

Korozijsko ponašanje zavarenih spojeva

Meštrović, Lovre

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:680180>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-29**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

KOROZIJSKO PONAŠANJE ZAVARENIH SPOJEVA

Rijeka, srpanj 2022.

Lovre Meštrović

0069074088

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

KOROZIJSKO PONAŠANJE ZAVARENIH SPOJEVA

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

Komentor: Doc. dr. sc. Matej Fonović

Rijeka, srpanj 2022.

Lovre Meštrović

0069074088

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET
POVJERENSTVO ZA DIPLOMSKE ISPITE

Rijeka, 11. ožujka 2022.

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

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Lovre Meštrović (0069074088)**
Studij: **Diplomski sveučilišni studij strojarstva**
Modul: **Tehnološko informatičko inženjerstvo**

Zadatak: **Korozijsko ponašanje zavarenih spojeva / Corrosion Behavior of Welded Joints**

Opis zadatka:

Opisati korozijske procese. Analizirati unutrašnje i vanjske čimbenike korozije. Prikazati vrste korozije prema geometriji korozijskog razaranja, njihove uzroke te metode zaštite. Analizirati utjecaj grešaka zavarenih spojeva na korozijsko ponašanje materijala u eksploataciji.

U eksperimentalnom dijelu rada provesti ispitivanje korozijskog ponašanja zavarenih spojeva. Opisati materijal, postupak ispitivanja, korištenu opremu i pribor te prikazati rezultate ispitivanja.

Dati odgovarajuće zaključke.

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

Meštrović

Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:

Sunčana Smokvina Hanza

Izv. prof. dr. sc. Sunčana Smokvina Hanza

K

Prof. dr. sc. Kristian Lenić

Matej Fonović

Doc. dr. sc. Matej Fonović (komentor)

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI DIPLOMSKOG RADA

Sukladno članku 11. „*Pravilnika o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskih sveučilišnih studija*“ te sukladno „*Uputama za pisanje diplomskog rada Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci*“ izjavljujem da sam diplomski rad pod nazivom „Korozivsko ponašanje zavarenih spojeva“ izradio samostalno, služeći se stečenim znanjem tijekom studija i literaturom navedenom na kraju rada, a sve pod vodstvom mentorice izv. prof. dr. sc. Sunčane Smokvina Hanza.

Rijeka, srpanj 2022.

Lovre Meštrović (0069074088)

ZAHVALA

Ovim putem se zahvaljujem svojoj mentorici izv. prof. dr. sc. Sunčani Smokvina Hanza pri izradi diplomskog rada na njenom uloženom vremenu, stručnim savjetima te prijedlozima pri izradi diplomskog rada.

Također se zahvaljujem doc. dr. sc. Mateju Fonoviću na odvojenom vremenu, pružanjem stručnih savjeta i prijedloga za izradu diplomskog rada.

Zahvaljujem se i Građevinskom fakultetu u Rijeci i doc. dr. sc. Paulu Šćulcu zbog ustupanja prostora i opreme pomoću kojih se proveo eksperimentalni dio diplomskog rada.

Posebno se zahvaljujem didu Vitomiru Poliću i gospodinu Petru Bilandžiću na uloženom vremenu pri izradi uzoraka i davanju savjeta bez kojih ovaj diplomski rad ne bi bilo moguće izvesti.

Na kraju se zahvaljujem svojoj obitelji koja me je podržavala u izradi diplomskog rada i tijekom studiranja. Također, zahvaljujem se djevojci Sari na podršci i na pomoći koju mi je pružala tijekom godina studija i pisanju diplomskog rada.

SADRŽAJ

| | |
|--|-----|
| 1. UVOD | 1 |
| 2. O KOROZIJI..... | 3 |
| 2.1. Općenito o koroziji | 3 |
| 2.2. Klasifikacija korozije..... | 6 |
| 2.2.1. Korozija prema mehanizmu razaranja | 7 |
| 2.2.2. Korozija prema geometrijskom obliku razaranja..... | 16 |
| 3. METODE ZAŠTITE OD KOROZIJE | 29 |
| 3.1. Primjena korozivskih postojanih materijala | 30 |
| 3.2. Konstrukcijsko-tehnološke mjere | 31 |
| 3.3. Zaštite prevlakama..... | 33 |
| 3.3.1. Metalne prevlake | 33 |
| 3.3.2. Nemetalne prevlake..... | 36 |
| 3.4. Elektrokemijska zaštita..... | 38 |
| 3.4.1. Katodna zaštita | 38 |
| 3.4.2. Anodna zaštita | 40 |
| 3.5. Zaštita inhibitorima..... | 40 |
| 4. O ZAVARIVANJU | 43 |
| 4.1. Osnovni pojmovi | 43 |
| 4.2. Podjela postupaka zavarivanja..... | 46 |
| 4.3. Osnovni tipovi zavarenih spojeva..... | 49 |
| 4.4. Utjecaj grešaka zavarenih spojeva na korozivsko ponašanje | 52 |
| 4.4.1. Uzroci korozije zavarenih spojeva | 53 |
| 4.4.2. Metode zavarivanja za smanjenje korozije zavarenih spojeva..... | 56 |
| 5. EKSPERIMENTALNI DIO RADA - SLANA KOMORA..... | 58 |
| 5.1. Uzorci za ispitivanje | 58 |
| 5.1.1. Materijal | 58 |
| 5.1.2. Priprema uzoraka..... | 59 |
| 5.2. Postupak ispitivanja..... | 76 |
| 5.2.1. Priprema slane komore | 78 |
| 5.2.2. Početak ispitivanja..... | 82 |
| 5.2.3. Nakon 72 sata ispitivanja | 84 |
| 5.2.4. Nakon 168 sati – kraj ispitivanja..... | 90 |
| 5.3. Rezultati eksperimenta | 101 |

| | |
|--|-----|
| 5.3.1. Ispitivanje u slanoj komori | 101 |
| 5.3.2. Ispitivanje prionjivosti..... | 109 |
| 5.3.3. Vizualni pregled mikroskopom..... | 112 |
| 6. ZAKLJUČAK | 118 |
| LITERATURA..... | 120 |
| POPIS TABLICA..... | 125 |
| POPIS SLIKA | 126 |
| SAŽETAK..... | 130 |
| KLJUČNE RIJEČI | 130 |
| SUMMARY | 131 |
| KEYWORDS | 131 |

1. UVOD

Zavarivanje je proces koji podrazumijeva spajanje dva ili više materijala koji mogu biti istorodni ili raznorodni, pomoću taljenja ili pritiska s ili bez dodavanja dodatnog materijala kako bi se dobili nerastavljivi spojevi odnosno zavareni spojevi. Kako bi se rastavili zavareni spojevi potrebno je prisilno razaranje spoja. Kao što je poznato, korozija predstavlja razaranje metala i njihovih legura prilikom djelovanja kemijske ili elektrokemijske reakcije u reaktivnoj okolini. Zavareni spojevi su podložni koroziji tj. imaju nisku otpornost na koroziju zbog različitih čimbenika.

Glavni čimbenici korozije zavarenih spojeva su mnogobrojni te je ponekad teško odrediti točan uzrok korozije zavarenih spojeva. Zavareni spojevi mogu imati nisku otpornost na koroziju zbog različitog kemijskog sastava, zaostalog naprezanja i metalurške strukture zavara. Također, veliki utjecaj na pojavu korozije na zavarenim spojevima ima i okolina u kojoj se nalazi. Koroziju zavarenih spojeva moguće je izbjeći odabirom materijala za zavarivanje, korištenjem preporučenog dodatnog metala, odgovarajućim tehnikama zavarivanja te samom završnom obradom.

Ključna značajka zaštite od korozije je mehanička obrada zavara. Nehomogenost u obliku, odnosno površina zavara, je mjesto visokog rizika od pojave nastajanja korozije, a posljedica nastanka korozije je neobrađeni zavareni spoj. Najveći utjecaj mehaničke obrade vidljiv je kod postupka ručnog elektrolučnog zavarivanja s obloženom elektrodom.

Diplomski rad podijeljen je na dva dijela, teorijski i eksperimentalni. Teorijski dio sadrži četiri poglavlja. Drugo poglavlje pod nazivom O koroziji sadrži opće informacije o koroziji i detaljnije su opisane klasifikacije korozije i metode zaštite od korozije. U trećem poglavlju napravljena je podjela metoda zaštite od korozije te su navedene metode detaljnije objašnjene. U četvrtom poglavlju opisani su osnovni pojmovi zavarivanja kao i utjecaji grešaka zavarenih spojeva na korozijsko ponašanje.

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je ispitivanje osam uzoraka u slanoj komori koji su podijeljeni u dvije skupine različito pripremljenih zavarenih spojeva čeličnih pločica na način pripreme zavarenih spojeva, mehaničke obrade te pripreme površine i zaštite. Način tretiranja površine uzoraka podijelio se na dva načina, neočišćena površina i očišćena površina. Od osam uzoraka dva uzorka reprezentiraju neočišćenu površinu. Preostalih šest uzoraka očišćenih su površina od čega su dvije očišćene površine zaštićene temeljnim premazom, dvije su zaštićene temeljnim i završnim premazom dok su posljednje dvije površine uzoraka puštene bez zaštitnih premaza. Uzorci su podvrgnuti slanoj atmosferi ispitivanjem u slanoj komori prema normi cikličke

korozije oznake CCT-1. Osim ispitivanja u slanoj komori provedene su metode ispitivanje penetrantima, metoda urezivanja mrežice i vizualni pregled optičkim mikroskopom. Zaključak sadrži sintezu i kritičku analizu rezultata eksperimentalnog dijela rada.

2. O KOROZIJI

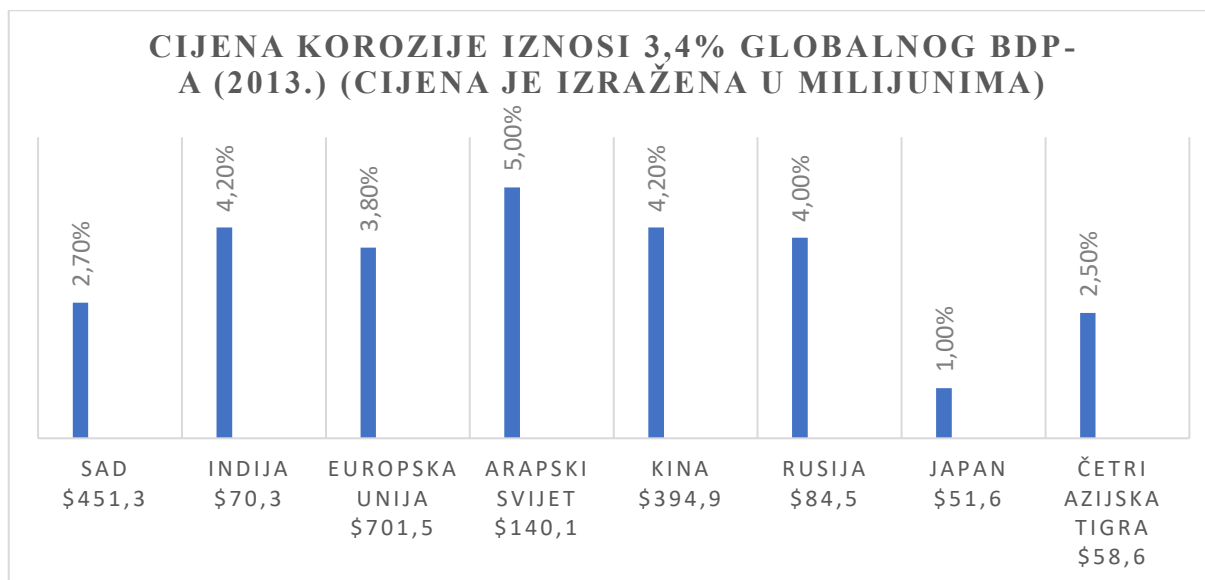
2.1. Općenito o koroziji

„*Corrodere*“ je latinska riječ koja u prijevodu znači nagrizzati, iz koje proizlazi naziv korozija. Opće prihvaćena laička definicija navodi da je korozija trošenje konstrukcijskih materijala pod djelovanjem fluida bilo to kapljevina ili plinova. Prilikom djelovanja korozije dolazi do razaranja metalnih, ali i anorganskih nemetala. Također, korozija se uočava i na organskim materijalima kao što su drvo, polimerni materijali i drugi. [1]

