uvijek imati suvišak rezervnih dijelova (npr. pumpe u kemijskoj industriji).



**Slika 19.** Detalj korodiranog brodskog trupa [17]

### 3. ISPITIVANJE KOROZIJE

Korozijska ispitivanja važan su alat za procjenu materijala u svim područjima upotrebe.

Korozijskim se ispitivanjima koristimo kako bi proučili uporabne kvalitete materijala, procijenili upotrebu alternativnih materijala, razvili strategiju zaštite i sakupili podatke o korozijskim procesima u određenim sredinama. Ispitivanja se najčešće provode kako bi se došlo do podataka koji nisu dostupni u literaturi.

Kako bi ispitivanjima dobili korisne podatke potrebno je definirati ciljeve ispitivanja, a oni su najčešće [10]:

- određivanje najpovoljnijeg materijala
- predviđanje životnog vijeka nekog dijela ili konstrukcije
- evaluacija novih materijala i postupaka
- razvoj materijala s poboljšanim korozivnim svojstvima
- kontrola kvalitete (pri određivanju da li materijal odgovara navedenim specifikacijama koje su mu priložene)
- procjenjivanje metoda prevencije i
- proučavanje korozijskih mehanizama.

Vrijednosti dobivene ispitivanjima potrebno je interpretirati u neku značajku korozijskog procesa (npr. brzinu korozije).

Korozijsko ponašanje rezultat je složene interakcije površine materijala i okoliša koji ga okružuje, pa prilikom kreiranja i planiranja ispitivanja treba voditi računa da uvjeti ispitivanja budu što sličniji (ili sličnog djelovanja) uvjetima u eksploataciji.

Korozijsko ponašanje materijala ovisi o okolišu, uvjetima izlaganja te svojstvima samog materijala i primijenjene antikorozivne zaštite. Najpouzdaniji podaci za predviđanje korozijskog ponašanja materijala dobivaju se upotrebom i terenskim ispitivanjima jer je u ovim slučajevima materijal izložen stvarnim uvjetima u kojima treba vršiti svoju funkciju.

Postupci ispitivanja korozije mogu biti provedeni u samo nekoliko minuta ili sati, ali i vrlo kompleksni i zahtijevati ispitivanja kroz dulji vremenski period.

Prilikom pripremanja uzoraka treba obratiti pažnju da budu reprezentativni za materijal koji se ispituje, što znači da budu sastava, metalurškog stanja i proizvodnog oblika (lijevani ili valjani) kao i materijal. Korozijsko ponašanje može osim strukturom metala u velikoj mjeri biti uvjetovano stanjem površine.

## **4. PROJEKTIRANJE, IZRADA I ISPITIVANJE NAPRAVE ZA ISPITIVANJE KOROZIJE URANJANJEM PREMA ZAHTJEVIMA NORME ASTM G 44**

### **4.1. PRIJEVOD NORME ASTM G44 [18] [19]**

Norma ASTM (*American Society for Testing and Materials*) G 44 određuje metode i opremu za ispitivanje korozije metodom uranjanja uzoraka u korozivni fluid.

Normom su definirani:

#### **4.1.1.1. Opseg norme**

- Koristi se za ispitivanje aluminijskih i željeznih legura u 3,5% -tnoj otopini natrijevog klorida (NaCl) i vode.
- Dozvoljeno je korištenje ove ispitne metode samo ukoliko su uzorci nakon izranjanja iz otopine slobodno izloženi okolišnom zraku odnosno ako im je omogućeno normalno sušenje na atmosferi. Ova norma ne obuhvaća ispitivanja u kojima se fluidom periodički potapa uzorak u nekom spremniku bez njegovog potpunog površinskog sušenja.
- Ovo ispitivanje je namijenjeno za potrebe utvrđivanja korozivnih svojstava novorazvijenih legura te za provjeru primjenjivosti specifične legure u specifičnim uvjetima eksploatacije te ukoliko je potrebno utvrditi kvalitetu nekoliko slijednih serija istog materijala.

#### **4.1.1.2. Referentna dokumentacija**

ASTM standardi:

- D 1141 - Sastav umjetne morske (oceanske) vode
- D 1193 - Sastav reakcijske vode
  - E 3 - Metode za pripremu metalografskih uzoraka
  - G 1 - Načini pripreme, čišćenja i pregleda uzoraka u korozivnim ispitivanjima
- G 16 - Smjernice za primjenu statističkih metoda u analizi rezultata korozivnog ispitivanja
- G 47 - Ispitne metode za određivanje podložnosti napetosnoj koroziji visokočvrstih aluminijskih proizvoda.



#### **4.1.1.3. Kratak opis primjene**

Ispitivanje se sastoji od ciklusa u trajanju od jednog sata. Ciklus je podijeljen u dva dijela, 10 minuta uranjanja u 3,5%-tnu vodenu otopinu NaCl-a te nakon toga 50 minuta sušenja uzoraka na slobodnoj atmosferi nakon izranjanja. Ovaj ciklus se neprekidno ponavlja tijekom 24 sata u danu, a broj dana ispitivanja posebno se utvrđuje za svaku leguru za koju se ispitivanje vrši. Uobičajeno ukupno vrijeme ispitivanja za aluminijske i željezne legure je 20 do 90 dana. Ispitivanje može trajati i dulje od 90 dana, zavisno o korozivnoj otpornosti ispitivane legure prema slanoj otopini.

#### **4.1.1.4. Značaj metode i upotreba**

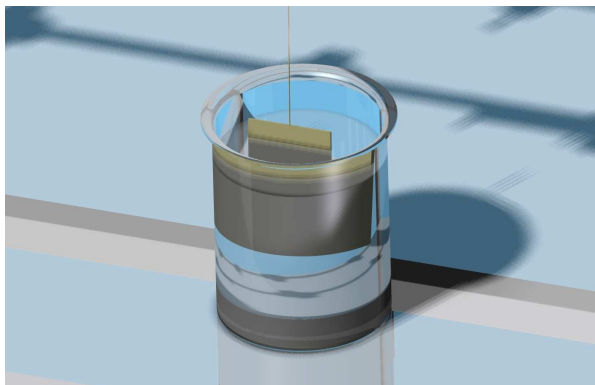
- Metoda izmjeničnim uranjanjem u 3,5%-tnu NaCl otopinu je široko primjenjiva i daje dobre rezultate u pogledu procjene otpornosti metala prema koroziji u uvjetima visokih naprezanja.
- Ispitivanje je vrlo brzo uz simulaciju uvjeta koji su slični okolišnima u eksploataciji. Rezultati ovog ispitivanja ne mogu se koristiti za procjenu ponašanja materijala u specijalnim uvjetima (kemijska industrija) te u kojima se mogu pojaviti drugačiji mehanizmi nastanka loma i pukotina.
- Iako je ova metoda do neke mjere primjenjiva na sve metale, potrebno je uzeti u obzir da se slične legure mogu vrlo različito ponašati u istim ispitnim uvjetima. U tom smislu potrebno je sakupiti sve važne informacije kako bi se moglo donekle točno predvidjeti ponašanje ispitne legure u prirodnom okolišu u odnosu na laboratorijsko ispitivanje.

#### **4.1.1.5. Nedostaci metode**

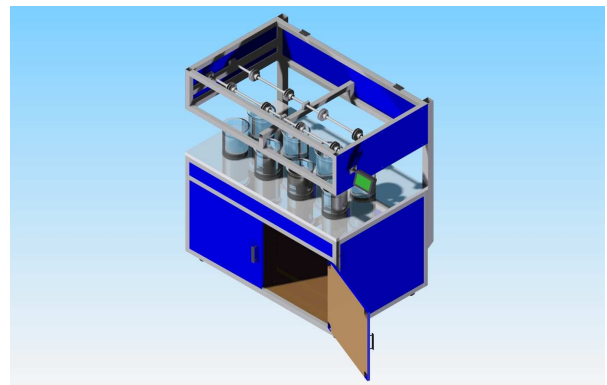
- Nedostatak ove metode je najuočljiviji pri ispitivanju nekih visokočvrstih aluminijskih legura koje su u 3,5%-tnoj NaCl otopini izrazito podložne rupičastoj koroziji. Zbog pojave rupičaste korozije, rezultati ispitivanja se ne mogu točno interpretirati. Rupice na površini mogu utjecati na pojavu i raspodjelu pukotina nastalih napetosnom korozijom te time ujedno uzrokovati prijevremeni mehanički lom uzorka. Ovaj efekt kombinirane rupičaste i napetosne korozije se gotovo uvijek pojavljuje pri ispitivanju aluminijsko-bakrenih ležajnih legura na uzorcima malog poprečnog presjeka.
- Uočeno je da umjetna morska voda uzrokuje na ovakvim legurama manju pojavu rupica od 3,5%-tne NaCl otopine.

#### 4.1.2.1. Ispitni uređaj

- Dozvoljeno je korištenje bilo kojeg uređaja koji će omogućiti nesmetano uranjanje unutar zadanog ciklusa te zatim u točnom vremenskom periodu izvlačenje uzorka na slobodnu atmosferu. Uređaj mora biti načinjen od prikladnog inertnog materijala.
- Uobičajeni načini uranjanja uzoraka su:
  - stavljanje uzoraka na pokretnu platformu te zatim periodičko potapanje platforme u spremnik ispunjen fluidom ili
  - postavljanje uzoraka na šesterostranu prizmu koja rotira oko svog centra kutnom brzinom od 6°/min tako da svaki uzorak periodički uranja u spremnik s fluidom ili
  - postavljanje uzoraka na platformu izloženu atmosferi na koju se pomoću komprimiranog zraka natiskuje fluid koji se zatim gravitacijski ocijedi.
- Brzina uranjanja/izranjanja uzoraka mora biti što veća, ali ne prevelika kako uzorak ne bi uslijed njihanja udarao u stjenke posude s fluidom. Za potrebe standardizacije dogovoreno je da brzina mora biti tolika da ne proteknu više od 2 minute od trenutka kad uzorak dotakne fluid pa do trenutka kada je potpuno uronjen.
- Dijelovi uređaja koji dolaze u dodir sa slanom otopinom moraju biti izrađeni od materijala koji neće korodirati u dodiru sa slanom otopinom odnosno ako i korodiraju da to neće biti u tolikoj mjeri da bi mogli narušiti korozivna svojstva slane otopine.
- Za izradu dijelova koji dolaze u dodir sa slanom otopinom preporuča se inertna plastika (polimer) ili staklo (slika. 20).
- Metalni dijelovi konstrukcije bi trebali biti izrađeni od čelika namijenjenih za upotrebu u morskim uvjetima te iz iste porodice legura kao i ispitni uzorci (slika 20). Ukoliko je moguće, sve metalne dijelove bi trebalo zaštititi premazom prema paragrafu norme 6.3.1. (slika 21).



**Slika 20.** Uronjeni uzorak za vrijeme ispitivanja



**Slika 21.** Izgled mogućeg ispitnog uređaja

#### 4.1.2.2. Držači uzoraka

- Držači uzoraka moraju biti tako izrađeni da ih električki međusobno izoliraju ali također da izoliraju uzorke od ostalih dijelova metalne konstrukcije.
- Ukoliko potpuna izolacija uzoraka nije moguća (kao u slučaju ispitivanja visokonapregnutih vijaka) ostatak pomoćnih dijelova konstrukcije treba biti premazan prikladnim antikorozivnim premazom i na taj način odvojen od korozivnog fluida.
- Premazi korišteni za ove potrebe ne smiju se otapati ili u korozivnu otopinu otpuštati ione ili zaštitna ulja te time kontaminirati metalnu površinu uzoraka. Posebno treba izbjeđavati premaze koji sadrže kromove spojeve.
- Oblik držača uzoraka treba biti takav da
  - u što manjoj mjeri smeta dodir gole površine uzorka sa slanom otopinom
  - ne smeta slobodno strujanje zraka oko uzorka za vrijeme sušenja
  - ne zadržava na sebi značajnu količinu slane otopine nakon izranjanja te
  - da cijedenjem otopina s jednog uzorka direktno ne dodiruje drugi uzorak.

#### 4.1.3.1. Reagensi

- Za pripravljanje slane otopine smije se koristiti natrijev klorid čistoće 98% ili veće, što je u skladu sa specifikacijama Komisije za analitičke reagentse Američkog društva kemičara (*Committee on Analytical Reagents of the American Chemical Society*).
- Slana otopina mora biti pripravljena s destiliranom ili deioniziranom vodom zadovoljavajuće čistoće prema Specifikaciji D 1193 za tip IV reagens vode, uz opasku da podatke za vrijednosti klorida i nitrata treba zanemariti.

#### 4.1.3.2. Stanje otopine

- Slanu otopinu treba pripraviti otapanjem  $3,5 \pm 0,1$  težinskih dijelova (ppw - *parts by weight*) NaCl u 96,5 težinskih dijelova vode.
- Kiselost svježe pripravljene slane otopine mora biti unutar granica 6,4 – 7,2 pH. Za prilagođavanje kiselosti smije se koristiti samo laboratorijski čista razrijeđena klorna kiselina (HCl) ili ako je potrebno jednako čista razrijeđena natrijeva lužina (NaOH).
- U praksi se pokazalo da ako se u ispitivanju koristi minimalna preporučena količina ispitne otopine, tada nije potrebno naknadno prilagođavanje kiselosti. Ispitnu otopinu je potrebno zamijeniti u određenom intervalu.