Prema međunarodnom standardu ISO 8044:2020 (eng. *the International Organization for Standardization*) pod nazivom „Korozija metala i legura“ (eng. „*Corrosion of metals and alloys*“) korozija je fizikalno-kemijska interakcija između metalnog materijala i korozivne okoline koja za rezultat daje promjenu u svojstvu metala, a navedene promjene mogu dovesti do značajnog oštećenja funkcije metala, tehničkog sustava u kojem je metal implementiran ili samog okoliša. [2]

Autori Bard, Inzelt i Scholz, pojam korozija definiraju kao „pojam koji se odnosi se na široki spektar destruktivnih tvari elektrokemijske pojave koje se široko definiraju kao degradacija materijala koji su u interakciji s njihovim okolišem.“ [3]

Utjecaj korozije može biti beznačajan, primjerice kozmetička mrlja na površini bicikla ili automobila pa sve do rijetkih, ali havarijskih kvarova na mostovima ili brodovima. NACE (eng. *National Association of Corrosion Engineers*) punim nazivom „Nacionalno udruženje inženjera za koroziju“ je organizacija koja se sastoji od 35 000 članova iz 130 zemalja, a globalno je poznata kao jedna od vodećih autoriteta za kontrolu korozije. Navedeno udruženje 8. ožujka 2016. godine objavilo je studiju „*International Measures of Prevention, Application and Economics of Corrosion Technology*“ (IMPACT) u kojoj se procjenjuje da je globalni trošak korozije 2,5 milijardi američkih dolara, što je ekvivalentno 3,4% ukupnog globalnog bruto domaćeg proizvoda (slika 2.1.). [4]



Slika 2.1. Cijena korozije u 2013. godini

Izvršni direktor NACE International-a rekao je: „Potrebno je promijeniti način na koji se donose odluke o koroziji. Bilo da se radi o cjevovodu, zrakoplovu, postrojenju za pročišćivanje vode ili mostu na autocesti, prevencija i kontrola korozije su bitni kako bi se izbjegli katastrofalni događaji prije nego što bude prekasno.“. IMACT uključuje studiju „upravljanja“ korozijom u automobilske industriji u kojoj se utvrdilo da je od 1975. do 1999. godine uštedilo 9,6 milijardi američkih dolara što bi u postotku značilo 52% (tablica 2.1.) Chalker je rekao: „Gledajući uspjeh u automobilske industriji, odluke o sprječavanju korozije donesene su na najvišoj razini, a kao rezultat su smanjeni troškovi korozije za proizvođače i dugovječniji automobili za potrošače odnosno kupce.“. [4]

Tablica 2.1. Troškovi povezani s korozijom u automobilske industriji

| | 1975. | 1999. |
|---|-----------|------------|
| Proizvodnja novih vozila (USD\$ milijardi u 1999. g.) | 3,1 | 2,5 |
| Operativni (korištena vozila) (USD\$ milijardi u 1999. g.) | 15,5 | 6,5 |
| Ukupno (USD\$ milijardi u 1999. g.) | 18,6 | 9,0 |
| Ukupno proizvedenih automobila | 9.000.000 | 13.000.000 |
| Cijena korozije u proizvodnji (USD\$ cijena po vozilu) | 344 | 192 |

Prvi put u povijesti destruktivna uloga korozije priznata je 1824. godine kada je engleski kemičar Sir Humphry Davy (1779. – 1829. godine) napisao rad „O koroziji bakrenog lima pod utjecajem morske vode i metodama sprječavanja njegovog učinka na ratne i druge brodove“ („*On the corrosion of copper sheeting by sea water, and on methods of preventing this effect; and on their application to ships of war and other ships*“). Cijela priča počinje 1823. godine kada je Sir Humphry Davy uz pomoć Michaela Faradaya pokušao zaštititi bakrenu oplatu brodova Kraljevske mornarice (slika 2.2.) koja je štitila drvo od morskih crva pomoću elektrokemijskih sredstava.



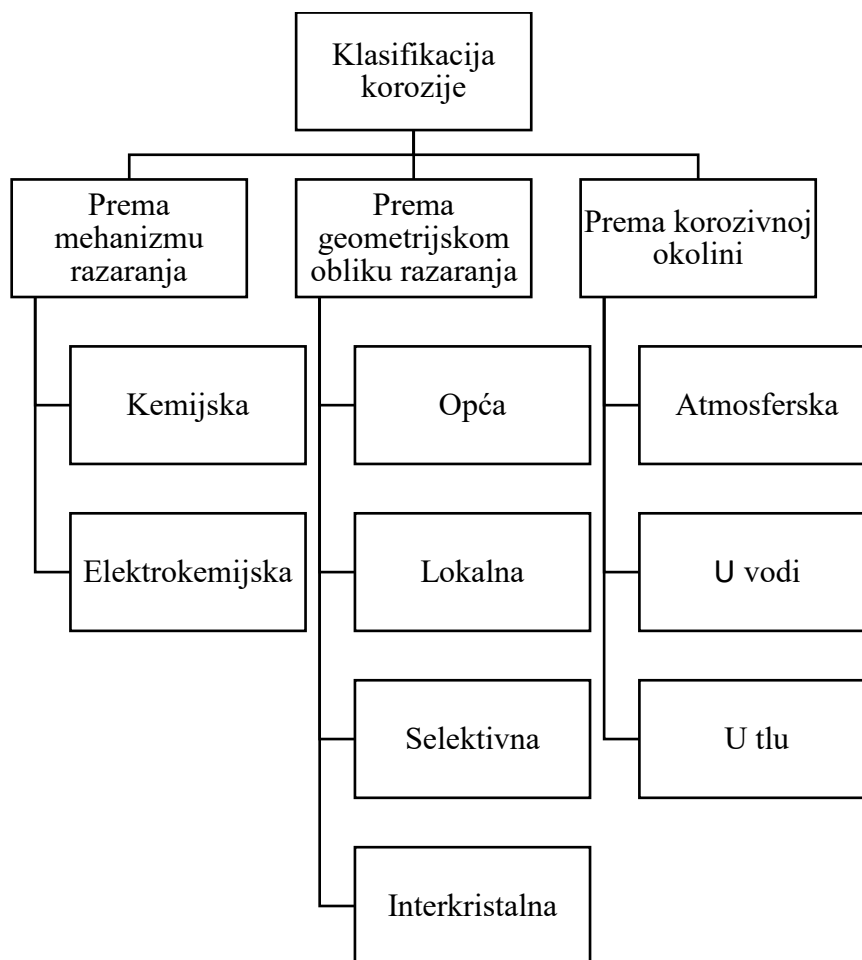
Slika 2.2. Bakrena oplata broda Kraljevske mornarice iz 19. stoljeća [5]

Pričvrstili su na bakrenu oplatu broda „žrtvujuće“ komade cinka ili željeza, što je osiguravalo katodnu zaštitu bakra. Kada je bakreni lim, koliko god on bio čist, u doticaju s morskom vodom na njemu se formira zelena hrđa, koja se nakon ispiranja zamijeni sličnom tvari sve dok korozija ne uništi čitavi metal. Kako bi spriječio ovu pojavu Sir Humphry Davy koristio se modifikacijom kemijskih afiniteta iz električne energije pomoću katodne zaštite. Nakon zadovoljavajućih rezultata dobiva dopuštenje za provođenje zaštite od korozije u kraljevskoj mornarici. Smatrao je da će se osim smanjenja nastajanja korozije spriječiti prljanje morske vegetacije, ali to nije bio slučaj.

Unatoč uspjehu zaštite od korozije, plan je viđen kao javni neuspjeh. Javile su se neželjene posljedice poput prljanjanja morske biocenoze na oplatu broda koja nije zbog korozijske zaštite ispuštala otrovne soli bakra u morsku vodu. [6]

2.2. Klasifikacija korozije

Korozija je izrazito kompleksan i raznovrstan problem u tehničkom znanstvenom području pa ju je zbog lakšeg razumijevanja potrebno razvrstati u određene razrede. Klasična podjela dijeli koroziju prema mehanizmu razaranja, geometrijskom obliku razaranja i korozivnoj okolini (slika 2.3.). [7]



Slika 2.3. Klasifikacija korozije

2.2.1. Korozija prema mehanizmu razaranja

Prema mehanizmu razaranja koroziju se može razvrstati na kemijsku i elektrokemijsku. Također, za kemijsku koroziju se može reći da je ona suha korozija jer nastaje kada nema vode ili vlage koja bi mogla pokrenuti koroziju, a metal oksidira uz pomoć vrućih i suhих plinova ili para te u bezvodnim organskim tekućinama. Elektrokemijska korozija ili pod nazivom mokra korozija metala događa se prijenosom elektrona koja uključuje dva procesa, oksidaciju i redukciju. U oksidaciji atomi gube elektrone, a prima ih okoliš koji provodi redukciju. Metal koji gubi elektrone naziva se anoda, a drugi metal, tekućina ili plin koji prima izgubljene elektrone naziva se katoda. [8]

Kemijska korozija zbiva se u neelektrolitnim otopinama, odnosno u medijima koji ne provode električnu struju. Nastaje reakcijom spajanja atoma metala iz kristalne rešetke i električki nevodljivom okolinom, a sve se zbiva pri visokim temperaturama u vrućim i suhim plinovima ili parama (O_2 , H_2S , Cl_2 , HCl , NO_x , H_2 , S_2 (para)), na primjer pri zavarivanju ili toplinskoj obradi. Mogućnost nastajanja kemijske korozije je i u neelektrolitima poput organskih tvari, a najznačajnije bezvodne otopine su nafta i njezini derivati, poput maziva i tekućih goriva (razaranja metala u nafti pod utjecajem sumpora ili njegovih spojeva).

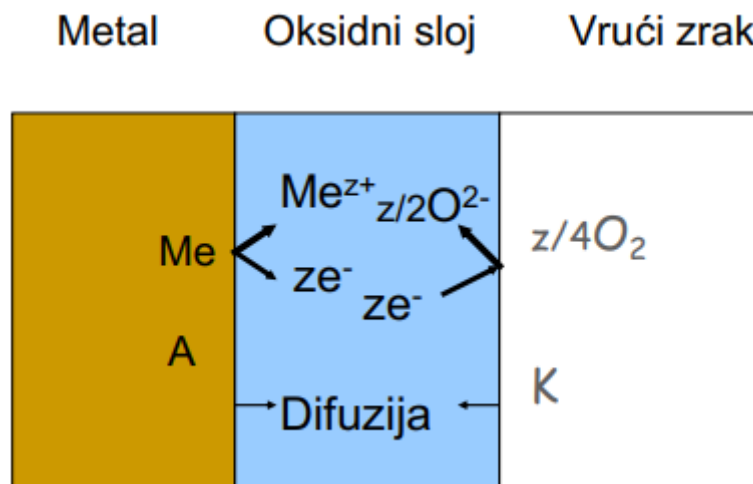
Brzina i tok kemijske korozije ovise o:

1. metalu koji korodira (kemijskom sastavu, strukturi i teksturi),
2. okolini koja ga okružuje (sastav okoline i koncentracija),
3. brzini gibanja okoline,
4. fizikalnim uvjetima (hrapavosti površine metala, temperaturi, naprezanjima),
5. korozijskim produktima (kemijska i fizikalna svojstva produkta korozije),
6. koeficijentu difuzije iona.