- Prilikom ispitivanja novih uzoraka potrebno je dnevno provjeravati kiselost otopine u trajanju od jednog tjedna kako bi se utvrdilo je li potrebna naknadna intervencija u pogledu kiselosti.
- Ukoliko se ista slana otopina koristi duže od jednog tjedna tada je potrebno barem jedanput tjedno provjeriti stanje kiselosti otopine i prilagoditi je zavisno o potrebi.
- Svježe pripremljenu otopinu treba ostaviti da se temperira do  $\pm 3^\circ \text{C}$  u odnosu na sobnu temperaturu prije nego se upotrijebi. Nakon toga više nije potrebno kontrolirati temperaturu otopine, ali je potrebno kontrolirati sobnu temperaturu. Pretpostavka je da će slana otopina postići i zadržati temperaturnu ravnotežu sa okolišnim zrakom.
- Volumen ispitne slane otopine treba biti dovoljno velik kako nastali korozijski produkti ne bi smanjili postojeću korozivnost. Volumen mora biti dovoljno velik kako se ne bi značajno smanjila korozivnost uslijed isparavanja aktivnih sastojaka iz slane otopine. Nužno je zadovoljiti minimalni omjer volumena ispitne otopine i izložene površine uzorka. Minimalni omjer iznosi  $32 \text{ ml/cm}^2$  odnosno  $200 \text{ ml/in}^2$  što u praksi znači da u posudu zapremine 3 l može biti uronjen uzorak maksimalne površine  $93,75 \text{ cm}^2$ .
- Dnevno je potrebno u ispitnu otopinu nadoknađivati vodu izgubljenu isparavanjem. Voda koja se dodaje u otopinu mora biti zadovoljavajuće čistoće i kvalitete kako je to opisano u paragrafu 1.8. Isparenu vodu se ne smije nadoknađivati istom količinom slane otopine! Preporuča se da ispitna posuda bude napunjena do neke oznake volumena te da se zatim dnevno dodaje potrebna količina vode do iste oznake (razine).
- Dozvoljeno je korištenje automatskih uređaja za održavanje konstantnog ispitnog volumena. Kao alternativa postoji mogućnost mjerenja gustoće otopine hidrometrom te zatim dodavanje potrebne količine vode i/ili soli kako bi se ponovno postigla potrebna koncentracija od 3,5% NaCl.
- Ispitnu otopinu je potrebno zamijeniti jednom tjedno. Pri zamjeni ispitne otopine svježom, potrebno je također isprati slatkom vodom sve dijelove ispitne naprave koji su došli u dodir sa otopinom. Ispitnu otopinu je potrebno mijenjati češće u slučaju da ispitivani materijal (čelik) izrazito korodira.

#### **4.1.3.4. Atmosfera**

- Stanje zraka (atmosfera) u laboratoriju definirano je samo vrijednostima temperature i vlažnosti. Ostatak sastava zraka (čestice, isparenja) nije potrebno kontrolirati za potrebe ovog ispitivanja. Ne preporuča se izlaganje uzoraka primjetnim aerosolima ili isparenjima iz drugih procesa u laboratoriju.

U slučaju postizanja neobičnih rezultata ispitivanja treba uzeti u obzir mogućnost kontaminacije uzoraka drugim tvarima prisutnim u atmosferi laboratorija.

- Temperatura zraka koji okružuju uzorke za vrijeme cijelog trajanja ispitivanja mora biti  $27 \pm 1^\circ\text{C}$  ( $80 \pm 2^\circ\text{F}$ ). Ukoliko se ispitivanje vrši na heksagonskoj prizmi velikog promjera, potrebno je uzeti u obzir razlike u temperaturi različitih slojeva zraka u prostoriji te podesiti iste kako bi bila zadovoljena propisana temperatura.
- Relativna vlažnost zraka za vrijeme cijelog ispitivanja mora biti  $45 \pm 10\%$ . Treba posebnu pažnju posvetiti održavanju konstantnih uvjeta temperature i vlažnosti koji se značajno mogu promijeniti noću ili vikendom kada automatska klimatizacija u laboratoriju ne radi.
- Strujanje zraka nije potpuno definirano zbog različite ispitne opreme koju laboratoriji koriste kao i zbog različitih veličina prostorija u kojima se ispitivanje vrši. Treba osigurati umjereno strujanje zraka koje će jednoliko sušiti površinu uzoraka. U tom smislu treba izbjegavati sušenje mlazom komprimiranog zraka ili s druge strane miran, ustajali zrak.

#### **4.1.4.1. Umjeravanje i standardizacija**

- Prilikom puštanja u rad nove ispitne jedinice, potrebno je napraviti probno ispitivanje kako bi se utvrdio odnos dobivenih rezultata s poznatim rezultatima dobivenim za dobro poznate legure. Primarna ispitivanja bi trebala provesti na uzorcima jednostavnog oblika kao što su valjane pločice ili šipke. Primarni uzorci bi trebali imati jednoliku zrnatu strukturu.
- Preporuča se da svaki ispitni laboratorij ima na zalih određenu količinu kontrolnih uzoraka (podložnih napetosnoj koroziji) kako bi se periodički mogla provjeriti ponovljivost ispitnog postupka i opreme. Ukoliko je moguće, za kontrolne uzorke treba odabrati materijal za koji je poznato korozijsko ponašanje u prirodnom okolišu.

#### **4.1.4.2. Ispitni postupak**

- Ciklus se sastoji od uranjanja uzoraka u slanu otopinu na 10 minuta te nakon toga izranjanja iz nje i 50 minuta sušenja na zraku. Ciklus je potrebno ponavljati 24 sata dnevno do kraja ukupnog predodređenog vremena ispitivanja ili pak do pojave loma uzorka. Dozvoljeni su prekidi za potrebe izmjene ispitne otopine ili za pregled uzoraka. Ovaj ciklus nije strogo zadan. Ciklus 10/50 se temelji na dugogodišnjoj praksi i sličnosti s prirodnim uvjetima eksploatacije.

- Sušenje uzoraka nije potpuno definirano jer ne postoji standard u pogledu opreme za ovu vrstu ispitivanja. Poželjno je polako sušenje uzoraka za vrijeme 50 minutnog perioda. Zavisno o stupnju korodiranosti, uzorci će se različitom brzinom ocijediti te nakon toga različitom brzinom osušiti. Uzorci s tankim slojem korozivnih produkata na površini će biti potpuno suhi nakon 15 minuta. Uzorci s debelim slojem korozivnih produkata i soli na površini trebati će gotovo 40 minuta da se osuše.
- Valja napomenuti da nije dozvoljeno korištenje zagrijanog zraka za isušivanje uzoraka jer povišena temperatura može imati različit utjecaj na brzinu korozije.
- Nije dozvoljeno istovremeno u istoj ispitnoj otopini uranjanje različitih metala (npr. aluminija, bakra, željeza, magnezija). Ne preporuča se istovremeno izlaganje istoj ispitnoj otopini niskolegirane i visokolegirane materijale ako se prisutni legirni elementi jako razlikuju po stupnju elektronegativnosti. Primjerice, uzorci od čistog aluminija ne smiju se istovremeno ispitivati zajedno sa uzorcima od aluminija koji sadrži više od 0,5% bakra.

#### **4.1.4.3. Ukupno trajanje ispitivanja**

- Trajanje ispitivanja se određuje prema
  - prirodnoj otpornosti ispitne legure prema koroziji
  - obliku ispitnog uzorka i
  - cilju ispitivanja.
- Prikladno vrijeme ispitivanja se najčešće određuje na temelju eksploatacijskih uvjeta. Prekid ispitivanja se provodi ako uzorci ne pokazuju očekivana oštećenja u odnosu na oštećenja nastala na podložnim materijalima u istom vremenskom periodu (detaljnije opisano u paragrafu G 16 ASTM).
- Ukoliko se ispitivanjem želi utvrditi kvaliteta različitih serija proizvoda, vrijeme ispitivanja će biti određeno iz relevantne dokumentacije ili standarda.

#### **4.1.4.4. Priprema ispitivanja**

Po završetku ispitivanja, uzorke treba što prije isprati vodom i očistiti. ispiranje i čišćenje treba što prije obaviti jer će u protivnom uzorci nastaviti korodirati zbog nastalog sloja korozivnih produkata koji je higroskopan i soli nataloženih na površini.

Izuzetno je važno dobro očistiti uzorke jednom od preporučenih metoda kako je to opisano u prilogu praksa G 1 (*Practice*) ASTM norme.

#### **4.1.5. Interpretacija rezultata**

Interpretacija rezultata je zavisna o tipu uzorka i vrsti materijala koji se ispituju. Postoje zajedničke karakteristike svih ispitivanja podložnosti napetosnoj koroziji, a to su:

- Uzorci koji nakon ispitivanja ne pokazuju pukotine trebaju biti pregledani pod lupom povećanja 10× do 30× kako bi se eventualno otkrili začeci pukotina.
- U nekim slučajevima se zahtjeva visoka pouzdanost pa je potrebno obaviti metalografski pregled kako bi se sa sigurnošću utvrdilo da nema pukotina.
- Reprezentativni uzorci s nastalim pukotinama trebaju biti metalografski pregledani kako bi se sa sigurnošću moglo ustvrditi da su nastale pukotine posljedica napetosne korozije. (Napetosna korozija aluminijskih legura je redovito intergranularna)
- Sve neobične pukotine i lomove treba pažljivo pregledati kako bi se zaključilo o korisnosti tih podataka i treba li ih uključiti u analizu ili potpuno odbaciti.

#### **4.1.6. Zaključak o provedenom ispitivanju**

Zaključak ispitivanja treba sadržavati slijedeće elemente:

- Točnu oznaku i naziv legure ili opis sastava ako legura nije standardna
- Naziv proizvođača legure, toplinska obradba i debljina poprečnog presjeka ispitivanog materijala uključujući ostale dostupne proizvodne informacije
- Način izdvajanja (izrade) uzorka odnosno njegova veličina i položaj na tvornički isporučenom materijalu iz kojeg je izrezan
- Detalje o uzorku kao što su vrsta, veličina i orijentacija kristalnih zrna te ukupni broj uzoraka
- Stupanj narinutog opterećenja na uzorak i način opterećivanja
- Ukupno vrijeme trajanja ispitivanja
- Opis svih odstupanja od standardnog ispitivanja opisanog u prethodnim paragrafima
- druge podatke korisne za upotpunjavanje izvještaja:
  - stanje površine uzoraka uključujući svaku površinsku obradbu ili premaz
  - omjer ispitnog volumena u odnosu na ukupnu površinu uzorka
  - opis ispitnog uređaja na kojem se vršilo ispitivanje
  - opis primijenjenih metoda čišćenja uzoraka prije i nakon ispitivanja te
  - detaljnu tablicu s podacima za svaki ispitni uzorak te pripadni rezultat metalografskog ispitivanja.

## **5. NAPRAVA ZA ISPITIVANJE CIKLIČKIM URANJANJEM**

### **5.1. PRIPREMA IDEJNOG RJEŠENJA, OSNOVNI ZAHTJEVI**

Kao što je navedeno u normi ASTM G44, ne postoji standardizirani laboratorijski uređaj za ispitivanje korozije cikličkim uranjanjem. Svaki ispitni laboratorij može izraditi svoju inačicu ispitne naprave ukoliko ona zadovoljava zahtjeve opisane normom.

Norme ASTM G44 i ASTM G60 su uzete kao osnova od koje se krenulo pri razradi idejnog rješenja i projekta naprave za ispitivanje korozije cikličkim uranjanjem koji će se koristiti na Katedri za površinsku zaštitu Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu.

Osnovni zahtjev na napravu je obavljanje ciklusa točnog trajanja uranjanja odnosno izranjanja uzoraka, s definiranom ukupnom duljinom trajanja ispitivanja te zadanim hodom uzoraka.

Naprava treba biti dovoljno velika da se istovremeno mogu vršiti ispitivanja u osam standardiziranih laboratorijskih ispitnih posuda zapremine barem 3 l. Sva ispitna mjesta trebaju biti pregledna te trebaju biti lako dostupna.

### **5.2. RAZRADA IDEJNOG RJEŠENJA**

#### **5.2.1. Vertikalno gibanje uzoraka**

Problem idejnog rješenja je bio kako izvesti ograničeno vertikalno gibanje uzoraka u laboratorijskim uvjetima uz minimalni angažman opreme i sredstava.

Moguća rješenja :

- servopneumatski pogon sa dugim cilindrima
- mehanički pogon sa zubnim letvama i elektromotorom
- mehanički pogon sa užnicama, lančanicima, vratilima i elektromotorom

Servopneumatski pogon je odbačen iako je jednostavan za projektiranje i izvedbu jer je prebučan za kontinuirani rad u laboratoriju. Pneumatika mora imati izvor stlačenog zraka (kompresor) koji je redovito vrlo bučan u radu. Postoje tihe varijante kompresora no cijena im je vrlo visoka i zahtijevaju specijalno održavanje i servis. Izmještanje kompresora iz laboratorija nije bilo moguće. Buka kompresora bi ometala nastavu koja se odvija u učionici neposredno uz laboratorij.



Mehanički pogon sa zubnim letvama je odbačen zbog složenosti izrade zubnih letvi. Iako bi zubne letve bile vrlo jednostavno mehaničko rješenje, nije bila moguća izrada u zadanom roku uz minimalnu cijenu. Norma G44 propisuje da svi dijelovi koji dolaze u dodir sa korozivnim fluidom moraju biti izrađeni od inertnog materijala ili barem materijala koji svojim korodiranjem neće utjecati na rezultate ispitivanja. Nehrdajući čelik je jedini dostupni materijal koji zadovoljava ovaj uvjet, a može osigurati pouzdani rad dugi niz godina. Budući da gotove zubne letve od nehrđajućeg čelika nisu dostupne kao gotovi strojni elementi, bilo bi ih potrebno izraditi po narudžbi. Zubne letve se izrađuju blanjanjem na kratkohodnim blanjava ili glodanjem profilnim glodalima. Oba načina izrade zahtijevaju izradu specijalnog profilnog alata te time uvjetuju visoku cijenu i dugo vrijeme izrade.