Kako bi se smanjila brzina kemijske korozije potrebno je poduzeti određene korake. Jedan od koraka je smanjivanje energijskog nivoa molekula i atoma koji su međusobno u reakciji što se postiže snižavanjem temperature. Navedeni proces naziva se kinetički tj. aktivacijski otpor koroziji. Drugi način smanjivanja brzine kemijske korozije je kroz tvorbu korozijskih produkata na samoj površini metala kao zaštitnog sloja, naziva se difuzijski ili transportni otpor koroziji. Debljina sloja varira od 40 nm do 500 nm. [7, 9]

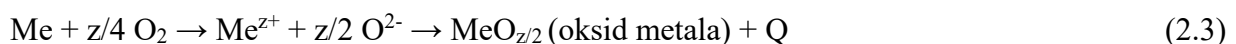
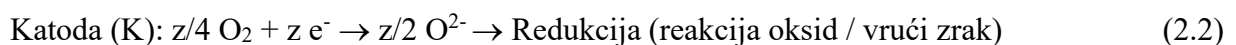
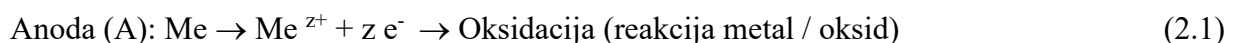
Najčešće dolazi do pojave kemijske korozije tj. oksidacije metala s kisikom iz vrućeg zraka što dovodi do nastajanja metalnog oksida kao korozijskog produkta. Kemijska korozija dijeli se prema aktivnosti kisika na oksidirajuće i reducirajuće. Oksidirajuća atmosfera sadrži molekularni kisik

(O₂), a nalazi se u atmosferi koja sadrži slobodni kisik ili kisik u zraku. Produkt takve atmosfere je velika aktivnost kisika te se kontrolira koncentracijom molekularnog kisika. S druge strane, u reducirajućoj atmosferi aktivnost kisika je minimalna i kontrolirana je odnosima CO/CO₂ i H₂/H₂O. Posljedica reakcija na međupovršini oksid – plin i metal – oksid je nastanak termičkog oksidnog sloja na površini metala. Navedeni proces naziva se i Wagnerova teorija kemijske korozije (slika 2.4.). [10]



Slika 2.4. Wagnerova teorija kemijske korozije [10]

Kroz dvije parcijalne reakcije moguće je objasniti redoks proces koji se događa tijekom oksidacije metala u zraku i u drugim plinovima i to kroz oksidaciju metala i redukciju kisika. Postiže se ravnoteža reakcije kada su brzine reakcije u oba smjera jednake.



gdje je:

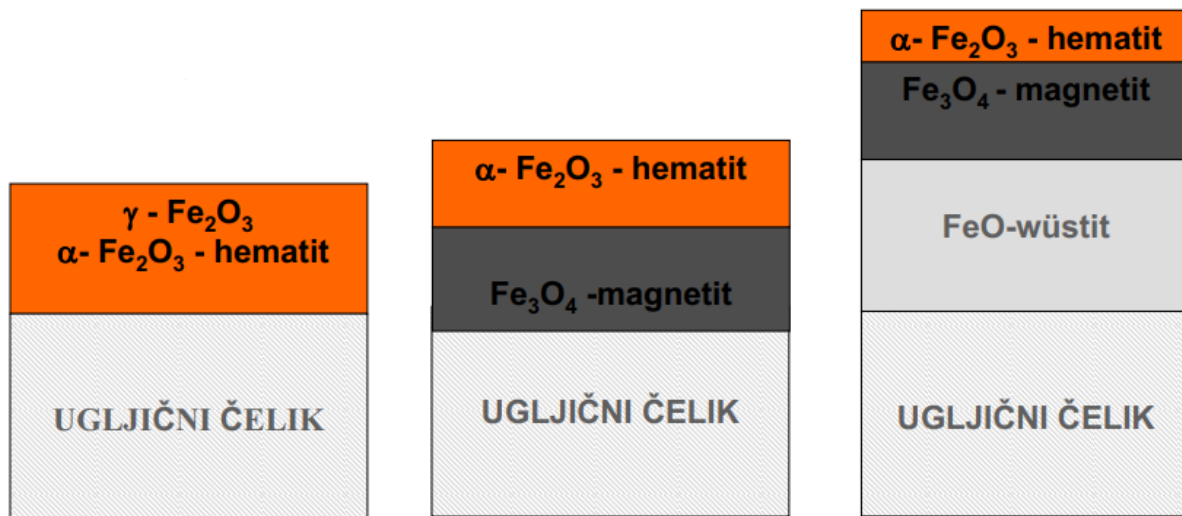
Me atom metala,

z valencija,

Q [J] toplina koja se oslobađa.

Oksidni sloj je istovremeno i ionski i elektronski vodič. [7, 12]

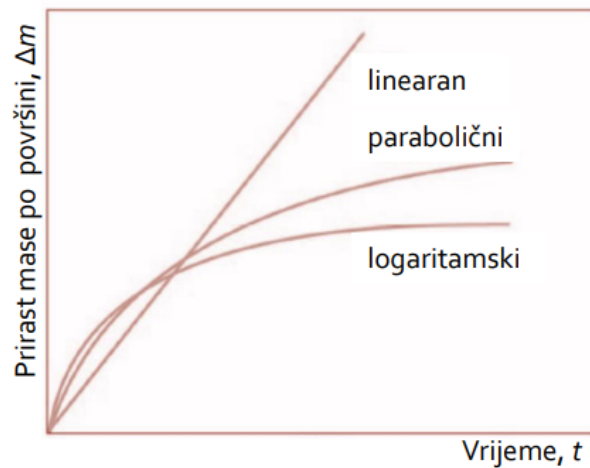
Prilikom zavarivanja, na površini čelika tijekom toplinske obrade pri sobnoj i povišenim temperaturama nastaju slojevi željeznog oksida (slika 2.5.).



Slika 2.5. Oksidni slojevi na površini čelika u vrućem zraku [9]

1. Sloj Fe_2O_3 hematit na površini čelika – debljina sloja manja je od 100 nm te su slojevi kompaktni tj. dobro štite površinu čelika.
2. Slojevi Fe_3O_4 magnetita i Fe_2O_3 hematita na površini čelika – debljina sloja je od 100 nm do 200 nm te je već vidljiv na površini čelika. Nastupa pri temperaturama od 200 do 450 °C.
3. Slojevi FeO wüstit, Fe_3O_4 magnetita i Fe_2O_3 hematita – debljina sloja je oko 1000 nm i nastaje pri temperaturama većim od 450 °C. [9,10]

Oksidni slojevi u početnom stadiju doživljavaju vrlo brzi rast. Početni sloj je kompaktn, neporozan i pokriva čitavu površinu metala. Do smanjenja rasta sloja dolazi kada debljina dosegne određene granice tj. nekoliko stotina nanometara i kada difuzija reaktanata počne određivati rast sloja. Nadalje, brzina kemijske korozije ovisi o mehanizmu transporta, a uzrokovana je razlikom električnog potencijala ili na primjer gradijenta koncentracije. Rast oksidnog sloja na površini metala i legura moguć je kroz tri osnovna kinetička zakona: linearni, parabolični i logaritamski (slika 2.6.). Brzina oksidacije se mjeri i izražava kao prirast mase po jedinici površine. [9, 10]



Slika 2.6. Tri osnovna kinetička zakona za rast oksidnog sloja [7]

Linearna oksidacija ili kinetička kontrola oksidnog sloja nastaje kada se produkt reakcije oksida zadržava na metalnoj površini, a formiran je tako da ne pokriva čitavu površinu metala, odnosno sloj je propustan. [10]

$$\frac{dx}{dt} = k_k c_o \quad (2.4)$$

$$x = k_k c_o t \quad (2.5)$$

gdje je:

x [mm] debljina oksidnog sloja,

t [s] vrijeme,

k_k konstanta brzine oksidacije

c_o koncentracija O_2 u atmosferi.

Parabolična oksidacija ili difuzijska kontrola oksidnog sloja javlja se kao kompaktan oksidni sloj i služi kao jednolična barijera difuziji kisika. Sama brzina rasta oksidnog sloja obrnuto je proporcionalna trenutačnoj debljini:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{-k D dc}{\rho_{oks} dx} \quad (2.6)$$

$$\frac{dx}{dt} = \frac{-k D (c_1 - c_o)}{\rho_{oks} dx} \quad (2.7)$$

gdje je:

D konstanta,

c_1 brzina oksidacije,

ρ_{oks} [kg/mm³] gustoća.

Uz pretpostavku da je brzina oksidacije veća od brzine difuzije ($c_1 = 0$), integracijom jednadžbe dobiva se parabolni rast oksida:

$$x = (2 k D c_o / \rho_{oks})^{\frac{1}{2}} = K t^{\frac{1}{2}} \quad (2.8)$$

$$K = (2 k D c_o / \rho_{oks})^{\frac{1}{2}} \quad (2.9)$$

Logaritamska oksidacija primjenjuje se pri niskim temperaturama kada se kroz sloj oksida javlja velika brzina difuzije u početnim trenucima te nakon nastanka debljeg oksidnog sloja znatno smanjuje. Zbog navedenih razloga rijetko se primjenjuje u tehničkim problemima visokih temperatura. Logaritamska oksidacija poprima oblik jednadžbe:

$$x = k_3 \log(k_4 t + 1) \quad (2.10)$$

gdje su k_3 i k_4 konstante. [10]

Oksidni slojevi na površini metala imaju svoje poželjne karakteristike, a neke od tih su: visoka termodinamička vodljivost, visoko talište, mali tlak para kao i mali koeficijent difuzije reaktanata kroz sloj i Pilling – Bedworthov omjer veći od 1. [7,10]

Korozija se osim u kemijskom obliku prema mehanizmu razaranja pojavljuje i kao elektrokemijska korozija. Elektrokemijska korozija javlja se na metalima i legurama kada dolaze u dodir s vodom, vodenim otopinama kiselina, soli i lužina, uz odvijanje reakcija oksidacije i redukcije. Na slici 2.7. i 2.8. prikazana je elektrokemijska korozija srebrnog pribora za jelo i bakrene cijevi. [9]



Slika 2.7. Korozija srebrnog pribora za jelo [11]



Slika 2.8. Korozija bakrene cijevi [12]

Do elektrokemijske korozije obično ne dolazi direktnom kemijskom reakcijom metala ili legure s okolinom već kroz rad spregnute elektrokemijske polureakcije tzv. „*half-cell reaction*“. Polureakcija je ona reakcija u kojoj se elektroni pojavljuju na jednoj ili drugoj strani reakcije. Ako

su elektroni produkti tada je polureakcija oksidacijska reakcija, a ako su elektroni reaktanti tada je polureakcija redukcijska reakcija. [13]

Oksidacija je reakcija kojom neka tvar ili skupina tvari tzv. reducens, oslobađa elektrone, pri čemu nastaje nova, druga tvar ili skupina tvari. Nadalje, redukcija je reakcija kojom neka tvar ili skupina tvari tzv. oksidans, veže elektrone, pri čemu nastaje druga tvar ili skupina tvari. [9]

Gubitak materijala javlja se kao anodna reakcija, a stvaraju se elektroni:



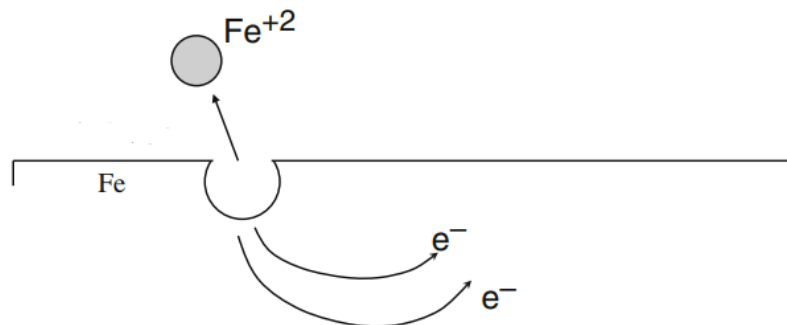
gdje je:

s kruto stanje,

aq tekuće stanje.