Mehanički pogon sa užnicama je najjednostavniji pogon s minimalnim brojem pokretnih dijelova. Svi potrebni pokretni dijelovi mogu se izraditi na tokarskom stroju i standardnoj univerzalnoj glodalici. Mehanički pogon s užnicama je ujedno i najtiši od svih navedenih pogona jer je jedino prisutno gibanje rotacija uležištenih vratila i sporohodnih lančanika. Dobro uležišteno sporohodno vratilo i lančanici malog promjera gotovo da ne proizvode čujnu buku u radu. Elektromotor potreban za pokretanja uopće nije razmatran kao izvor buke jer je njegova kvaliteta i razina buke tvornički određena i ne može se na nju bitno utjecati. Zbog svih navedenih prednosti ova vrsta pogona je prihvaćena za daljnju razradu.

### **5.2.2. Kućište, ležaji i nosači ležaja**

Idejni prijedlozi za izradu kućišta:

- cijevna konstrukcija od aluminija
- cijevna konstrukcija od čelika.

Aluminijske cijevi su odbačene iz daljnje razrade zbog visoke cijene i složenost zavarivanja.

Kućište od čeličnih kvadratnih cijevi je jedino pouzdano i jeftino rješenje koje se moglo izraditi u zadanom roku. Tzv. "crne cijevi" su uvijek raspoložive kod prodavača čelične robe te se lako obrađuju, zavaruju i zaštićuju premazima (slika 22.).

Prilikom odabira ležaja trebalo je uzeti u obzir netočnosti izvedene zavarene konstrukcije (kućišta). Sva kućišta s ležajnim mjestima moraju biti strojno obrađena kako bi osi ležaja bile koncentrične. U ovom slučaju to zbog kratkog roka izrade nije bilo moguće jer je trebalo cijeli gornji postroj uređaja strojno obraditi na glodalici ili blanji koja može prihvatiti izradak minimalne duljine 1350 mm. Zbog ovog razloga nije bilo moguće korištenje kugličnih ležajeva već blazinica sa PTFE kliznim slojem. Nosači blazinica su morali biti dovoljno jednostavni i široko tolerirani kako ne bi morali biti brušeni – što bi opet produžilo i poskupilo izradu. (slike 23.i 24.)



**Slika 22.** Čelično kućište uređaja

### **5.2.3. Upravljanje i automatizacija**

Upravljanje uređajem je bilo moguće izvesti mehanički, električki ili digitalno. Mehaničko upravljanje je isključeno iz razmatranja jer je presloženo i sadrži mnogo elemenata. Digitalno upravljanje (*PLC kontroler, Touch Screen Display*) je također isključeno iz razmatranja jer mu je cijena previsoka. Digitalno upravljanje je moderno rješenje koje zauzima vrlo malen prostor te bi zasigurno u primjeni dalo dobre rezultate. Uređaj podržava vezane funkcije što daje široku programsku fleksibilnost koja bi omogućila jednostavno podešavanje parametara ispitivanja, a uz sve navedeno uređaj je jednostavan za rukovanje.

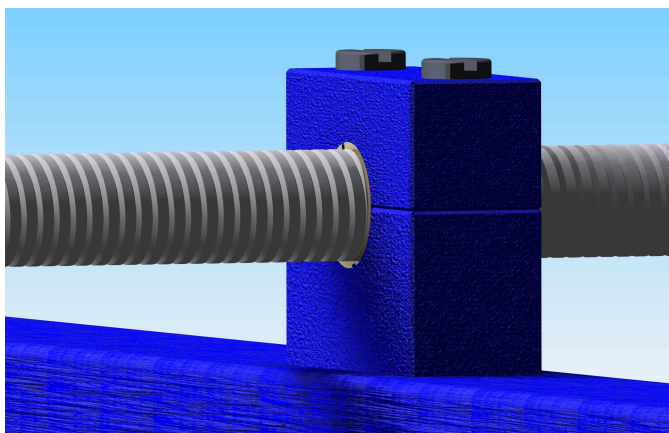
Jedina preostala varijanta je električno upravljanje serijom vremenskih sklopki i preklopnika. Električno upravljanje je relativno jeftino i lako primjenjivo kod automatskih uređaja s malim brojem operacija. Ova vrsta upravljanja je osjetljiva u pogledu kvalitete ugrađenih dijelova jer kvar jedne komponente sustava najčešće zaustavlja cijeli sustav. Izrada pomoćnog sigurnosnog sustava bila bi preskupa i znatno bi povećala *gabarite* naprave.

#### 5.2.4. PRENOSIVOST, FLEKSIBILNOST, TRAJNOST

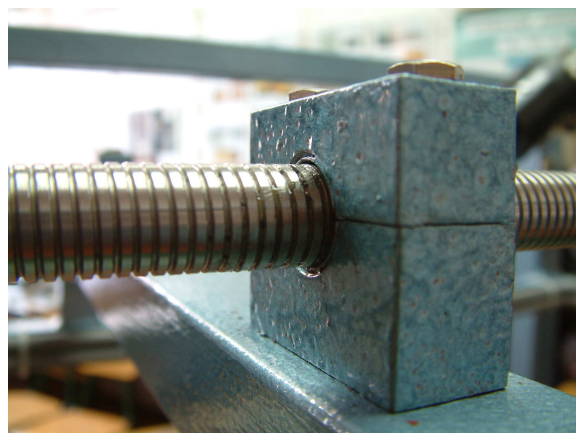
Budući da naprava nije fiksirana na podlogu, trebalo je omogućiti njeno pomicanje unutar laboratorija. Za potrebe pomicanja najjednostavnije rješenje je ugradnja okretnih kotača na donjem dijelu kućišta (slika 25.).

Iako norma ASTM G44 predviđa ispitivanje na standardnim metalnim kuponima, trebalo je predvidjeti mogućnost ispitivanja nestandardnih uzoraka. Nestandardni uzorci zahtijevaju veću visinu izranjanja te veće posude u koje bi bili uronjeni. Zbog tog razloga je u idejnom rješenju predviđeno podešavanje krajnjih granica vertikalnog pomaka te je time ujedno povećana fleksibilnost uređaja.

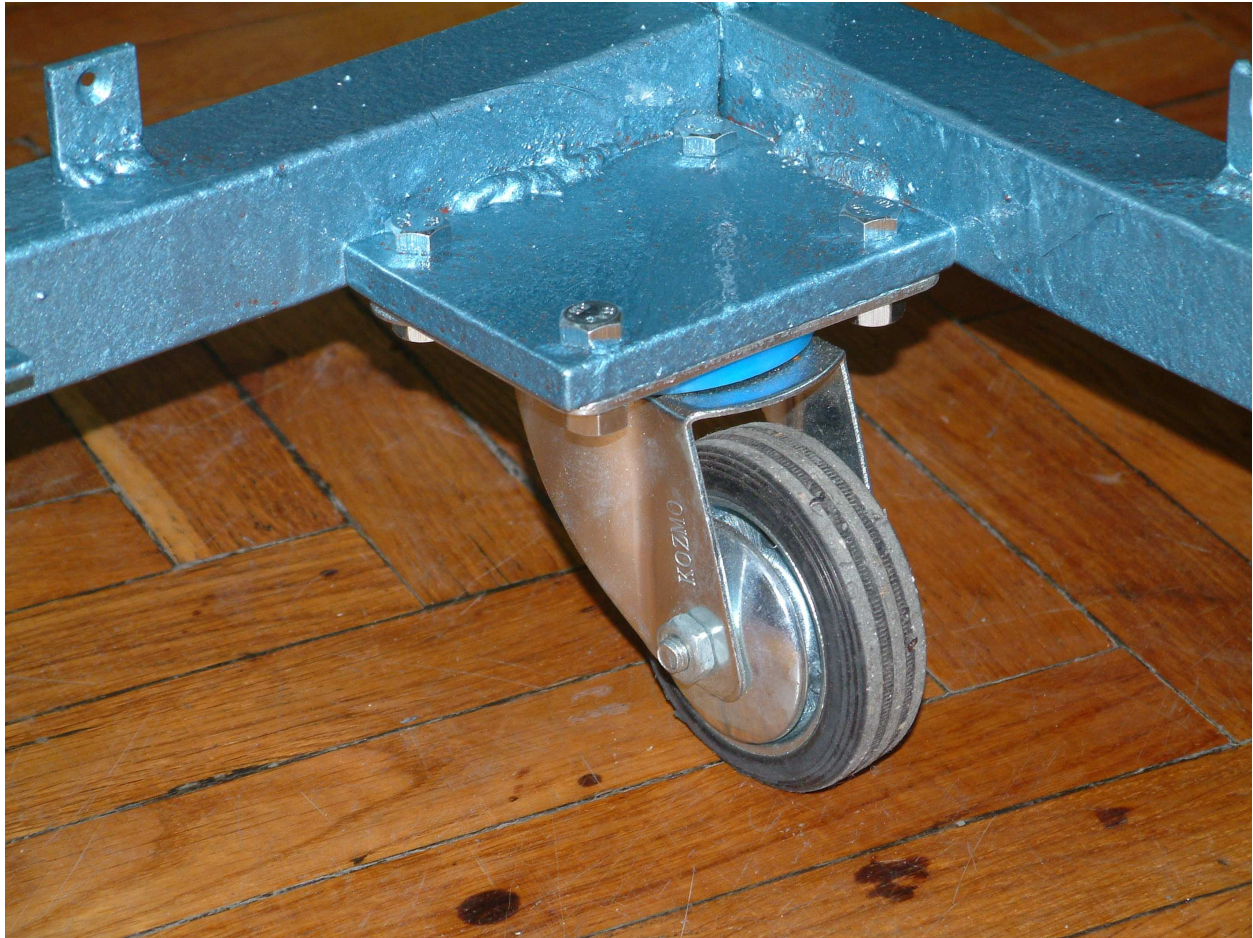
U idejnoj razradi, trajnost uređaja je procijenjena na barem 10 godina kontinuiranog rada. Unutar tog roka ne smije nastupiti katastrofalno korodiranje kućišta ili radnih vretena i užnica. Unutar projektiranog roka je dozvoljena zamjena elektromotora, blazinica, lanaca i klinastih remena zbog istrošenosti. Pokretni dijelovi naprave su osigurani od loma svornim vijcima M5, aluminijskim zaticima u lancu i remenicama malog obuhvatnog kuta. U slučaju zaglavlivanja vratila prvo će doći do loma svornih vijaka koji su opterećeni na čisti smik, zatim do loma aluminijskih zatika u lancu, a naposljetku će proklizati remen na manjoj remenici elektromotora. U sva tri slučaja oštetiti će se dijelovi koji su lako zamjenjivi dok će skuplji i složeniji dijelovi mehanizma ostati neoštećeni.



**Slika 23.** Trodimenzionalni model nosača blazinice



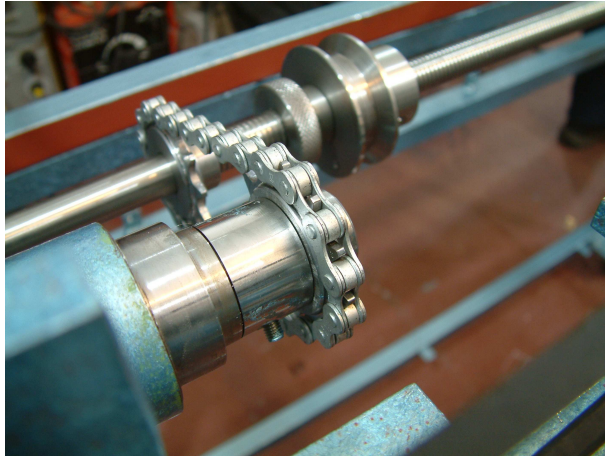
**Slika 24.** Izrađeni i montirani nosač blazinice



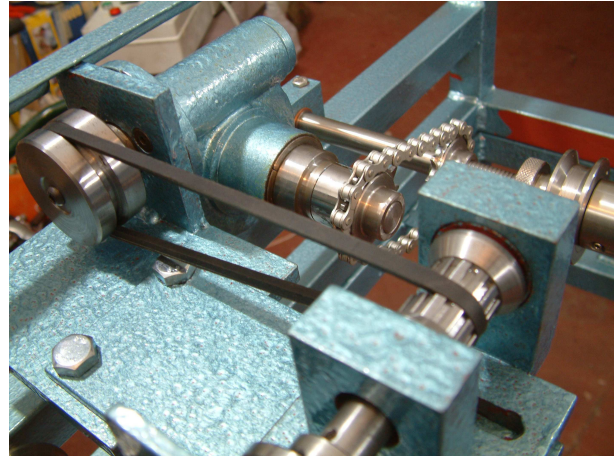
**Slika 25.** Okretni kotač postolja

### **5.2.5. Jednostavnost konstrukcije**

Iz prakse je poznato da najjednostavnije konstrukcije sa najmanjim brojem pokretnih dijelova imaju najveću trajnost i pouzdanost. Kućište je zamišljeno kao jednostavni okvirni nosač a glavni pokretni dijelovi su dva paralelna vratila sinkrono povezana lancem. Pužni reduktor je preuzet sa rashodovanog uređaja na kojem se dokazao kao trajan i pouzdan (slika 26.). Remenski prijenos je najjednostavnijeg tipa sa jednim parom remenica i vratilom uležištenim na kugličnim ležajevima (slika 27.). Ostali dijelovi su standardni, a većinom čine vijke, matice, podložne pločice i uskočnike.