Izrazi 2.11 i 2.12 prikazuju anodnu reakciju pri kojoj dolazi do povećanja oksidacijskog broja i otpuštanje elektrona na anodnom mjestu. [10, 13]

Shematska ilustracija anodne reakcije (izraz 2.11) nalazi se na slici 2.9.



Slika 2.9. Primjer anodne reakcije željeza [13]

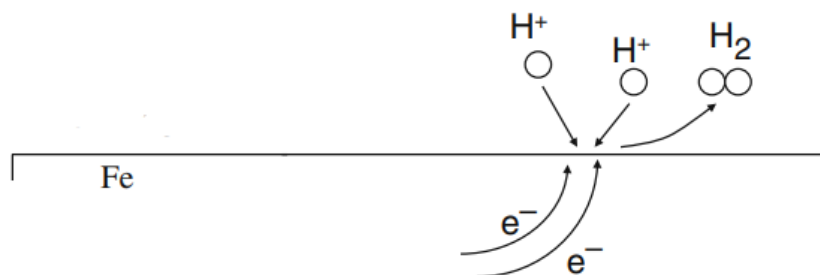
Katodna reakcija rezultira primanjem elektrona na površini katode, podliježe redukciji odnosno smanjuje se njegov oksidacijski broj. [7]

Primjer katodne reakcije je redukcija dva vodikova iona na površini kako bi formirali jednu molekulu vodika:



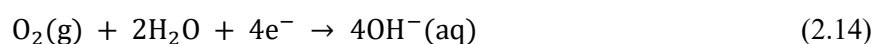
gdje je g plinovito stanje.

Shematska ilustracija katodne reakcije jednadžbe (2.13) nalazi se na slici 2.10.

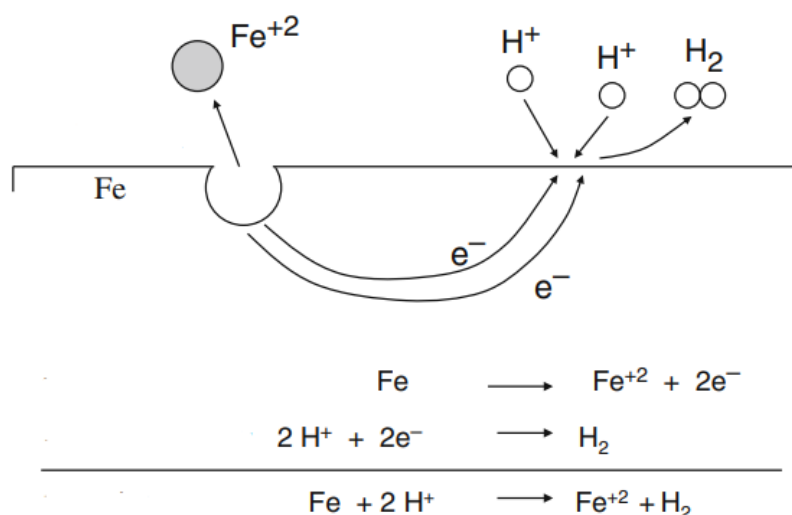


Slika 2.10. Primjer katodne reakcije – nastajanje vodika na željezu uronjenom u kiselinu [13]

Osim spomenute vodikove redukcije (depolarizacije), uobičajena je i katodna reakcija redukcije otopljenog kisika u hidroksilne ione, a događa se u neutralnim ili bazičnim otopinama [10, 13].



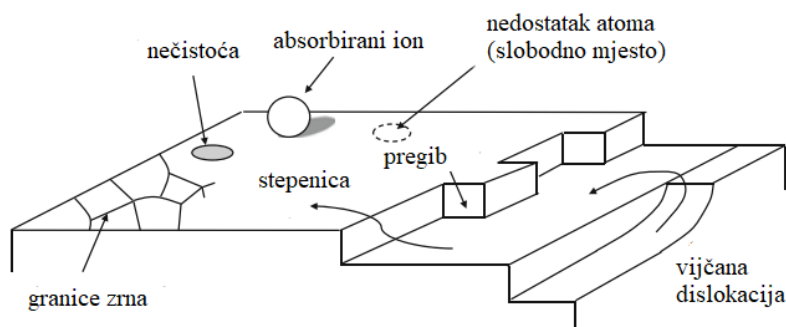
Na korodirajućoj metalnoj površini, anodna i katodna reakcija odvijaju se na različitim dijelovima metalne površine. Na slici 2.11. prikazano je ponašanje željezne površine koja se nalazi u kiseljoj vodenoj okolini. Na nekim mjestima površine atomi željeza prelaze u otopinu kao ioni Fe^{2+} kao što je navedeno u izrazu 2.11. Dva novonastala elektrona proizvedena anodnom reakcijom troše se na drugom dijelu površine kako bi se dva vodikova iona reducirala u jednu H_2 molekulu. [10, 13]



Slika 2.11. Ilustracija anodne i katodne reakcije na površini željeza [13]

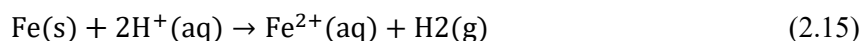
Razlog zbivanja dvije različite elektrokemijske polureakcije leži u heterogenoj prirodi metalne površine na kojoj se događaju reakcije. Razlog tomu je polikristalna struktura tj. različitosti

kristalnih zrna i njihovih granica. Osim veličine zrna i njihovih granica, utječu i drugi nedostaci kao npr. mjesta pregiba, dislokacije vijaka, rubovi, stepenice ili površinska onečišćenja (slika 2.12.). [10, 13]



Slika 2.12. Uzroci nastajanja elektrokemijske reakcije [13]

Nesavršenosti kristalne građe poput granica kristalnih zrna i dislokacija su područja koja sadrže veću energiju zbog čega su reaktivnija u dodiru s reaktivnom okolinom. Veliki utjecaj imaju površine s velikim naprezanjima zbog nestabilnijeg okruženja. Ukupna kemijska reakcija je zbroj dvije reakcije polureakcija:



Da bi se ostvarila elektrokemijska korozija potrebno je zadovoljiti četiri uvjeta:

1. anodna reakcija,
2. katodna reakcija,
3. metalna veza između anodnog i katodnog mjesta,
4. prisutnost elektrolita.

Proces redukcije uvijek se događa na katodi, a oksidacija na anodi. U tablici 2.2. dane su vrijednosti galvanskog niza standardnih elektrodnih potencijala te oksidacije određenih metala. Standardni elektrodni potencijal E° je mjera za tendenciju oslobađanja elektrona u redoks sustavu, a određuje se temeljem standardne vodikove elektrode u otvorenom strujnom krugu. U tablici se nalaze neki od primjera standardnih elektrodnih potencijala za neke elektrokemijske reakcije. U svim slučajevima potencijali se odnose na elektrode u kojima su svi reaktanti u jednakom aktivitetu vodene otopine pri tlaku od 1 atm i na 25 °C. [7]

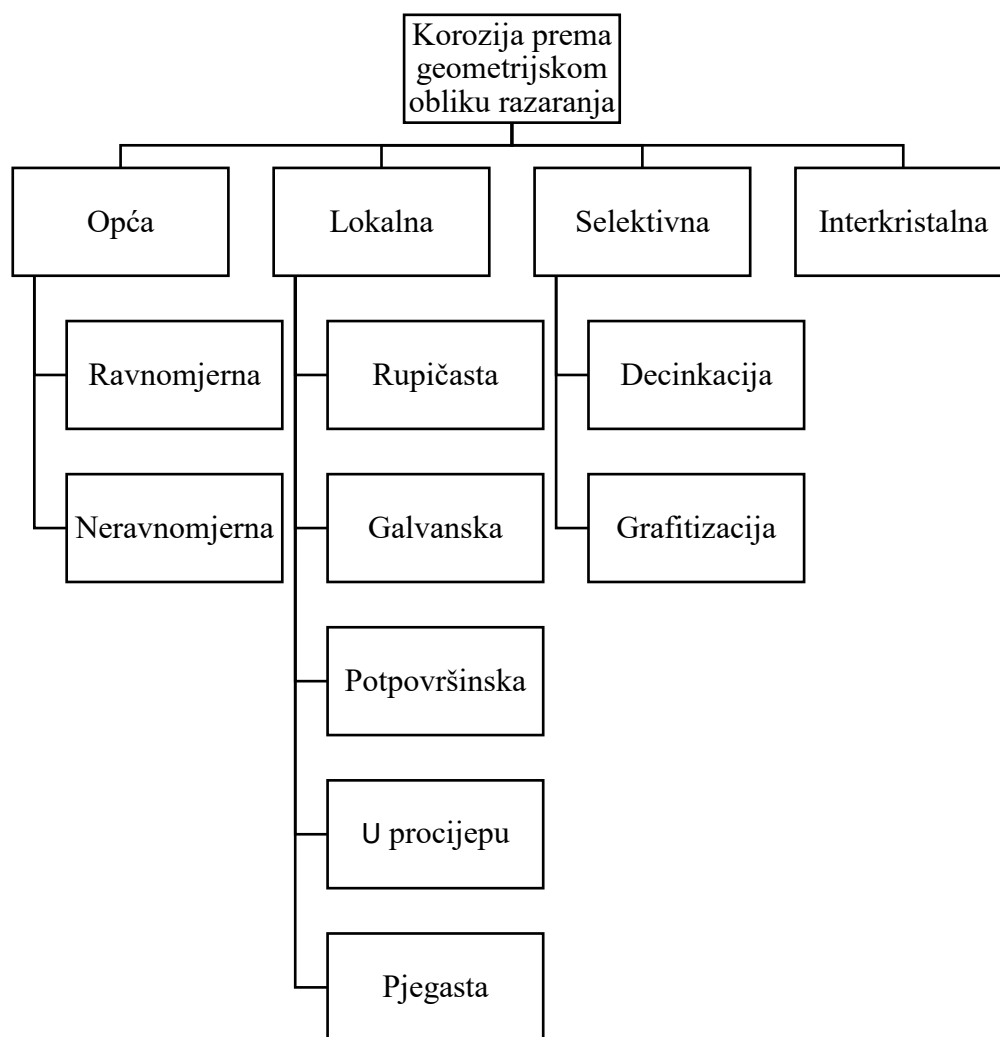
Tablica 2.2. Galvanski niz standardnih elektrodnih potencijala metala

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

} neplemeniti metali
 } plemeniti metali

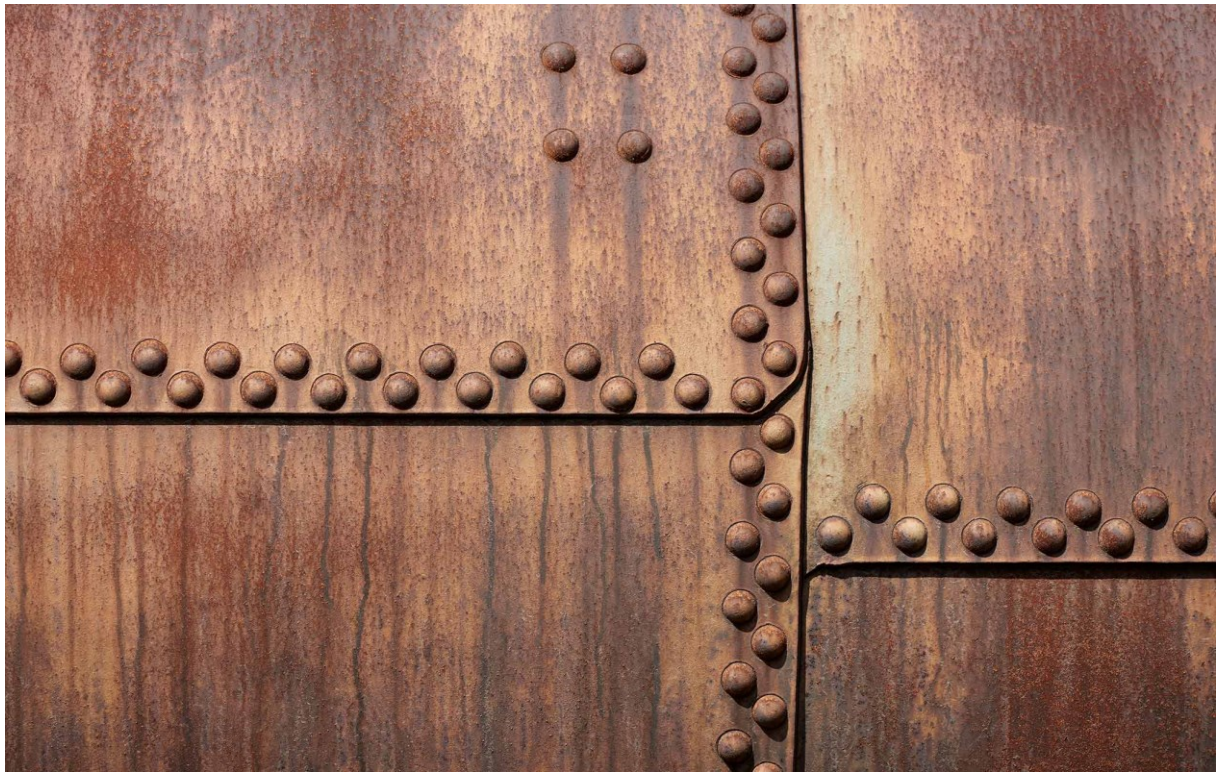
2.2.2. Korozija prema geometrijskom obliku razaranja

Korozija se osim prema mehanizmu razaranja dijeli i prema geometrijskom obliku razaranja (slika 2.13.). Osnovna klasifikacija prema geometrijskom obliku razaranja dijeli koroziju na opću, lokalnu, selektivnu i interkristalnu koroziju, a svaka navedena skupina se grana u podskupine.



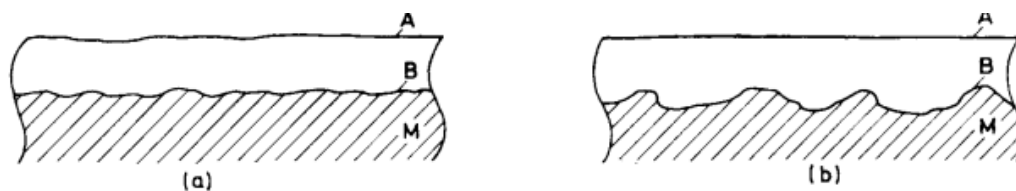
Slika 2.13. Oblici korozijskih razaranja metalnih materijala

Opća korozija je najrašireniji oblik korozijskog razaranja metala, no ujedno je i najneopasniji jer je metal napadnut ravnomjerno po čitavoj površini koja je izložena agresivnoj okolini (slika 2.14.). Metalni dio postaje sve tanji pod utjecajem elektrokemijskih mehanizama korozije te kada dostigne kritičnu debljinu nastupa lom metala. Neki od primjera nastajanja opće korozije su korozija cinka u klorovodičnoj kiselini i atmosferska korozija željeza ili čelika u agresivnom okruženju. U tim slučajevima postoje lokalizirane anode i katode. Po masi, opća korozija u atmosferi stvara najviše korozijskog produkta. [13]



Slika 2.14. Prikaz opće korozije [14]

Opća korozija napada čitavu izloženu površinu metala, a dijeli se na ravnomjernu i neravnomjernu koroziju. Gledano pod mikroskopom, može se uočiti da ravnomjerna korozija nije jednako brza kao što bi se očekivalo iz naziva. Obično uzrokuje glatke, lagano hrapave metalne površine. Na slici 2.15. shematski je prikazana opća korozija gdje je A površina metala prije korozije, B površina metala nakon korozije, a M materijal. U praksi, opasnija je neravnomjerna opća korozija jer se opću ravnomjernu koroziju može lako predvidjeti i pratiti te djelovati kada je to potrebno. [10, 13]



Slika 2.15. Shematski prikaz opće ravnomjerne korozije (a) i opće neravnomjerne korozije (b) [10]

Neravnomjerna opća korozija je posljedica nehomogene strukture metala kao i njegovog sastava te nehomogenosti okoliša. Dubina prodiranja korozije u metal ne daje stvarnu sliku stanja konstrukcije. Neravnomjerna opća korozija može dovesti do velikih šteta i propuštanja, na primjer u cjevovodima. [10]

Metalna površina izložena korozivnom okruženju može, pod određenim uvjetima, doživjeti „napad“ na brojnim izoliranim mjestima. Ako je ukupna površina gdje dolazi do korozije mnogo manja od cjelokupne površine metala, onda se govori o lokalnoj koroziji. [16]

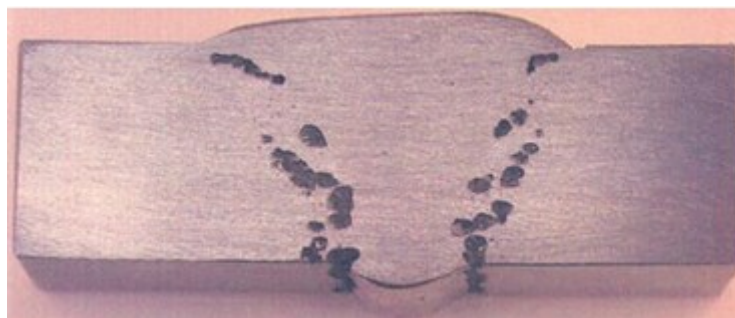
Lokalna korozija zahvaća samo pojedine dijelove konstrukcije i spada pod najraširenije oblike korozije. Lokalnu koroziju karakteriziraju oštećenja koja se prvenstveno javljaju na odvojenim mjestima na površini metala i može rezultirati stvaranjem udubljenja, pukotina i utora. Da bi se formirala intenzivna lokalna anoda potreban je veliki omjer površine katode i anode. Prema obliku, lokalna korozija pojavljuje se kao rupičasta, pjegasta, galvanska, potpovršinska te korozija u procijepu. [15, 17]

Jedan od najrazornijih oblika lokalne korozije je rupičasta korozija ili jamičasta korozija (slika 2.16.) (eng. *pitting corrosion*) koju karakterizira prisustvo niza malih rupica na izloženoj metalnoj površini. Geometrija rupica ovisi o brojnim čimbenicima kao što su sastav materijala i orijentacija površine. Rupičasta korozija nastaje zbog lokalnog oštećenja pasivnog filma, obično kloridnim ionima. Rupičasta korozija je opasan oblik korozivnog napada iz nekoliko razloga. Rupice mogu rezultirati perforacijom tj. probijanjem metalne površine, a ostatak površine ostaje netaknut. Prilikom naprezanja, rupice mogu služiti kao početna točka iz koje kreće pukotina. Prisustvo rupica teško je otkriti ako su prekrivene korozijskim produktom. [13, 17]



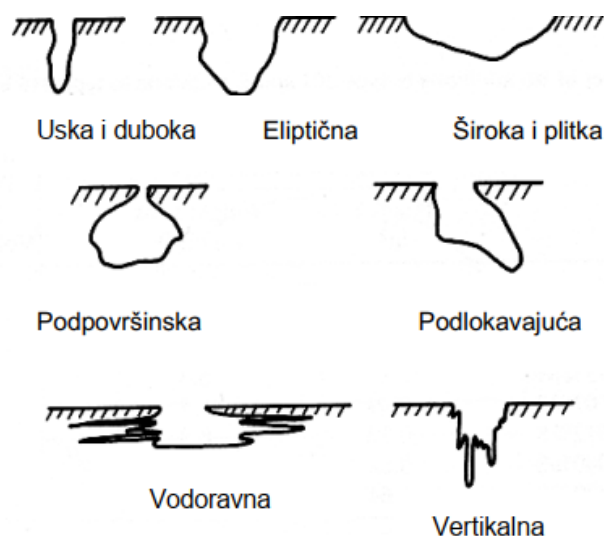
Slika 2.16. Primjer rupičaste korozije na cijevi [18]

Do pojave rupica ne dolazi vrlo brzo, u praksi je potrebno nekoliko mjeseci do godinu dana, tako da njihovo trenutno nepostojanje ne znači da je površina metala ili legura otporna na rupičastu koroziju. Svi metali skloni pasivaciji podložni su koroziji, iako najveću tendenciju rupičastoj koroziji u praksi imaju nehrđajući čelici prilikom zavarivanja (slika 2.17.) te aluminij i bakar. [13]



Slika 2.17. Rupičasta korozija u presjeku zavarenog spoja [20]

Okoliš koji najviše pogoduje nastajanju rupičaste korozije je morski okoliš, odnosno morska voda gdje postoje ioni klorida, bromida i jodida. Pri visokim koncentracijama navedenih iona dolazi do stvaranja rupica na pasivnim metalima. Pokretač za rupičastu koroziju mogu biti čestice prašine ili prljavštine u bakrenim cijevima. Rupice je teško zamijetiti zbog njihove mikroskopske strukture. Površina je prekrivena filmom ili naslagama što može odati dojam da su rupice male, ali unutar metala tj. ispod površine mnogo su veće i mogu poprimiti različite oblike (slika 2.18.). [20]



Slika 2.18. Oblici rupica kod rupičaste korozije [10]

Galvanska korozija je posljedica fizičkog kontakta dva različita metala koji su uronjeni u istom korozivnom mediju (elektrolitu) što spada u jedan od najčešćih tipova korozije (slika 2.19.). Galvanska korozija pojavljuje se kod bakrenih cjevovoda koji su spojeni na čelične spremnike, vijaka od nehrđajućeg čelika u kontaktu s čeličnom podloškom obloženom kadmijem, trupom broda od legure nikla koji je spojen čeličnim zakovicama i mnogim drugim slučajevima kada su u kontaktu metali različitih elektrodnih potencijala. [13, 21]



Slika 2.19. Primjer galvanske korozije [22]

Kada su dva različita vodljiva materijala u električnom kontaktu jedan s drugim i izloženi elektrolitu, struja pod nazivom galvanska struja, teče s jednog materijala na drugi. Galvanska korozija je onaj dio korozije koji se javlja na anodnom članku tog para i izravno je povezan na galvansku struju po Faradayjevom zakonu. U galvanskom članku prvo korodira onaj metal koji sadrži niži elektrodni potencijal tj. anoda galvanskog članka jer je elektronegativnija, dok je katoda elektropozitivnija. [21]