**Slika 26.** Lančani prijenos



**Slika 27.** Remenski prijenos

### 5.2.6. Sigurnost

Naprava osim što mora zadovoljiti svoju funkciju mora u radu biti sigurna za ljude. Sigurnost se odnosi na opasnost od udara električne struje i opasnost od mehaničkih ozljeda uzrokovanih pokretnim dijelovima ili prevrtanjem stroja.

Opasnost od udara električne struje je uklonjena smještanjem svih visokonaponskih strujnih instalacija u izoliranu kontrolnu kutiju izrađenu od ABS (akrilonitril butadien stiren) sa minimalnim probojnim naponom od 500 V.

Električni vodovi u samoj napravi kao i elektromotor su niskog istosmjernog napona (12 V) te ne postoji realna opasnost od strujnog udara. Iako je elektromotor male snage (25 W), zbog velike trostepene redukcije u prijenosu ( $i = 3500$ ) radna vratila razvijaju okretni moment od cca. 2,2 Nm. Pri ovom iznosu okretnog momenta može doći do ozbiljnih ozljeda u slučaju zahvaćanja ekstremiteta ili odjeće pokretnim dijelovima stroja, posebice lanca i lančanika. Sve remenice i lančanici moraju biti zaštićeni poklopcima ili žičanim kavezima.

Opasnost od prevrtanja stroja je smanjena minimalno simetričnom konstrukcijom. Težište naprave je usmjereno prema zadnjoj strani te ne postoji opasnost od prevrtanja u normalnom radu. U slučaju prevrtanja nije vjerojatno da bi moglo doći do ozbiljnih ozljeda jer je ukupna težina naprave manja od 70 kg, a visina prevrtanja manja od 170 cm.

### **5.3. RAZRADA PROJEKTA**

Projekt je izrađen upotrebom software-a SOLID EDGE V20 koji pripada u porodicu 3D (CAD) računalnih programa. Program je vrlo jednostavan za uporabu te daje mogućnost dinamičke prilagodbe svih dijelova konstrukcije u bilo kojoj fazi konstruiranja. Primjerice, promjenom dimenzije jednog dijela, program automatski prilagodi ostale dijelove koji su vezani na njega i dodijeli im pripadni naziv ili oznaku. Na taj način je olakšano praćenje promjena te prilagođavanje novih dijelova.

#### **5.3.1. Faze oblikovanja**

##### **5.3.1.1. Oblikovanje kućišta** (slika 32. i 33.)

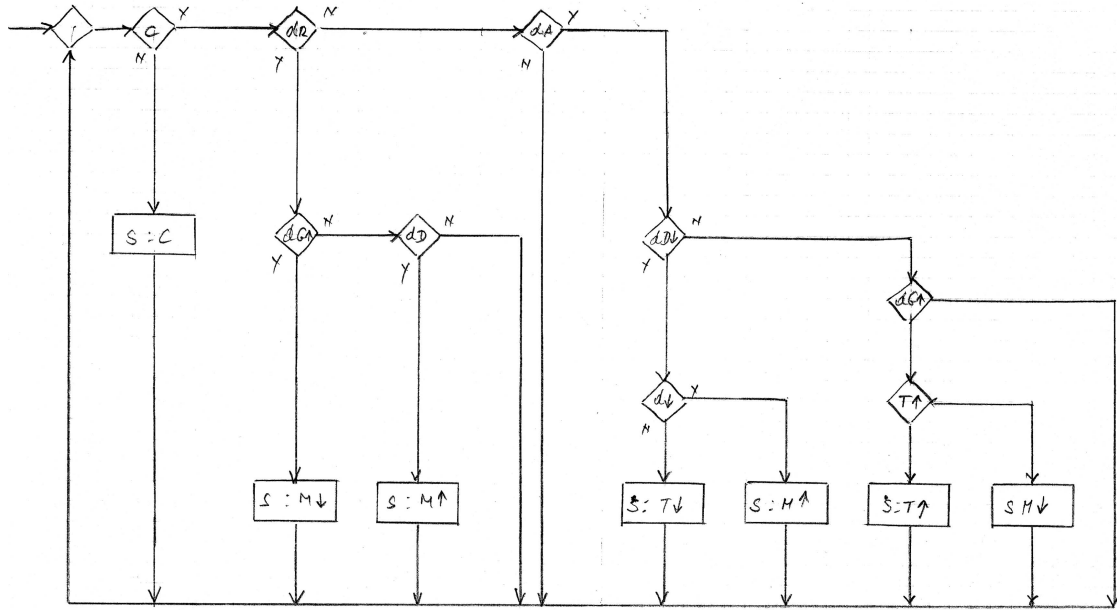
- modeliranje kvadratnih cijevi dimenzija 35×35×1,5 mm
- modeliranje montaže kvadratnih cijevi u rešetkastu konstrukciju
- modeliranje okretnih kotača
- modeliranje montaže okretnih kotača
- modeliranje vratnica i poklopaca
- modeliranje montaže vratnica i poklopaca
- modeliranje montaže vijaka, matica i podložnih pločica

##### **5.3.1.2. Oblikovanje pogona i prigona** (slika 34.)

- modeliranje elektromotora i remenskog reduktora
- modeliranje vratila, užnica, remenica i pužnog reduktora
- modeliranje uskočnika, blazinica i nosača blazinica
- modeliranje lančanika, lanca i remena
- modeliranje uskočnika, nosača elektromotora i remenskog vratila
- modeliranje montaže svih navedenih dijelova

##### **5.3.1.3. Konstruiranje električnog upravljanja**

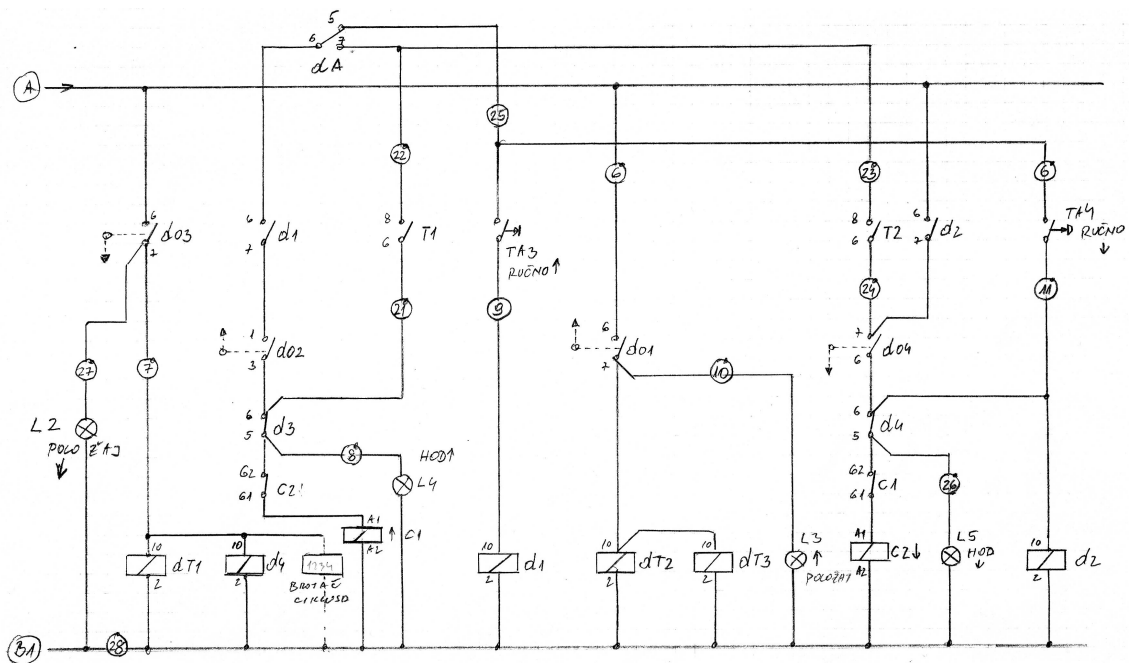
- izrada dijagrama toka upravljanja (slika 28.)
- izrada skice sklopa (slike 29.,30.,31.)
- izrada skice smještaja električnih komponenti, utvrđivanje gabarita i potrebne instalirane snage



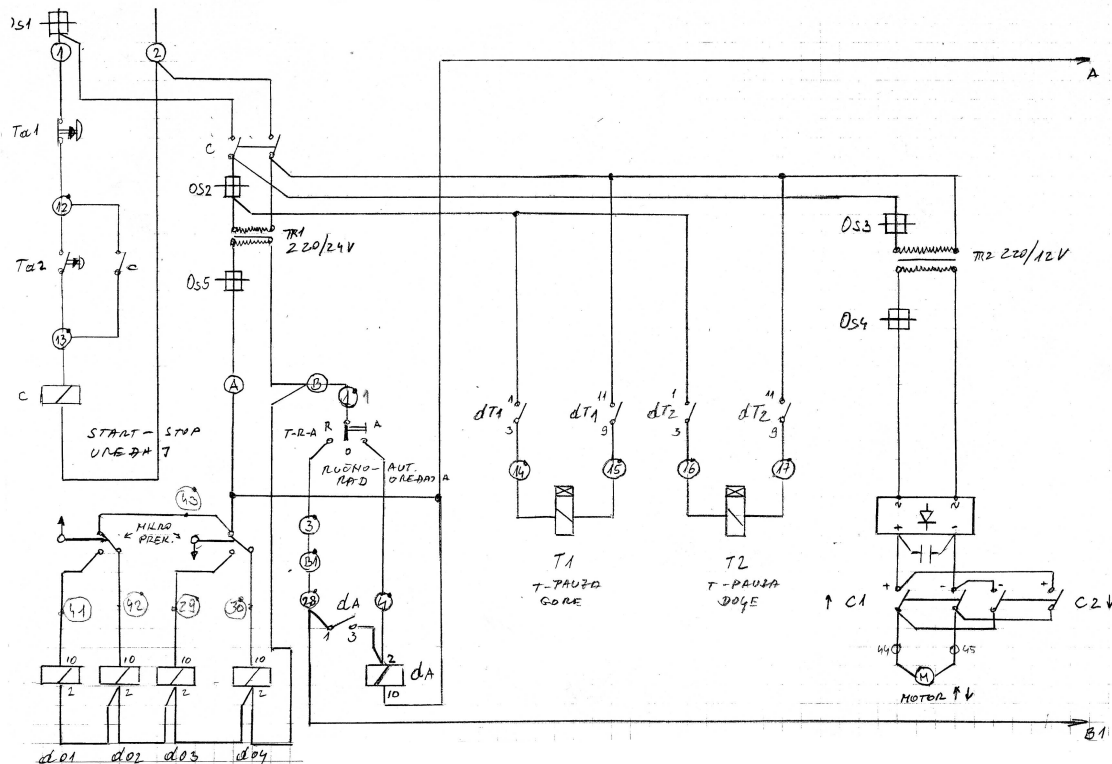
C = GLAVNA SKLOPNA  
 CR = RUČNI RAD  
 CA = AUTOMATSKI RAD  
 d↓ = MIKRO PREMOŠIČ (UZVRAĆEN DOLJE)  
 d↑ = MIKRO PREMOŠIČ (UZVRAĆEN GORE)  
 M↑ = S/S EL. MOTORNA  
 M↓ = S/S EL. MOTORNA

↓ S/S T - STANJE/STAN PAUZA ↓ Y = DA - 1  
 ↑ S/S T - " - PAUZA ↑ N = NE - 0

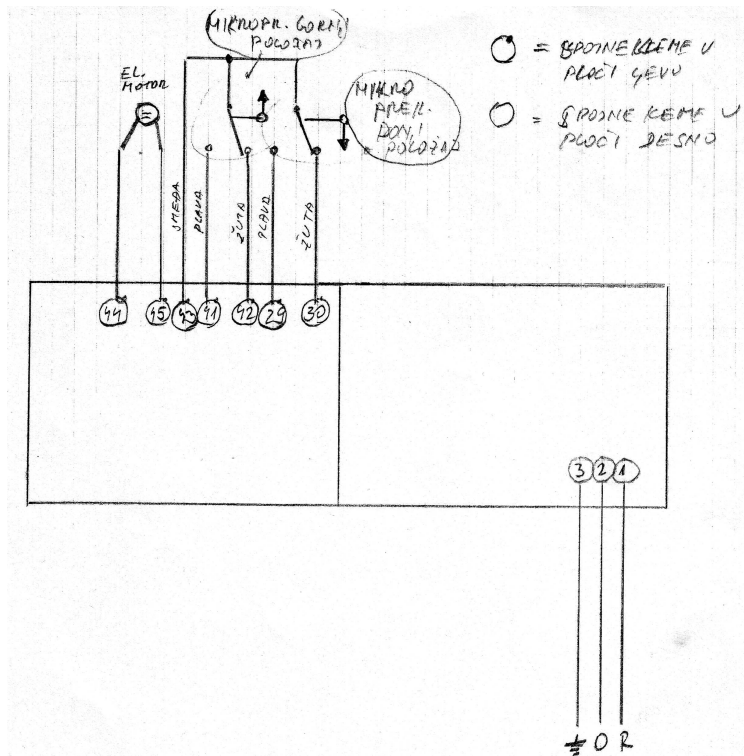
Slika 28. Logička shema upravljanja



Slika 29. Shema automatskog upravljanja



**Slika 30.** Shema električnog napajanja

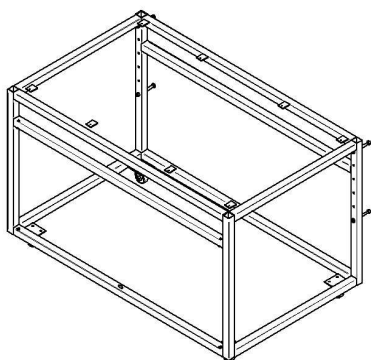


**Slika 31.** Shema spajanja mikroprekidača

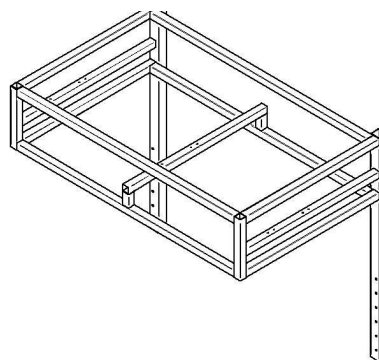


Prilikom oblikovanja poštivani su sljedeći zahtjevi:

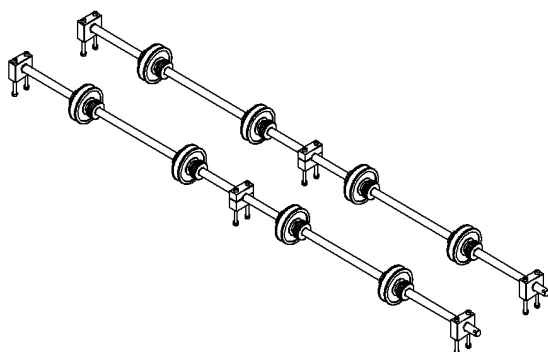
- ergonomičnost - pristupačnost kontrolnim uređajima, dobra vidljivost radne površine, dobro osvjetljenje
- prenosivost - mogućnost dopreme i instaliranja na radno mjesto,
- trajnost - korozivna zaštita, trošenje tarnih dijelova, uobičajeno habanje,
- sigurnost - zaštita od strujnog udara, zaštita od prevrtanja,
- pouzdanost - konstantnost ciklusa, električna izolacija i popravak kvarova, automatsko resetiranje,
- ekonomičnost - minimalni troškovi izrade i održavanja, jednostavnost konstrukcije
- estetičnost - dopadljivost boja i oblika konstrukcije,
- proizvodnost - jednostavnost izrade uz minimalno angažiran proizvodni park,
- konkurentnost - izrada duplikata, standardni dijelovi, brzina izrade,
- primjenjivost - ASTM G60, ASTM G44-94, 'user friendly' sučelje, ponovljivost



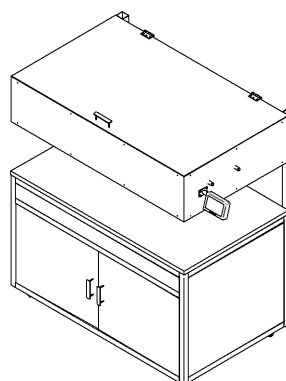
**Slika 32.** Montažni nacrt donjeg dijela kućišta



**Slika 33.** Montažni nacrt gornjeg dijela kućišta

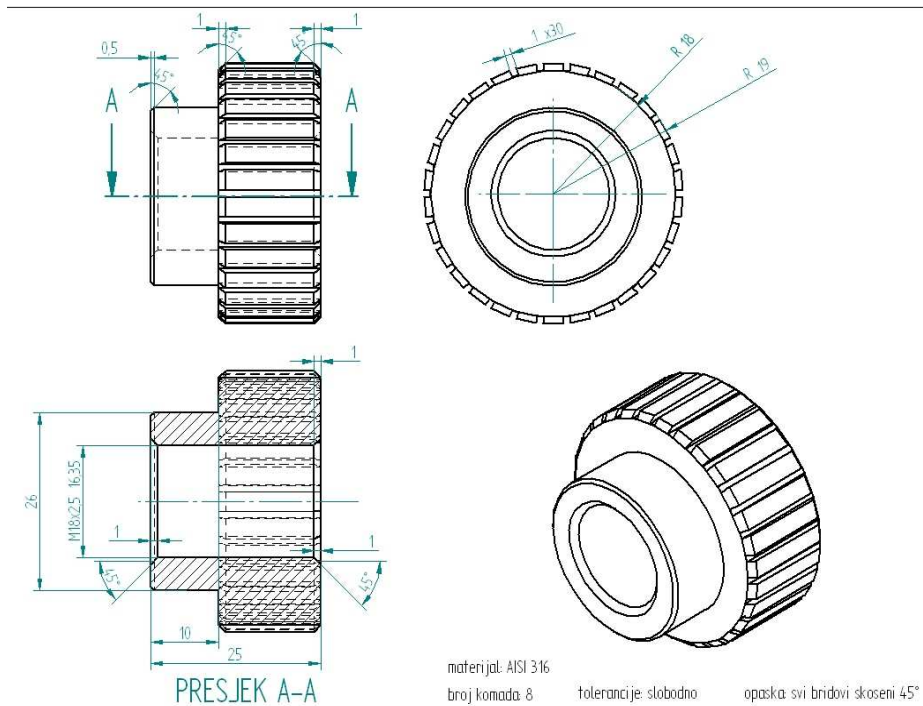


**Slika 34.** Montažni nacrt vratila i užnica

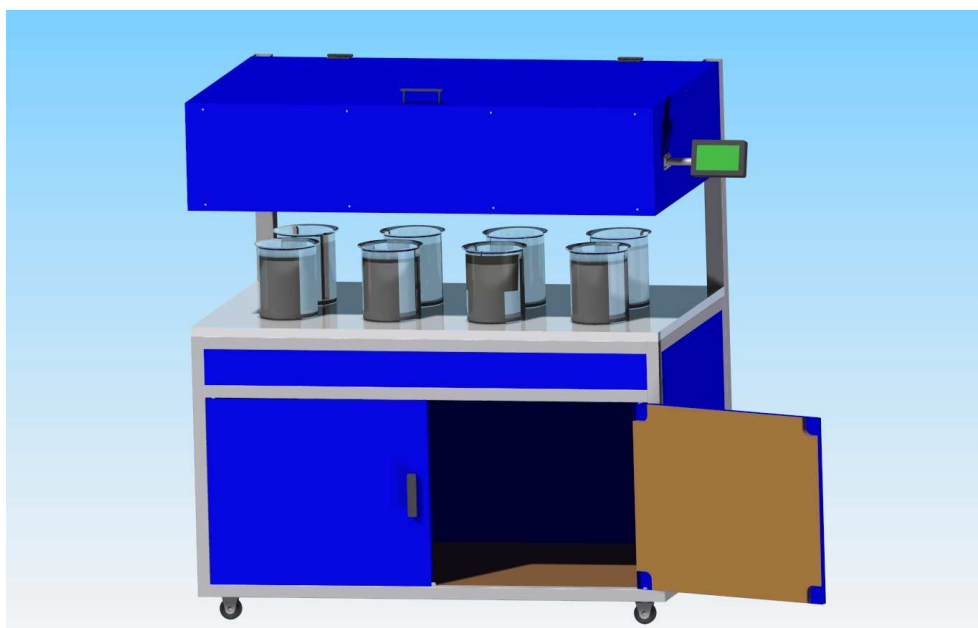


**Slika 35.** Montažni nacrt naprave

Po završetku konstruiranja izrađene su radioničke skice za svaki strojni dio i specifikacija potrebnog materijala. Izrađeni su i tzv. "renderi" odnosno prostorne skice gotovog izgleda naprave (slika 37.). Radioničke skice ne sadrže sastavnicu jer su svi potrebni podaci ispisani u donjem desnom dijelu skice. Primjer jedne radioničke skice dat je na slici 36.



**Slika 36.** Primjer radioničke skice (rovašena matica M18x2,5)



**Slika 37.** Idejni izgled gotove naprave

Materijal za izradu dijelova je nabavljen u Laboratoriju za površinsku zaštitu FSB te djelom u tvrtkama Pecon d.o.o., Strojopromet d.o.o., Vijci Kranjec d.o.o., Furnir d.o.o., Spiel d.o.o., Kolomejec d.o.o., Chipoteka d.o.o., Željeznar d.o.o. i Zavkon d.o.o. (tablica 12.)

**Tablica 12.** Materijal upotrebljen za izradu mehaničkih dijelova naprave

Oznaka materijala	Č 0362	Č 4732.4	AISI 316	SL 100	Č 1530	Iveral
Strojni dio	Kućište, nosač motora	Lančanici i remenice	Vratila i užnice	Pužni reduktor	Nosači blazinica	Poklopci

Ostali dijelovi naprave kupljeni su kao gotovi normirani proizvodi: vijci, matice, podložne pločice M 6, uskočnici od nehrđajućeg čelika  $\Phi 16 \times 14 \times 1,5$ , blazinice s PTFE slojem  $\Phi 16 \times 18 \times 20$  mm, tvrdo kromirani lanac  $1/2" \times 1/8"$ , kuglični ležaji  $\Phi 35 \times 17 \times 10$ , vijci i matice M10 $\times$ 25, imbus vijci s poluokruglom glavom M 6, klinasti remeni 5 $\times$ 5 $\times$ 450, releji 24 V, sklopke 24 V, vremenske sklopke 220 V, tipkala 220 V, signalne žaruljice 24 V, elektromotor s pužnim reduktorom 12 V, ožičenje 1,5mm<sup>2</sup>  $\times$  3, ABS kontrolne kutije, transformator 220/24 V, transformator 220/12 V, ispravljač (gretz) 12 V, kondenzator 440  $\mu$ F, utikač 220 V, osigurači 24V 4A, osigurač 12 V 2,5 A, aluminijski hladnjak ispravljača....

Izrada čeličnog kućišta, strojna obrada, bojanje i montaža naprave obavljani su u radioni tvrtke Zavkon d.o.o. Električno upravljanje je izradio gospodin Križančić Ivica u radionici Laboratorija za površinsku zaštitu. Finalna montaža je obavljena u radionici tvrtke Zavkon d.o.o. i u Laboratoriju za površinsku zaštitu.

#### **5.3.1.4. Faze izrade kućišta:**

- mjerenje, rezanje kvadratnih cijevi tračnom pilom
- bušenje provrta na stupnoj bušilici (slika 38.)
- provizorno montiranje (tzv. "punktiranje"), mjerenje i učvršćivanje odrezanih profila
- zavarivanje MAG postupkom i brušenje kutnom brusilicom (slike 39.i 40.)

#### **5.3.1.5. Faze strojne obrade:**

- tokarenje i bušenje vratila
- tokarenje i bušenje užnica
- tokarenje lančanika
- tokarenje i urezivanje matica
- tokarenje, bušenje i urezivanje remenica
- istokarivanje ploče nosača motora
- glodanje, bušenje i brušenje ploče nosača motora
- glodanje, bušenje i razvrtanje nosača blazinica (slika 41.)
- glodanje, bušenje, urezivanje i brušenje lančanika
- tokarenje, bušenje, brušenje i urezivanje kolutne spojke

#### **5.3.1.6. Faze izrade električnog upravljanja:**

- montaža ABS razvodnih kutija na čelični nosivi profil
- bušenje rupa za tipkala i sklopke na ABS kutijama
- umetanje releja, sklopki, ležišta osigurača, hladnjaka, transformatora i svih ostalih električnih komponenti
- ožičavanje
- montaža glavnog napojnog kabla
- ispitivanje sklopa

#### **5.3.1.7. Faze površinske zaštite:**

- uklanjanje okujine i površinske hrđe brusnim papirom
- odmašćivanje kućišta nitro razređivačem
- bojanje nitro brzosušivom temeljnom bojom
- sušenje (22°C/2h)
- bojanje alkidnim završnim premazom Hammerite "Hämmerschlag"
- sušenje u zagrijanom prostoru (28°C/24h)

#### **5.3.1.8. Faza finalizacije:**

- montaža donjeg dijela kućišta i okretnih kotača
- montaža donjeg i gornjeg dijela kućišta
- montaža vratila i užnica (slika 42.)
- montaža elektromotora, remenskog prijenosa i pužnog reduktora
- montaža električnog upravljanja, mikroprekidača i ožičenja (slika 43.)
- postavljanje gornjeg dijela kućišta na radnu visinu

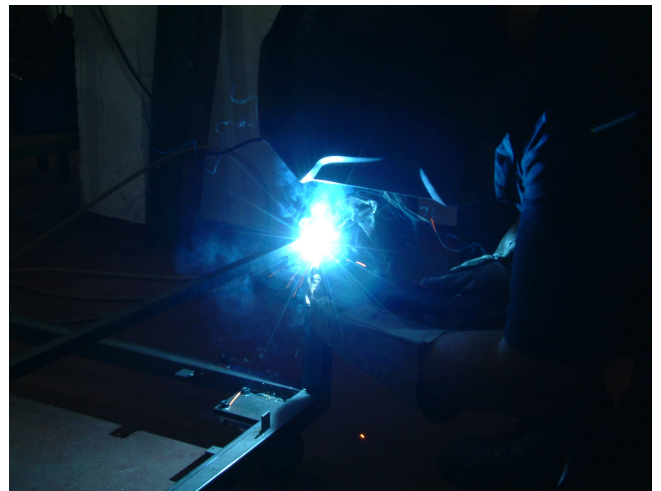
### 5.3.1.9. Transport:

Naprava je sklopljena prevezena furgonom KIA 2500TDI u prostorije Laboratorija za zaštitu materijala Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, ručno istovarena i montirana na radno mjesto.