Pri izradi konstrukcija nije uvijek moguće koristiti dijelove koji su izrađeni od istog konstrukcijskog materijala, a kao što je navedeno postoje više ili manje plemeniti materijali. Svaki materijal ima različiti korozijski potencijal ovisno u kojem se elektrolitu nalazi. Intenzitet galvanske korozije ovisi o razlici potencijala između metala ili legura, o okolini u kojoj se nalazi, geometrijskom odnosu metala ili legura koji su u spoju i o polarizaciji metala ili legura. [10]

Kako bi se spriječila galvanska korozija ili makar smanjio njezin utjecaj potrebno je voditi računa o položaju konstrukcijskih elemenata u galvanskom nizu i poželjno je odabrati što srodnije materijale (tablica 2.3.). U tablici su metali poredani prema korozijskom potencijalu u elektrolitu, točnije u morskoj vodi. Na vrhu tablice nalaze se aktivni metali s visokim negativnim potencijalom tj. oni koji su manje plemeniti (anode), a na dnu su smješteni plemeniti metali (katode). [10]

Tablica 2.3. Galvanski niz pojedinih konstrukcijskih materijala u morskoj vodi [10]

| Materijal | Korozijski potencijal E° / V |
|--|-------------------------------------|
| Magnezij | -1,45 do -1,36 |
| Magnezijeve legure | ~ -1,35 |
| Cink | -0,83 do -0,76 |
| Aluminij s 99% Al | -0,66 do -0,53 |
| Duraluminij | ~ -0,55 |
| Kadmij | -0,53 do -0,51 |
| Ugljični čelik | -0,48 do -0,21 |
| Sivi lijev | -0,42 do -0,18 |
| SnPb - legura sa 60% Sn | ~ -0,30 |
| Olovo | -0,31 do -0,26 |
| Kositar | -0,25 do -0,21 |
| Austenitni Cr-Ni čelik u aktivnom stanju | ~ -0,10 |
| Nikal | ~ 0,02 |
| Mjed s 60% Cu | 0,05 do 0,27 |
| Bakar | 0,10 do 0,28 |
| CuNi - legura sa 70% Cu | 0,08 do 0,32 |
| Krom | ~ 0,23 |
| Bronca s 88% Cu, 10% Sn i 2% Zn | 0,13 do 0,36 |
| Srebro | ~ 0,30 |
| Monel | 0,14 do 0,48 |
| Titan | ~ 0,37 |
| Austenitni Cr-Ni čelik u pasivnom stanju | ~ 0,60 |
| Grafit | ~ 0,70 |
| Zlato | ~ 0,70 |
| Platina | ~ 0,80 |

Teorijski, sprječavanje galvanske korozije moguće je postići izbjegavanjem upotrebe raznorodnih metala u montaži, razdvajanjem različitih metala izolacijskim materijalom ili fizičkim izoliranjem okoline od metalne površine nepropusnim premazom. U stvarnosti, potpuna prevencija galvanske korozije gotovo je nemoguća jer se različiti materijali često moraju koristiti u direktnom kontaktu i izloženi su korozivnoj okolini.

Potpovršinska korozija je okarakterizirana kao stvaranje korozijskog produkta u dubini materijala koji se širi te dolazi do raslojavanja i bubrenja materijala, efekt pod nazivom listanje ili eksfolijacija. U tom procesu korozijski produkt „prisiljava“ metal da se počne odvajati, što dovodi do slojevitog izgleda. Najraširenija je na valjanim metalima koji su u dodiru s morskom vodom i

kiselinama, a treba je razlikovati od napetosne korozije, korozijskog zamora ili vodikove bolesti. Potpovršinska korozija dijeli se na bubrenje i listanje. [7]

Kod bubrenja korozijski produkti imaju veći volumen od volumena razorenog metala (slika 2.20.). Isto vrijedi i za listanje tzv. raslojavanje ili eksfolijaciju najčešće kod aluminija i njegovih legura. Eksfolijacija je oblik interkristalne korozije koja se širi paralelno po granicama zrna na površini, a započinje na zrnima koji su najbliže površini (slika 2.21.). [7]

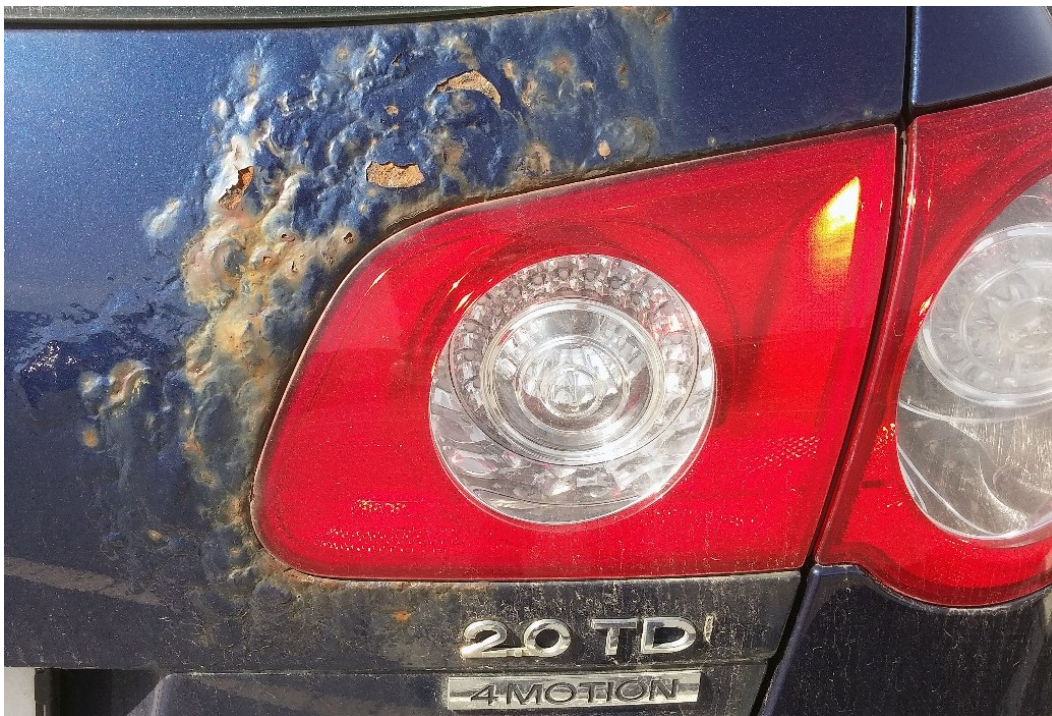


Slika 2.20. Bubrenje čelika [23]



Slika 2.21. Listanje aluminija u avioindustriji [24]

Treći slučaj potpovršinske korozije je filiformna korozija (slika 2.22.). Nastaje ispod tankih organskih prevlaka na čeliku, aluminiju, zrakoplovima izloženim vlažnoj atmosferi, limenkama za piće, automobilima, organskim premazima zavarenih spojeva. Do filiformne korozije dolazi kada je materijal izložen 5% NaCl i vlazi (40% i 80% relativnoj vlažnosti) i zbog različitih mikroklimatskih uvjeta na lokalnom oštećenju prevlaka, što dovodi do pojave članka diferencijalne aeracije. [7, 25]



Slika 2.22. Filiformna korozija na automobilu [26]

Korozija u procijepu je lokalizirana korozija koja nastaje unutar uskih zazora ili ispod zaštićenih metalnih površina istih korozijskih potencijala gdje je slab pristup kisiku. Do korozije u procijepu (slika 2.23.) dolazi u geometrijskim zazorima, na primjer ispod brtvi ili glave vijka, između preklapajućih metalnih limova, unutar navoja vijka itd. Također, korozija u procijepu se može pojaviti ispod naslaga produkta korozije, čestica prašine ili obraslina u morskoj vodi. Difuzija kisika u pukotinama je ograničena, unutar procijepa nalazi se manjak kisika takozvano anodno područje, dok se izvan procijepa nalazi više kisika tj. katodno područje, što rezultira diferencijalnim aeracijskim člankom. [7, 13]

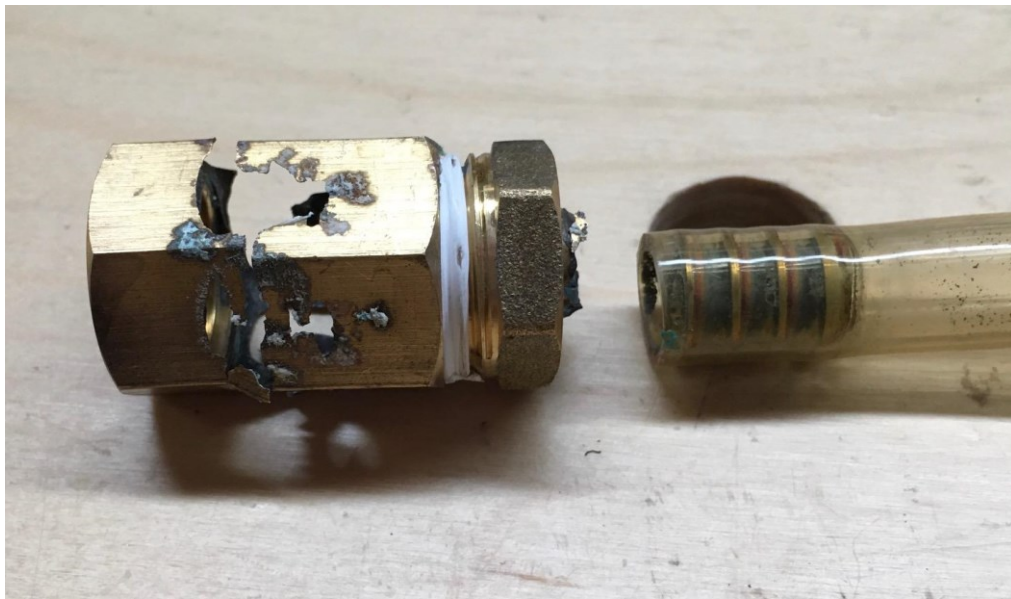


Slika 2.23. Korozija u procjepu ispod brtve na prirubnici od nehrđajućeg čelika [27]

Mehanizam odvijanja korozije u procijepu sastoji se od četiri faze. U prvoj fazi pretpostavlja se da je sastav elektrolita homogen. Korozija se odvija polako na cijeloj površini unutar i van procjepa uz anodno – katodni proces pri čemu se anode nalaze unutar procijepa, a katode izvan. Kao produkt nastaju pozitivni metalni ioni koji su u ravnoteži sa stvaranjem negativnih hidroksid iona. Unutar procijepa dolazi do potrošnje otopljenog kisika, što rezultira manjkom kisika unutar procijepa. S vanjske strane procijepa dostupnost kisika je neograničena pa se neometano odvija katodni proces. Dolazi do prostornog odvajanja za odvijanje anodnog i katodnog procesa. Kao posljedica odvajanja uočava se višak pozitivnih elektro u procijepu što uzrokuje difundiranje negativnih iona iz elektrolita u procijep kako bi se potencijalna energija zadržala na minimumu. U vodi dominira negativni ion, kloridni anion. Posljedično povećanje koncentracije kloridnih iona unutar procijepa rezultira nastankom koncentrirane kisele kloridne otopine koja je vrlo korozivna i proces dalje napreduje autokatalitički, uzrokuje sve korozivniji okoliš unutar procijepa. Osim navedenog načina u procijepu se mogu nastaniti i mikroorganizmi koji su u njemu zaštićeni od nepovoljnih vanjskih uvjeta, što može za posljedicu imati mikrobiološku koroziju. [10, 28]