Korištena oprema i alat: tokarski stroj TNP 200, univerzalna glodalica GU1, tračna pila ALFA 180, aparat za zavarivanje VARSTROJ 1600 MIG, stupna bušilica HUVEMA, razni ručni alat, pomoćne naprave pri zavarivanju. Ukupni utrošak resursa naveden je u tablici 13.



**Slika 38.** Bušenje profila za izradu kućišta



**Slika 39.** Zavarivanje kućišta MAG postupkom



**Slika 40.** Brušenje zavara kutnom brusilicom



**Slika 41.** Glodanje nosača blazinica



**Slika 42.** Montaža mehaničkih dijelova naprave



**Slika 43.** Montaža električnog upravljanja



**Slika 44.** Upuštanje naprave u probni rad



**Slika 45.** Nezaštićeni uzorci probnog ispitivanja prije uranjanja



**Slika 46.** Zaštićeni uzorci probnog ispitivanja prije uranjanja

Nakon postavljanja na trajno mjesto i montaže posljednjih dijelova uređaj je detaljno pripremljen i upušten u rad. Upuštanje u rad podrazumijeva prvi probni rad pod punim opterećenjem uz pažljivo praćenje rada stroja (slika 44.).

**Tablica 13.** Utrošeni materijal i radni sati

	UTROŠENO	KOLIČIN A	jedinica mjere	JEDINIČNA CIJENA (Kn/jedinici mjere)	UKUPNA CIJENA (Kn)
1.	Inbus vijci M8x30	16	kom.	2,50	40,00
2.	Matice M8	16	kom.	1,50	24,00
3.	Podložne pločice M8	16	kom.	0,30	4,80
4.	Kotači R75	2	kom.	100,00	200,00
5.	Okretni kotači R75	2	kom.	120,00	240,00
6.	Kvadratna cijev 35x35x2, (26,8 m)*	55,2	kg	8,50	469,20
7.	Kvadratna cijev (2 m) 50x50x2,5 **	6,6	kg	8,50	56,00
8.	Kutni profil 20x20x3, (1,53 m) ***	0,72	kg	8,50	6,20
9.	Kratki limovi poklopaca (40 kom.) 20x25x2	0,32	kg	8,50	2,70
10.	Vijci M10x100	4	kom.	2,98	11,92
11.	Matice M10	4	kom.	0,50	2,00
12.	Podložne pločice M10	4	kom.	0,30	1,20
13.	Vretena (2 kom.) Φ18/ Φ16x 1318(1325)	6	kg	67,00	400,00
14.	Užnice (8 kom.) Φ60x20	3,52	kg	67,00	235,00
15.	Matice M18 (8 kom.) Φ40x 25, (0,2 m)	2	kg	67,00	134,00
16.	Rovašene matice M18 (8 kom.), Φ40x25, (0,2m)	2	kg	67,00	134,00
17.	Ploče nosača kotača (4 kom.) 80x100x10	2,5	kg	8,50	21,00
18.	PTFE blazinice Φ16x20	10	kom.	4,00	40,00

19.	Bakreni klizni prsten $\Phi 16 \times 22$	20	kom.	3,00	60,00
20.	Lančanici 1/2" ,12 zuba (4 kom.)	0,33	kg	67,00	22,00
21.	Lanac 1/2"x1/8"	2	kom.	49,00	98,00
22.	Vijak M4x30	10	kom.	0,60	6,00
23.	Matica M4	10	kom.	1,60	16,00
24.	Podložna pločica M4	20	kom.	0,10	2,00
25.	Vijak M10x30	10	kom.	1,20	12,00
26.	Svorni vijak M5x10	20	kom.	0,63	12,60
27.	Vijak M10x20	16	kom.	0,95	15,20
28.	Matica M10	16	kom.	0,50	8,00
29.	Uskočnici $\Phi 16$	20	kom.	3,29	65,80
30.	Vijak M6x90	12	kom.	3,83	45,96
31.	Matica M6	12	kom.	0,41	4,92
32.	Podložna pločica M6	24	kom.	0,17	4,08
33.	Remen 5x5x450	2	kom.	40,00	80,00
34.	Remenica $\Phi 70$ , 1 kom.	0,40	kg	8,50	3,50
35.	Kuglični ležaji $\Phi 32 \times 15 \times 9$	2	kom.	35,00	70,00
36.	Remenica $\Phi 20$ , 1 kom.	0,1	kg	8,50	0,85
37.	Remenica $\Phi 25$ , 1 kom.	0,15	kg	8,50	1,30
38.	Remenica $\Phi 90$ , 1 kom.	0,35	kg	8,50	3,00
39.	Osovina $\Phi 16 \times 40$ , 1 kom.	0,06	kg	8,50	0,50
40.	Nosač blazinice, 8 kom.	1,9	kg	12,00	22,80
41.	Elektromotor s reduktorom 12V, 25W	1	kom.	240,00	240,00
42.	Nosač elektromotora 80x120x10, 1 kom.	0,75	kg	8,50	6,36



43.	Nosač pužnog reduktora, 1 kom.	0,5	kg	8,50	4,25
44.	Pužni reduktor 1:40	1	kom.	200,00	200,00
45.	Spojница reduktora i lančanika, 1 kom.	0,15	kg	12,00	1,80
46.	Magnet NdFeB 1/2"x1/8"	4	kom.	5,00	20,00
47.	Greutz, 20A	1	kom.	12,35	12,35
48.	Boja, nitro temeljna, 1l	1	kom.	38,00	38,00
49.	Boja, Hammerite, 1l	1	kom.	65,00	65,00
50.	Razrjeđivač, nitro, 1l	1	kom.	18,00	18,00
51.	Kist, 50mm	2	kom.	14,00	28,00
52.	Faston F-12, s kočnicom	10	kom.	0,82	8,20
53.	Kučište osigurača, 6,3x32	1	kom.	8,20	8,20
54.	Osigurač, 8A	3	kom.	2,46	7,38
55.	Greutz, 35A	1	kom.	16,39	16,39
56.	Elco 100, MF 385V	1	kom.	28,69	28,69
57.	Podnožje releja, JOX 10F	1	kom.	14,52	14,52
58.	Krajnja sklopka	2	kom.	47,58	95,16
59.	Kutija 19600/EX322	1	kom.	92,52	92,52
60.	Sklopnik, NC1-0910, 24V	1	kom.	64,66	64,66
61.	Signalno svjetlo, LED, zeleno	1	kom.	25,62	25,62
62.	Ugradbeno tipkalo NP2	1	kom.	16,58	16,58
63.	Digitalni vremenski programator, 220V	1	kom.	149,00	149,00
64.	Vezica 100x2,5	100	kom.	0,03	3,11
65.	Kabel FROR 3x1,5	10	m	4,75	47,46
66.	Vodič P/F, 1,5 sivi	20	m	1,26	25,34
67.	Grebenasta sklopka 4G10-51U	1	kom.	63,00	63,00

68.	Rastalni osigurač, 6A	10	kom.	2,17	21,69
69.	Stezaljka SAK 2,5mm	50	kom.	1,46	73,20
70.	Nosač DIN35, TH35-7.5	1	kom.	11,15	11,15
71.	Ugradbeno tipkalo, NP2	2	kom.	16,58	33,16
72.	Transformator NDKS, 220/24V	1	kom.	68,32	68,32
73.	Sklopnik NC1-0910, 24V	2	kom.	64,66	129,32
74.	Tipkalo udarno zaokretno NP2-ES	2	kom.	21,60	43,19
75.	Brojevi za SAK (1-10)	1	kom.	0,85	0,85
76.	Relej pomoćni JOX-10F 32, 24V	12	kom.	28,91	346,97
77.	Podnožje releja JOX 10F	12	kom.	14,52	174,22
78.	Signalno svjetlo LED zeleno, ND16-22	2	kom.	25,62	51,24
79.	Signalno svjetlo LED crveno, ND16-22	2	kom.	25,62	51,24
80.	Brojevi za SAK (21-30)	1	kom.	0,85	0,85
81.	Brojevi za SAK (31-40)	1	kom.	0,85	0,85
82.	Brojevi za SAK (41-50)	1	kom.	0,85	0,85
83.	Brojevi za SAK (11-20)	1	kom.	0,85	0,85
84.	Podnožje VLD01 3P ETI	1	kom.	89,66	89,66
85.	Uvodnica PTE PG09	5	kom.	1,75	8,76
86.	Uvodnica PTE PG11	5	kom.	1,96	9,08
87.	Uvodnica PTE PG07	5	kom.	1,45	7,26
88.	Utikač šuko, KOP1757	1	kom.	4,94	4,94
89.	Kutija 19600/EX322	1	kom.	78,64	78,64
90.	Pomoćni kontakti za NC F4-13	2	kom.	12,77	25,55
91.	Vremenski relej JSZ3B, 220V	2	kom.	136,40	272,79
92.	Podnožje releja PF083A-E	2	kom.	12,08	24,16

93.	Tuljak 1.5/7	200	kom.	0,06	12,44
94.	Kabel PPL 3x0,75	10	m	2,07	20,72
95.	Cijev Ticino FXP16	10	m	1,49	14,92
96.	Kabel, prekidač i rasvjeta	1	kom	350,00	350,00
97.	Iveral	3	kom	169,00	507,00
<b>UKUPNA CIJENA UTROŠENOG MATERIJALA</b>					<b>6.309,99 kn</b>

97.	Strojna obrada	50	h	100,00	5.000,00
98.	Bravarski radovi	110	h	45,00	5.280,00
99.	Električarski radovi	80	h	45,00	3.600,00
100.	Transport	50	km	3,00	150,00
<b>UKUPNA CIJENA RADOVA</b>					<b>14.887,00 kn</b>

<b>UKUPNA VRIJEDNOST NAPRAVE</b>					<b>20.339,99 kn</b>
----------------------------------	--	--	--	--	---------------------

\*

Duljina (mm)	Komada
1320	10
800	5
725	4
765	5
300	2
69	2
+10 % rezanje	

\*\*

Duljina (mm)	Komada
1000	2
+10 % rezanje	

\*\*\*

Duljina (mm)	Komada
765	2
+10 % rezanje	

#### **5.4. ISPITIVANJE UZORAKA OD UGLJIČNOG ČELIKA (PROBNO ISPITIVANJE)**

Nakon puštanja naprave u rad uslijedila je probna serija ispitivanja. Cilj probne serije ispitivanja bilo je utvrđivanje točnosti i pouzdanosti rada naprave. Za potrebe ispitivanja pripremljena su četiri uzorka (kupona) od ugljičnog čelika. Prva dva uzorka (slika 45.) su nezaštićena, jedan je uronjen u destiliranu, a drugi u pripravljenu morsku vodu. Druga dva uzorka (slika 46.) su površinski zaštićena hlapivim inhibitorom CORTEC VCI 369 te također uronjena u destiliranu i pripravljenu morsku vodu. Kiselost pripravljene morske vode iznosila je 7,2 pH (što je vrijednost unutar intervala propisanog normom).



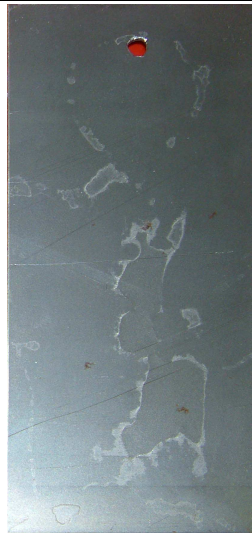



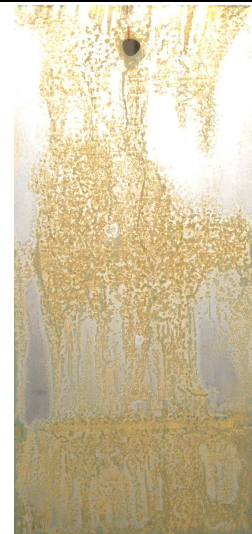
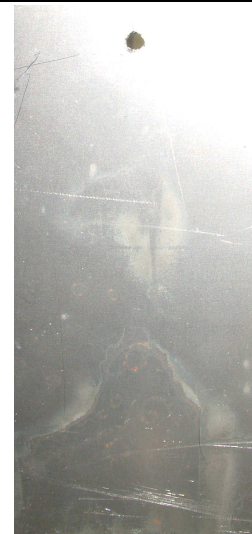
Nakon 5 sati rada naprave, ispitivanje je okončano i uzorci pregledani. Naprava je točno i pouzdano odradila probnu seriju ispitivanja (slika 47.). Na uzorcima (slike 48., 49., 50., 51.) su uočljive očekivane korozijske promjene.

Na dva uzorka je nastupila opća korozija na gotovo cijeloj površini što je vrlo dobar rezultat s obzirom na relativno kratko vrijeme ispitivanja. Test cikličkim uranjanjem je očito vrlo brz i korozivno agresivan način za utvrđivanje korozijske postojanosti materijala.

Osim ispitivanja prema propisanoj normi, moguće je primijeniti i druge parametre ispitivanja zavisno o potrebama naručioca.