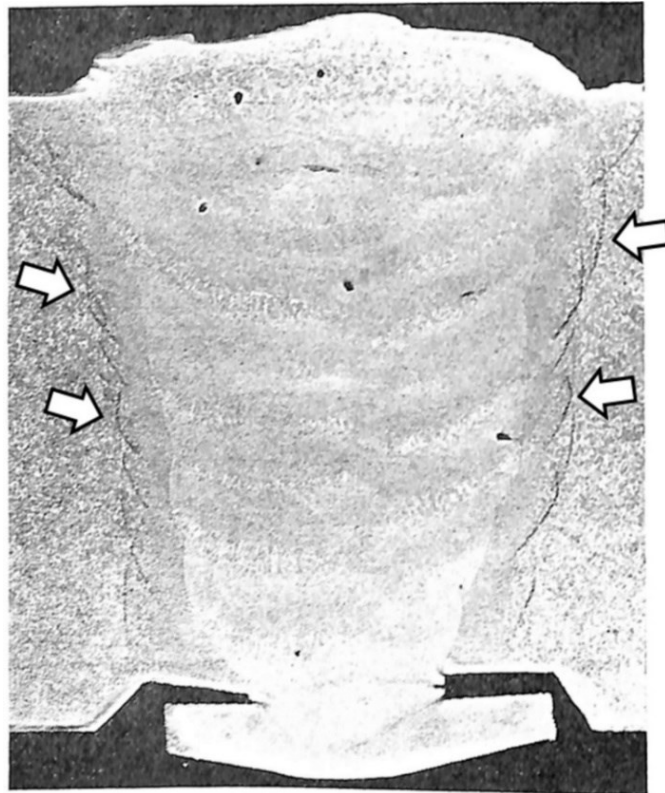
Selektivna korozija je rijedak oblik korozijskog razaranja koji se opaža kod materijala koji su sastavljeni od više komponenti i zahvaća samo jednu komponentu koja je neplemenitija unutar materijala. Može biti općeg i lokalnog karaktera. Najčešći primjeri ovakve vrste korozijskog razaranja su decinkacija i grafitizacija. Pod prisustvom selektivne korozije čvrst i duktilan metal postaje slab i krhak, odnosno postaje podložan lomu.

Decinkacija je proces komponentne selektivne korozije u kojem mjed, legura bakra i cinka (manje od 15 %), gubi cink selektivnim izlučivanjem iz legure ostavljajući poroznu, spužvastu strukturu bogatu bakrom (slika 2.24.). Cink je u leguri aktivniji od bakra tj. elektronegativniji te se lako izlučuje iz mjedi, što dovodi do lošeg mehaničkog svojstva legure. Decinkacija može biti općeg ili lokalnog karaktera koji je povezan s nastankom različitih naslaga ispod kojih se odvija proces otapanja cinka rezultirajući kružnim područjima decinkirane mjedi okružene zdravom legurom. [7, 10]



Slika 2.24. Decinkacija mjedi [29]

Grafitizacija je proces fazne selektivne korozije, najčešće je pojava kod sivog lijeva u kojemu se otapa željezo, pritom ostavljajući krhku i poroznu smjesu inertnog grafita i korozivnog produkta, hrđe (slika 2.25.). Nastaju korozivni članci gdje je grafit katodni članak, dok je neplemenitije željezo, anoda tih članaka. Selektivni oblici korozivnog razaranja vidljivi su i na drugim materijalima npr. oštećenje zavarenog spoja nehrđajućeg Cr-Ni čelika. Na primjer prilikom neispravnog zavarivanja nastaje struktura s količinom od oko 40% delta-ferita, umjesto dozvoljenih 4% – 12%, čiji je produkt korozivni proces koji razara ferit, a on je anoda korozivnog članka. [7, 10]



Slika 2.25. Grafitizacija zavara ugljičnog čelika [30]

Interkristalna korozija je jedan od najopasnijih oblika koja se odvija duž granica zrna, širi se najčešće neprimjetno u dubinu materijala (slika 2.26.). Kao posljedica interkristalne korozije, materijal se raspada i gubi svoju čvrstoću i žilavost, a pretežito se pojavljuje u legurama i povezan je s unosom topline tj. senzibilizacijom npr. kod zavarivanja ili tijekom toplinske obrade. Ovaj oblik korozije može biti uzrokovan nečistoćama na granicama zrna ili stvaranjem kromovih karbida kod austenitnih nehrđajućih Cr-Ni čelika pri temperaturama od 400 do 800 °C prilikom difuzijskih procesa i sklonosti ugljika prema kromu. Nastali spojevi sadrže visoki udio kroma, čak više od 70%, a okruženi su područjima s niskim udjelom kroma, manje od 12%. Na mjestima osiromašenim kromom dolazi do razaranja anodnih područja uz granice zrna, dok su velika područja oko njih katode. [10, 31]



Slika 2.26. Primjer interkristalne korozije [32]

Kako bi se smanjila interkristalna korozija potrebno je smanjiti udio ugljika (*low carbon* čelici s manje od 0,003% ugljika niske čvrstoće) i stabilizirati legiranjem s titanijem ili niobijem jer ugljik ima veliki afinitet prema navedenim kemijskim elementima. Nastaju titanijevi i niobijevi karbidi pri čemu krom ostaje netaknut na razini od 18%. Slabiji oksidativni uvjeti i manjak kiselosti smanjuju pojavu interkristalne korozije. Danas, interkristalna korozija uglavnom nije opasna. [10]

3. METODE ZAŠTITE OD KOROZIJE

Kako bi se izbjegli troškovi, a ponajprije opasnosti koje uzrokuje korozija na elementima, konstrukcijama i objektima potrebno je obratiti pozornost na zaštitu od neželjene korozije. Još od samih početaka konstruiranja, postoji svijest o zaštiti materijala od korozije i njezinom negativnom djelovanju oštećivanja i propadanja konstrukcijskog materijala.

Konstrukcijski materijali uz izvrsna mehanička svojstva i svojstva obradivosti, moraju osiguravati korozijsku otpornost uz što nižu cijenu. U realnom svijetu navedeni zahtjevi za konstrukcijske materijale gotovo je nemoguće postići osim u slučaju nekih visokokorozijskih postojanih metala kao što su nehrđajući čelici, legure nikla itd. Stoga, pribjegava se različitim metodama zaštite od korozije.

Načela metoda zaštite od korozije su [7] :

1. smanjenje ili poništenje uzroka oštećivanja tj. pokretačke sile,
2. povećanje otpora koji se opiru djelovanju te pokretačke sile,
3. promjenom vanjskih čimbenika oštećivanja tj. obilježja medija i fizikalnih okolnosti,
4. promjenom unutarnjih čimbenika oštećivanja tj. obilježja konstrukcijskog materijala,
5. odvajanjem konstrukcijskog materijala od medija.

Temeljne metode za borbu protiv korozije temelje se na poništenju tj. smanjenju kemijskog afiniteta, smanjenju energetske razine sustava i poboljšanju zaštitnih karakteristika korozijskog produkta. Elektrokemijskom korozijom može se sniziti razlika ravnotežnih potencijala anodnog i katodnog procesa povećanjem anodne površine, sprječavanjem prodiranja elektrolita do metalne površine, povišenjem anodne i katodne polarizacije i povećanjem anodne površine. [9]

Temeljne metode zaštite od korozije su preventivnog tipa i uključuju [7, 9]:

1. primjenu korozijskih postojanih materijala,
2. konstrukcijsko-tehnološke mjere,
3. zaštitu prevlakama,
4. elektrokemijsku zaštitu,
5. zaštitu inhibitorima korozije.

3.1. Primjena korozijskih postojanih materijala

Korozijskim postojanim materijalima smatraju se svi oni konstrukcijski materijali koje karakterizira svojstvo površine korozijske otpornosti na djelovanje okolnog medija. Primjena korozijskih postojanih metala je najčešće ekonomična alternativa metoda zaštite od korozije.

Odabir materijala mora biti optimiziran, uzimajući u obzir investicijske i operativne troškove, tako da su troškovi životnog ciklusa (eng. *Life cycle costs*) minimalni, a istovremeno pružaju odgovarajuću sigurnost i pouzdanost. [34]

Svi materijali su podložni koroziji pa čak i oni najplemenitiji kao što su zlato i platina. U tehnici, najplemenitiji korišteni metal je magnezij, može korodirati sporo u suhoj inertnoj atmosferi. Izbor konstrukcijskog materijala ovisi o mehaničkim, termičkim i korozijskim ponašanjem. Korozivno otporniji tehnički materijali su: bakar, aluminij, magnezij, cink, olovo, kositar, željezo, nikal, krom, kobalt, kadmij, srebro, zlato, platina, paladij i iridij. Kako bi se ekonomski opravdao odabir konstrukcijskog materijala najčešće se poseže za nehrđajućim čelicima, legurama aluminija, broncom, mjedi i ostalima. [35]

Štete od korozije najčešće nastaju zbog lošeg odabira materijala. Korozijska otpornost je otpornost materijala na djelovanje okolnog medija, a mjeri se gubitkom mase i volumena, promjenom mehaničkih svojstava tijekom korozijskog djelovanja i opažanjem pojava površinskih oštećenja ili strukturnih promjena u unutrašnjosti presjeka. [7]

Smatra se da je korozijski postojaniji onaj materijal koji je u jednakim vanjskim uvjetima manje intenzivnog razaranja površine ili koji dovodi do manjih promjena u mikrostrukturi i njegovim svojstvima. [7]

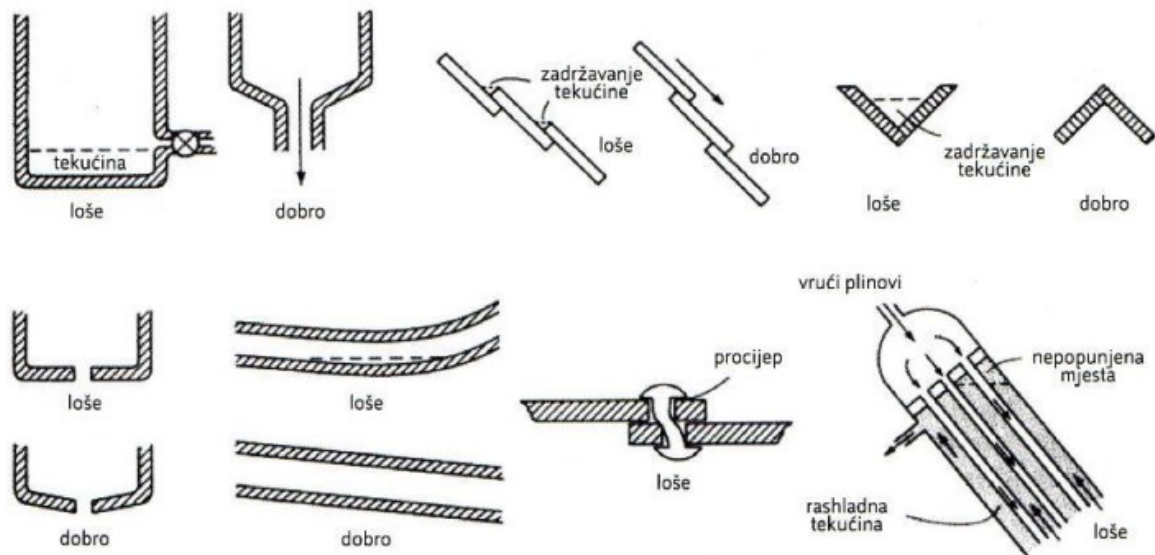
U konstrukciji najzastupljeniji je ugljični čelik takozvani konstrukcijski čelik s udjelom ugljika manjim od 0,6% ili legirani čelik uglavnom s manganom, silicijem, kromom, niklom i volframom. Uporabu pronalazi u izradi čeličnih konstrukcija, dijelova strojeva i različitih uređaja. Da bi čelik bio korozijski postojan mora sadržavati minimalno 12% kroma otopljenog u kristalu mješancu željeza. Pasivacija je sposobnost materijala, u ovom slučaju čelika, za stvaranje površinski tanke i guste zaštitne prevlake. Za potpunu korozijsku postojanost potrebno je da čelik sadrži što veći postotak kroma, a što manji ugljika. [7, 35]