**Slika 47.** Završetak probne serije ispitivanja

				P R I J E  I S P I T I V A N J A
				
<b>Slika 48.</b> Nezaštićeni uzorak u destiliranoj vodi	<b>Slika 49.</b> Nezaštićeni uzorak u pripremljenoj morskoj vodi	<b>Slika 50.</b> Zaštićeni uzorak u pripremljenoj morskoj vodi	<b>Slika 51.</b> Zaštićeni uzorak u destiliranoj vodi	

Uređaj se pokazao spreman za korištenje i rad te su montirani svi dijelovi koji omogućuju potpunu funkcionalnost i sigurnost pri rukovanju uređajem. Ipak na uređaju nedostaju neki dijelovi koji nisu za rad neophodni, ali će doprinijeti jednostavnosti korištenja i održavanja, funkcionalnosti te cjelokupnom estetskom dojmu. Tako će u najkraćem roku uređaj biti izvana obložen plastificiranim iveral pločama s čvrstom, vodonepropusnom radnom površinom.

Ispod radne površine nalazit će se ormar s policom gdje će biti moguće odlaganje sve potrebne opreme koja se koristi pri ispitivanju na uređaju.

Gornji dio uređaja s pogonom bit će također zatvoren pločama kako bi se što bolje zaštitio od nečistoća koje bi ga mogle oštetiti, a dodatno će time biti povećana sigurnost od ozljeda.

U gornji dio ugradit će se i rasvjeta za bolje praćenje tijekom ispitivanja.

## 6. ISPITIVANJE UZORAKA OD UGLJIČNOG ČELIKA CIKLIČKIM URANJANJEM

Nakon uspješno provedenog probnog ispitivanja provedeno je u okviru izrade diplomskog rada još jedno ispitivanje cikličkim uranjanjem prema normi ASTM G44. Cilj ispitivanja je bio utvrditi postojanost ugljičnog čelika u različitim otopinama te dodatno provjeriti točnost rada uređaja. Ispitivanje je provedeno na šest istih uzoraka od ugljičnog čelika (kuponu) dimenzija 150 x 70 x 1 mm. Uzorci su nakon čišćenja različito tretirani te uronjeni u otopine različitog sastava.

Prije početka ispitivanja, uzorci su odmašćeni acetonom te zatim fotografirani (slika 52.)



**Slika 52.** Odmašćivanje uzoraka acetonom

**Slika 53.** Nanošenje inhibitora na uzorke

Uzorci nisu mehanički čišćeni jer se željelo provjeriti otpornost u uvjetima kakvi su prisutni u praksi, dakle uz istu kvalitetu površine lima kakva je nakon isporuke od dobavljača. Svi uzorci su istih dimenzija i podjednake kvalitete površine. U gornji desni ugao svakog uzorka utisnut je redni broj od 1 do 6. Ispitivanje je u potpunosti provedeno prema naptcima iz norme uz manja odstupanja zbog tehničkih uvjeta u laboratoriju. U ispitivanju su sudjelovala i dva aluminijska uzorka no oni nisu uzeti u obzir pri analizi rezultata ispitivanja.

Planirano trajanje ispitivanja je 90 ciklusa (sati) i započelo je u četvrtak 23.10.2008. u 13.30 sati. Ispitivanje je završeno u ponedjeljak 27.10.2008. u 7.30 sati. Naprava je bez kvarova ili zastoja radila punih 90 sati. Površinsko stanje uzoraka i sastav otopine korištene u ispitivanju prikazani su u tablici 14.

**Tablica 14.** Stanje površine uzoraka od ugljičnog čelika i sastav korištene otopine

STANJE POVRŠINE	SASTAV OTOPINE	KISELOST (pH)	ZAPREMINA OTOPINE (l)	REDNI BROJ UZORKA
bez zaštite	destilirana voda	5,8	3	1
bez zaštite	destilirana voda + inhibitor VCI 611 u omjeru 1:40	5,8	3	2
zaštićen inhibitorom VCI 369	destilirana voda	5,8	3	3
bez zaštite	pripravljena morska voda	7,4	3	4
bez zaštite	pripravljena morska voda + inhibitor VCI611 u omjeru 1:40	7,4	3	5
zaštićen inhibitorom VCI 369	pripravljena morska voda	7,4	3	6

Na slici 54. su prikazani uzorci neposredno nakon uranjanja.



**Slika 54.** Početak ispitivanja

Otopina morske vode je pripravljena u laboratoriju i ima normirani sastav. Korišteni inhibitori su proizvod tvrtke CORTEC iz Sjedinjenih Američkih Država.

Korišteni inhibitori korozije:

- CORTEC VCI 369, hlapljivi inhibitor korozije koji se nanosi na površinu prskanjem. Prema opisu na spremniku, pruža 2 godine zaštite površini izloženoj atmosferskim uvjetima. Nakon nanošenja, površinu je potrebno ostaviti da se sloj inhibitora potpuno osuši (slika 53.).
- CORTEC VCI 611, tekući inhibitor korozije koji se dodaje u vodene otopine. Koristi se kao dodatak u vodu za pranje limova. Površinu izloženu atmosferilijama štiti nekoliko dana. Dodaje se u vodu razrijeđen u omjerima 1:10 do 1:40.

Za vrijeme ispitivanja, uzorci su fotografirani u izronjenom položaju. Norma ASTM G 44 dozvoljava privremeno uklanjanje uzoraka iz ispitne naprave za potrebe pregleda, ali to nije učinjeno kako se ne bi prekidalo ispitivanje.

Na slici 55. prikazan je uzorak br. 4 na kojem su uočljive izrazite korozijske promjene.



23.10.2008  
Početak ispitivanja

23.10.2008  
Nakon 15 ciklusa

24.10.2008  
Nakon 45 ciklusa

25.10.2008  
Nakon 65 ciklusa

27.10.2008  
Završetak ispitivanja,  
nakon 90 ciklusa

**Slika 55.** Izgled uzorka broj četiri, nezaštićeni uzorak u morskoj vodi, sniman za vrijeme kontrolnih pregleda te na početku i kraju ispitivanja

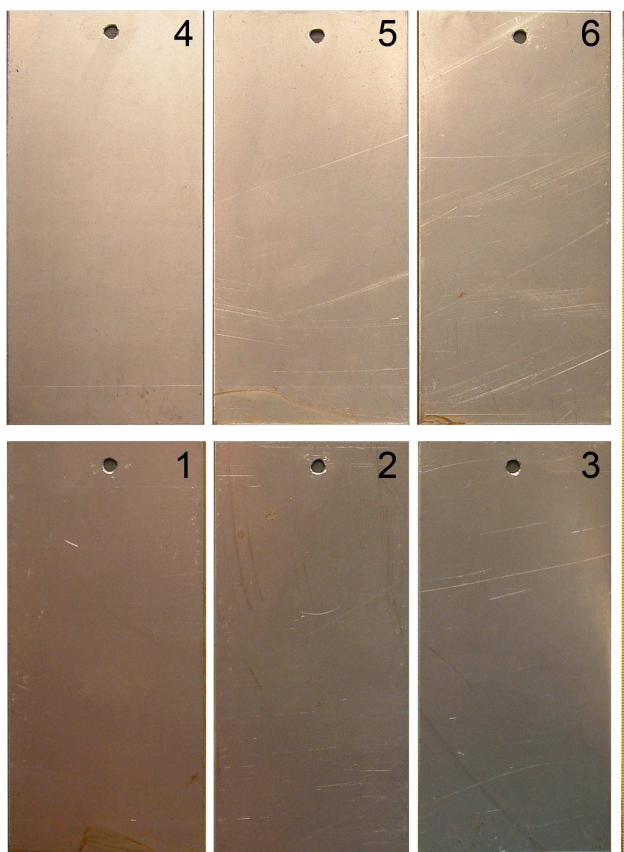
Za vrijeme ispitivanja bilo je potrebno nekoliko puta nadolijevati destiliranu vodu u posude s ispitnom otopinom kako bi se nadoknadilo gubitke zbog hlapljenja. Dozvoljeno je dodavanje samo destilirane vode do oznake razine do koje je otopina bila napunjena na početku ispitivanja. Nije dozvoljeno dodavanje bilo koje druge tekućine kako se ne bi promijenila koncentracija NaCl u otopini. Nakon 90 sati rada naprava je zaustavljena (slika 56.)



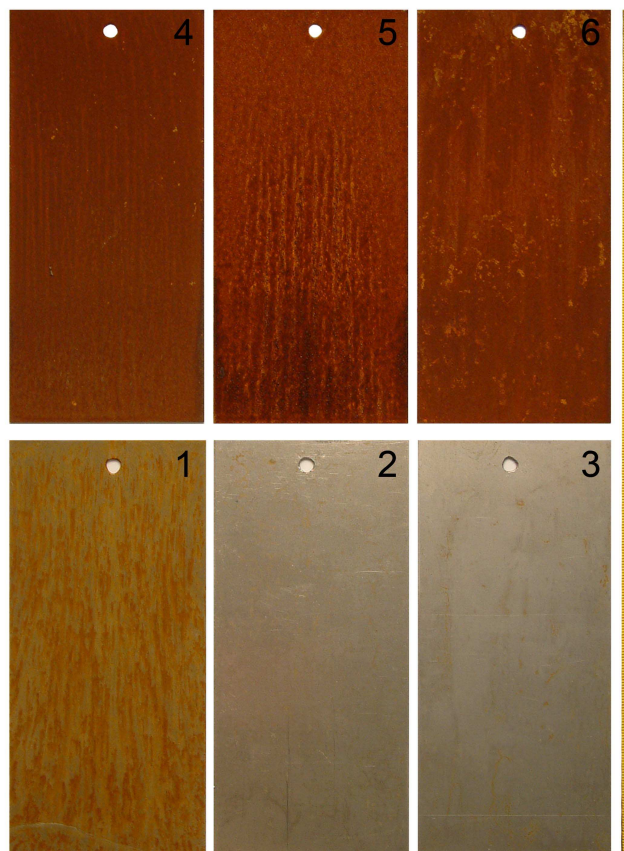
**Slika 56.** Završetak ispitivanja, posljednji ciklus

Po završetku ispitivanja svi uzorci su izvađeni iz naprave, osušeni i fotografirani (slika 58.). Uzorci su za fotografiranje poredani u istom rasporedu kao na početku ispitivanja (slika 57). Pregledom je na pet uzoraka uočeno korozijsko djelovanje. Najmanje su oštećeni uzorci broj dva i broj tri.

- Na uzorku broj jedan površinska korozija se pojavila tek nakon 48 sati ispitivanja. Uzorak broj jedan je bio uronjen u destiliranu vodu i vjerojatno je bilo potrebno 48 sati da bi se ugljični dioksid iz zraka otopio u vodi te od otopine nastala blaga karboksilna kiselina.
- Uzorak broj dva ima vrlo mala, gotovo nezamjetna površinska oštećenja.
- Uzorak broj tri nije pretrpio gotovo nikakva oštećenja. Na površini uzorka broj tri jasno su vidljive diskoloracije odnosno ostaci sasušenog inhibitora.
- Uzorci broj četiri, pet i šest su potpuno površinski korodirali i prekriveni su homogenim slojem korozijskih produkata.



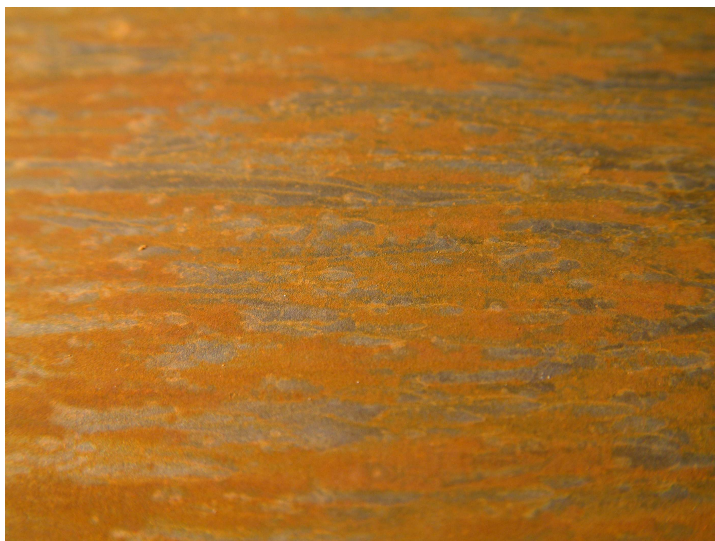
**Slika 57.** Uzorci prije početka ispitivanja



**Slika 58.** Uzorci nakon završenog ispitivanja (nakon 90 sati)

**Slika 59.**

Detalj površine uzorka br.1  
nakon 90 ciklusa , uzorak bez  
zaštite + destilirana voda



**Slika 60.**

Detalj površine uzorka br.2  
nakon 90 ciklusa, uzorak bez  
zaštite + inhibitor VCI 611 u  
destiliranoj vodi



**Slika 61.**

Detalj površine uzorka br.3  
nakon 90 ciklusa, uzorak  
zaštićen inhibitorom VCI 369 +  
destilirana voda



**Slika 62.**

Detalj površine uzorka br.4  
nakon 90 ciklusa,  
uzorak bez zaštite + morska  
voda



**Slika 63.**

Detalj površine uzorka br.5  
nakon 90 ciklusa, uzorak bez  
zaštite + inhibitor VCI 611 u  
morskoj vodi



**Slika 64.**

Detalj površine uzorka br.6  
nakon 90 ciklusa, uzorak  
zaštićen inhibitorom VCI 369 +  
morska voda



## 6.1. ANALIZA REZULTATA DOBIVENIH ISPITIVANJEM

Uzorak broj jedan je samo djelomično korodirao (slika 59.). Korozijski produkti su vrlo tanki i prekrivaju samo dijelove površine. Izgled korodiranih područja daje naslutiti da se korozija selektivno odvijala samo na nekim dijelovima površine gdje su za to postojali pogodni uvjeti. O razlozima napada na izdvojene dijelove površine se može samo nagađati bez detaljnije metalografske analize.

Uzorak broj dva ima vrlo mala oštećenja površine (slika 60.). Korozijski produkti su nalik na "oblake magle" i prisutni su samo na nekim dijelovima površine. Iako nema mnogo korodirane površine, lim bi ipak trebalo ponovno očistiti za potrebe premazivanja ili prevlačenja.

Uzorak broj tri je najmanje korodiran (slika 61.). Zaštita uzorka inhibitorom je pružila bolju zaštitu nego inhibitor otopljen u vodi. Kao i na uzorku broj jedan, površinu bi ipak trebalo čistiti prije eventualnog premazivanja ili prevlačenja. Inhibitor na površini relativno dobro je zaštitio materijal ako uzmemo u obzir njegovu originalnu namjenu a to je zaštita u atmosferskim uvjetima.

Uzorak broj četiri je pretrpio značajna površinska korozijska oštećenja, što je bilo i očekivano jer nije zaštićen i bio je uronjen u izuzetno korozivan medij – morsku vodu (slika 62.). Uzorak broj četiri se donekle može smatrati referentnim jer se na njemu odvijala nesmetana korozijska reakcija u točno definiranom mediju i na poznatom materijalu.

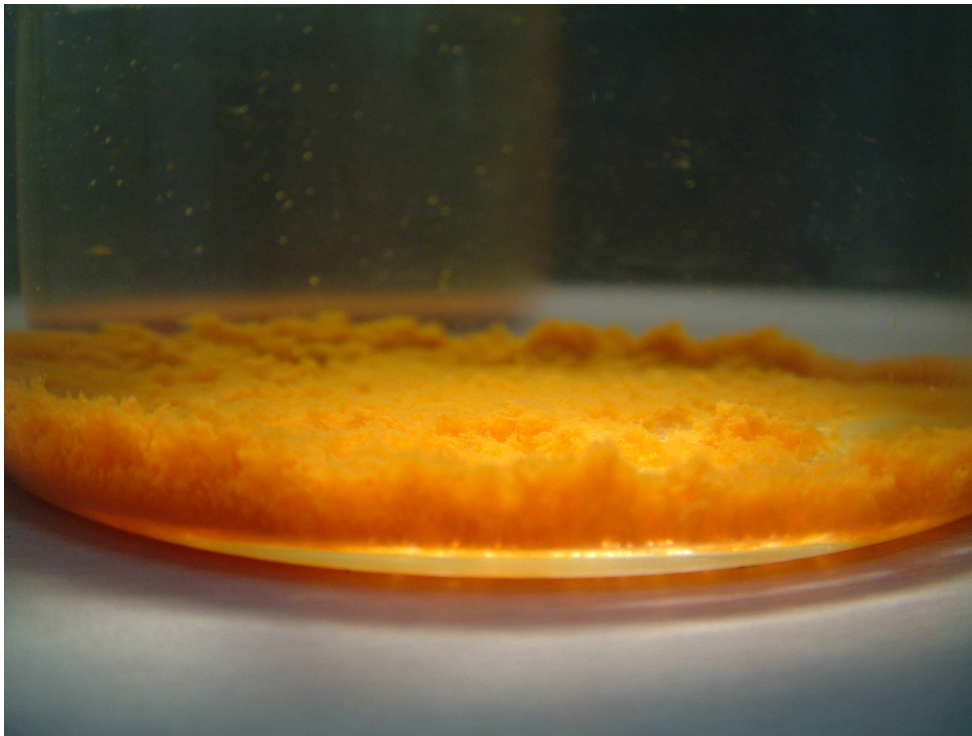
Uzorak broj pet je značajnije korodirao od očekivanog s obzirom da je otopina sadržavala inhibitor te su korozijske reakcije trebale biti usporene ako ne potpuno zaustavljene (slika 63.). Korozivni produkti na površini se izgledom i teksturom razlikuju od onih na uzorku broj četiri pa se može zaključiti da su osim željeznog hidroksida nastali još neki kemijski spojevi. Morska voda ima vrlo jako korozivno djelovanje te je dodatak inhibitora u volumnom omjeru 1:40 bio nedostatan. Za točnije određivanje djelovanja inhibitora u morskoj vodi trebalo bi provesti ispitivanje sa različitim koncentracijama.

Uzorak broj šest je također površinski korodirao (slika 64.). Korozijski produkti na uzorku broj šest su homogeni, kompaktni i vrlo čvrsti. Inhibitorsko djelovanje na površini uzorka nije bilo dovoljno da zaustavi korozijske procese. Za potrebe površinske zaštite u morskoj vodi trebalo bi odabrati drugu vrstu inhibitora.

U ispitnoj otopini uzorka broj pet koagulirali su sastojci te se istaložili na dnu posude kao grumenast sloj (slika 65.). Trebalo bi provesti detaljnu kemijsku analizu sloja kako bi se utvrdio sastav i reakcije koje su se dogodile. Postoji mogućnost da je djelovanje inhibitora bilo smanjeno zbog nastalih kemijskih reakcija.

Sve ispitne otopine osim uzorka broj tri su crvenkastosmeđe obojene korozivskim produktima. Intenzitet obojenja je različit, zavisno o intenzitetu korodiranja uronjenih kupona.

Ispitivanje je u potpunosti zadovoljilo očekivanja. Naprava je bez kvarova radila cijelo potrebno vrijeme ispitivanja i po završetku nema uočljivih promjena u radu mehanizma ili upravljanja.



**Slika 65.** Koagulat u uzorku broj pet  
(uzorak bez zaštite u pripremljenoj morskoj vodi  
s inhibitorom VCI 611, nakon 90 ciklusa)

## 7. ZAVRŠNO OPREMANJE NAPRAVE ZA URANJANJE

Nekoliko dana nakon završetka ispitivanja, nabavljeni su i montirani posljednji dijelovi naprave – radna ploha i police. Svi "drveni" dijelovi naprave su izrađeni od plastificiranog iverala prikladne sive boje. Rubovi ploha su završeni debelom ABS trakom što bi trebalo spriječiti prodor tekućina u materijal. Sve plohe na napravi su osigurane vijcima na kućište.

Na poklopac naprave je montirana lokalna rasvjeta nad radnom plohom snage 2x18 W. Rasvjetno tijelo se sastoji od neonskih cijevi duljine 50 cm u zatvorenom PG kućištu. Rasvjeta se pali prekidačem instaliranom na napojnom kablu. Ovi posljednji dijelovi poboljšali su estetiku naprave kao što je to vidljivo na slici 66.



**Slika 66.** Naprava za ispitivanje uranjanjem prema normi ASTM G44 u Laboratoriju za zaštitu materijala Fakulteta Strojарstva i Brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu 2008. godine



## 8. ZAKLJUČAK

U prvom dijelu ovog diplomskog rada izučena je korozija sa teorijskih stajališta i prikazana složenost elektrokemijskih procesa koje obuhvaća. Osim prikaza procesa, opisano je djelovanje korozije na konstrukcije i okoliš te štete koje može prouzročiti. Na temelju prikazanih procesa i opisanog djelovanja moguće je izvesti zaključke o mogućoj prevenciji korozije. Korozija je izuzetno ozbiljan problem koji uzrokuje ogromne materijalne štete te bi tom problemu trebalo pridavati mnogo veći značaj nego do sada.

Drugi dio rada opisuje normu i način ispitivanja korozije uranjanjem. Za ispitivanje uranjanjem korištene su smjernice norme ASTM G44. Navedena norma je prihvaćena kao standard za ispitivanje korozije u uvjetima izmjene vodenog i zračnog okoliša. Ispitivanja provedena na ovaj način imaju mnogo veću vjerodostojnost i ponovljivost u odnosu na slična nenormirana ispitivanja. Norma ASTM G44 ostavlja mjesta prilagodbi ispitivanja realnim uvjetima u praksi. Osim ispitivanja u morskoj vodi, moguće je ispitivanje u drugim slanim otopinama te u različitim mirujućim fluidima. Na ovaj način mogu se ispitivati materijali i prevlake koji se koriste u raznim granama industrije, npr. prehrambenoj ili farmaceutskoj gdje dolazi do periodičkog kvašenja stjenki spremnika fluidom korištenim u proizvodnji. Uz poduzimanje potrebnih zaštitnih mjera, moguće je provesti ispitivanje uranjanjem u agresivne otopine (kislone i lužine) te pod ultraljubičastim svjetlom. Rezultati ispitivanja se zapisuju u normiranom obliku pa su lako usporedivi sa sličnima, dobivenim u drugim laboratorijima.

U trećem dijelu rada opisan je projekt naprave za ispitivanje uranjanjem. Naprava je u potpunosti projektirana prema zahtjevima norme što nije bilo lako zbog slabe opskrbljenosti hrvatskog tržišta potrebnim dijelovima. Upute za projektiranje naprave opisane u normi pretpostavljaju da će se koristiti točno navedeni materijali i prevlake. Budući da to nije bilo moguće zbog kratkog vremena izrade, korišteni su ekvivalentni materijali dostupni na našem tržištu što nije smanjilo efikasnost uređaja. Ovaj ispitni uređaj sigurno je jedinstven u Hrvatskoj a možda čak i u Europi. Projektiranjem, izvedbom i probnim radom pokazano je da se radi o uspješnom rješenju kojim su znatno poboljšane mogućnosti eksperimentalnog rada u laboratoriju za zaštitu materijala.

Modularna konstrukcija omogućava naknadne promjene i prilagodbe naprave zavisno o potrebama ispitivanja. Standardni ugrađeni dijelovi omogućavaju lako servisiranje i održavanje. Upravljanje napravom je izuzetno jednostavno te ne zahtjeva posebnu obuku. Zbog jednostavnosti upravljanja studenti samostalno mogu provoditi ispitivanja uz minimalan angažman laboratorijskog osoblja.

U četvrtom, posljednjem dijelu ovog rada opisana su provedena ispitivanja na uzorcima od ugljičnog čelika u različitim korozivnim otopinama. Rezultati praktičnih testova pokazuju izuzetnu brzinu korodiranja u odnosu na statičko stanje izloženosti otopini ili zraku. Dobiveni rezultati testova se statistički obrađuju te zatim analiziraju kako bi se utvrdile relevantne vrijednosti za ispitivani korozijski proces, kao što su brzina korodiranja, gubitak mase, itd. Rezultati dobiveni ispitivanjima u sklopu ovog rada nisu u potpunosti obrađeni zbog kratkog raspoloživog vremena.

Uspješno projektiranje i izrada naprave za ispitivanje uranjanjem je tek mali doprinos poboljšanju eksperimentalnog rada znanstvene zajednice no sigurno je veliki poticaj studentima za slične projekte.

## 9. LITERATURA

- [1] Juraga I. , Autorizirana predavanja, 2003
- [2] Esih I. , "Osnove površinske zaštite", FSB, Zagreb, 2003
- [3] <http://corrosion-doctors.org/Forms-Uniform/uniform.htm>, 29. 10. 2008
- [4] <http://en.wikipedia.org/wiki/Patina>, 29.10. 2008
- [5] [http://farm2.static.flickr.com/1332/1050328624\\_6e8eef0bf7\\_o.jpg](http://farm2.static.flickr.com/1332/1050328624_6e8eef0bf7_o.jpg), 29. 10. 2008
- [6] [http://farm4.static.flickr.com/3104/2390216482\\_0b9a1bac5c.jpg?v=0](http://farm4.static.flickr.com/3104/2390216482_0b9a1bac5c.jpg?v=0) (povijest hrvata), 30. 10. 2008
- [7] Esih. I., Dugi Z., "Tehnologija zaštite od korozije", Školska knjiga, Zagreb, 1990
- [8] Jones D.A., "Principles and prevention of corrosion", Prentice Hall, New York, 1996
- [9] <http://en.wikipedia.org/wiki/Redox>, 22. 10. 2008
- [10] <http://corrosion-doctors.org/Experiments/rust-chemistry.htm>, 23. 10. 2008
- [11] <http://water.me.vccs.edu/concepts/corrosionchemistry.html>, 24. 10. 2008
- [12] <http://www.ideaphotos.com/Bridge-onstruction/PhotosMinneapolisBridgeCollapse.html>, 20. 10. 2008
- [13] [http://www.drj.com/drworld/content/w2\\_028.htm](http://www.drj.com/drworld/content/w2_028.htm), 20. 10. 2008
- [14] [http://en.wikipedia.org/wiki/1992\\_explosion\\_in\\_Guadalajara](http://en.wikipedia.org/wiki/1992_explosion_in_Guadalajara), 20. 10. 2008
- [15] [http://en.wikipedia.org/wiki/Prestige\\_oil\\_spill](http://en.wikipedia.org/wiki/Prestige_oil_spill), 20. 10. 2008
- [16] [http://asmcommunity.asminternational.org/content/ASM/StoreFiles/06691G\\_Chapter\\_1.pdf](http://asmcommunity.asminternational.org/content/ASM/StoreFiles/06691G_Chapter_1.pdf), 20. 10. 2008
- [17] [http://seattle-daily-photo.blogspot.com/2007\\_09\\_01\\_archive.html](http://seattle-daily-photo.blogspot.com/2007_09_01_archive.html), 20. 10. 2008
- [18] Grupa autora, "Corrosion: fundamentals, testing and protection", ASM handbook – Volume 13, ASM International, Materials Park, 2000.
- [19] Baboian R., "Corrosion tests and standards", ASTM, Philadelphia, 1995

**PRILOG**  
**DODATNA FOTODOKUMENTACIJA**