3.2. Konstrukcijsko-tehnološke mjere

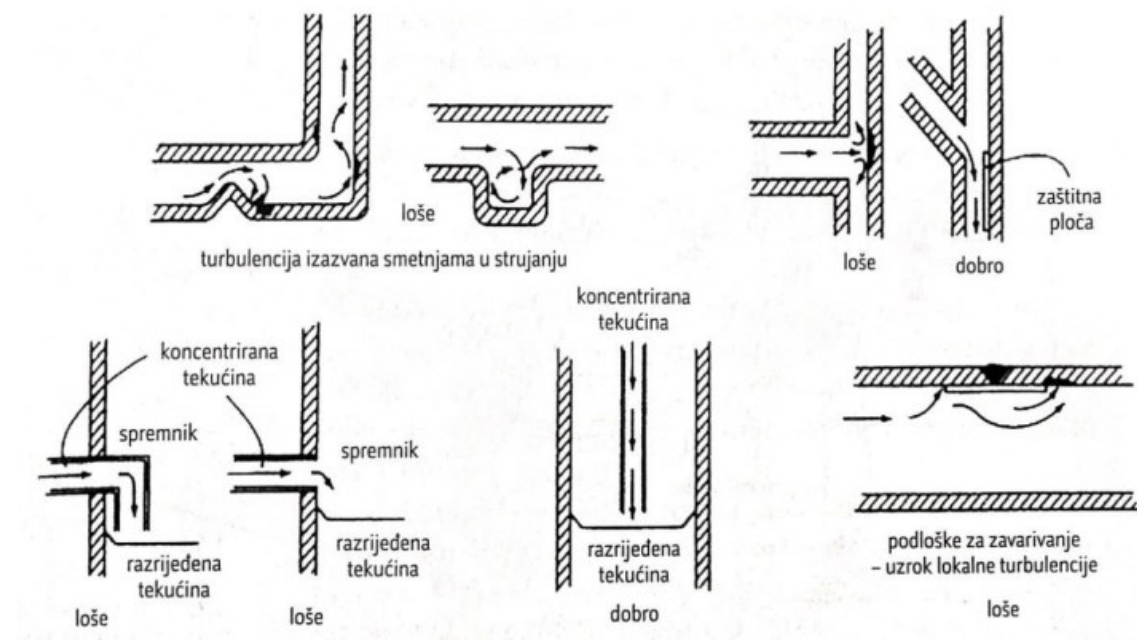
Protiv korozije moguće je boriti se i konstrukcijsko-tehnološkim mjerama, koje imaju izrazito bitnu ulogu u daljnjoj eksploataciji materijala. Od same ideje pa do gotovog proizvoda važno je voditi računa o odabiru materijala i oblikovanju konstrukcije, što uključuje suradnju između konstruktora, tehnologa, ali i želje krajnjeg kupca. Započevši od konstrukcijsko-tehnoloških mjera poduzima se mali, ali značajan korak zaštite od korozije koji može uvelike usporiti korozijski proces i produžiti životni vijek materijala.

Tehnološke mjere koje mogu usporiti pojavu i rast korozije mogu se podijeliti na tri uzročnika. Prvi uzročnik je temperatura odnosno smanjenje temperature elektrolita (niža temperatura - sporija reakcija korozije). Drugi način smanjenja korozije pomoću tehnološke mjere je smanjenje brzine elektrolita. Velika brzina elektrolita pospješuje ubrzanje korozije te se javlja jaka erozijska i kavitacijska korozija. Nehrđajući čelici su izuzetak, pri većoj brzini elektrolita su otporniji i korodiraju u stagnirajućim uvjetima. Također, od velike važnosti je smanjenje koncentracije agresivnih plinova koji se nalaze u radnoj okolini i uklanjanje zraka tzv. deareacija, s kojom se uklanja kisik iz radnih fluida. [7, 33]

Kod konstrukcijskih mjera ima mnogo opcija koje se mogu primijeniti za zaštitu od korozije. Potrebno je oblikovati konstrukciju što jednostavnije npr. umjesto oštih rubova i bridova potrebno je napraviti skošenja zbog lakšeg čišćenja i povećanja kvalitete zaštitnih prevlaka. Spremnike je potrebno podići iznad tla jer se time postiže smanjenje nakupljanja vlage. Najčešći uzrok nastanka korozije u eksploataciji je nakupljanje i zadržavanje vode, kao i zadržavanje vlage u procijepima koja potiče korozijski proces. Čelični profili, prilikom korištenja, se trebaju postaviti tako da se u njima ne može zadržavati voda. Ukoliko to nije moguće, potrebno je napraviti prostor za otjecanje vode, ako to konstrukcija dozvoljava. Cjevovode je potrebno projektirati tako da osiguravaju neometano protjecanje vode bez zadržavanja. Kako bi se povećala čvrstoća i nosivost potrebno je zavariti rebra za ojačanje. Ukoliko su krivo projektirane mogu dovesti do nakupljanja vode što rezultira korozijom. Najpoželjnije je, ukoliko je moguće, izostaviti procijepe koji su podložni „provlačenju“ vode i vlage koja inicira koroziju u procijepu. Na primjer, poželjno je izbjegavati diskontinuirane zavarene spojeve. Zavareni spojevi imaju prednost nad vijčanim ili zakovičnim spojevima, smanjuju masu konstrukcije i onemogućuju koroziju u procijepu. Bitna konstrukcijska metoda je izbjegavanje pojave galvanske korozije, spajanjem metala što sličnijeg stupnja plemenitosti. Na slikama 3.1. i 3.2. su prikazane tehnološko-konstrukcijske mjere pri zaštiti od korozije. [7, 33]



Slika 3.1. Konstrukcijsko-tehnološke mjere [9]



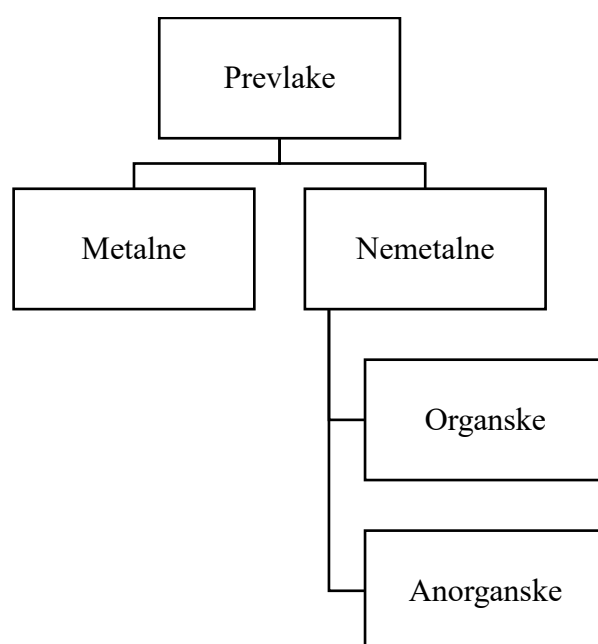
Slika 3.2. Konstrukcijsko-tehnološke mjere oblikovanja uz prisutnost strujanja fluida [9]

Neki od praktičnih primjera zaštite su:

1. izbjegavati kombinacije različitih metala, ako se nalaze u promjenljivoj okolini,
2. izbjegavati situacije s malim anodama i velikim katodama,
3. izolirati spojene materijale od okoline,
4. smanjiti agresivnost okoline dodavanjem inhibitora,
5. Koristiti katodnu zaštitu sa žrtvujućom anodom.

3.3. Zaštite prevlakama

Prevlake prilagođene za zaštitu od korozije metalnih materijala su od najveće važnosti kako bi se osigurala pouzdanost i dugotrajnost učinka obloženih dijelova, a spada pod najraširenije proizvode za zaštitu od korozije. Prevlake služe kao barijera između agresivnog medija i materijala, zaštita od mehaničkog trošenja i na kraju, imaju dekorativnu ulogu. Proces prevlačenja uključuje nanošenje tankog filma funkcionalnog materijala na podlogu koja se želi zaštititi. Osnovna podjela prevlaka je na metalne i nemetalne, a nemetalne se dalje dijele na organske i anorganske prevlake (slika 3.3.).



Slika 3.3. Podjela prevlaka

3.3.1. Metalne prevlake

Metalne prevlake mogu se podijeliti na one koje pružaju zaštitnu barijeru (plemenitije su od podloge) i žrtvene prevlake od osnovnih metala koji osiguravaju zaštitu galvanskim djelovanjem. Metalne prevlake su učinkovite jedino u slučaju kada je prevlaka bez pora ili oštećenja, a defekti u metalnoj prevlaci mogu uzrokovati ozbiljna oštećenja podloge. Tri osnovna načina nanošenja metalnih prevlaka su vruće prskanje, vruće uranjanje i galvanizacija. [36]

Vruće prskanje (slika 3.4.) poznato kao metalno prskanje ili kao metalizacija uključuje raspršivanje zagrijanih ili rastaljenih čestica iz specifično dizajnirane mlaznice na pripremljenu

površinu. Metal koji se koristi za prevlake može biti u obliku žice ili praha koji se tali pomoću plinskog plamenika ili električnog luka. [36]



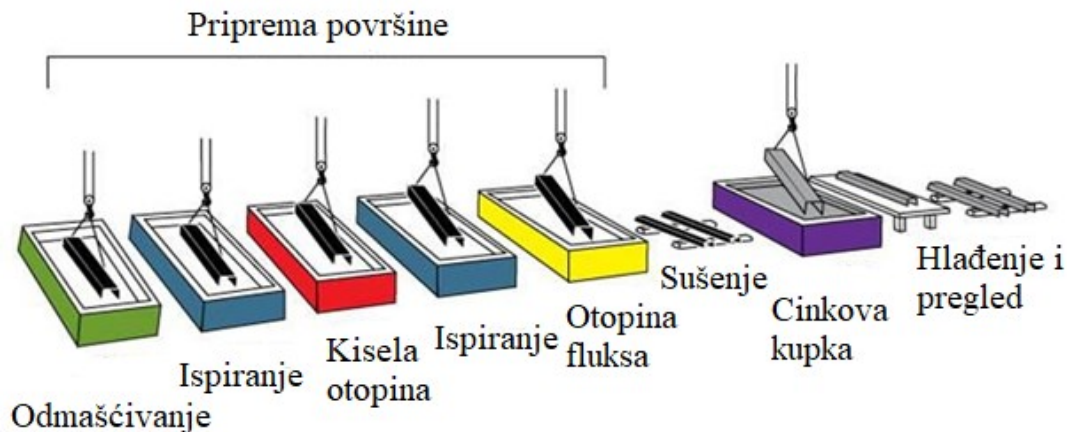
Slika 3.4. Primjer vrućeg prskanja [38]

Najstarija metoda prskanja je s plinskim plamenikom, gdje toplina izgaranja oksid-acetilena topi žicu, a čestice se raspršuju pomoću struje komprimiranog zraka. Materijali od kojih se rade žice su cink i aluminij. Ovaj proces nanošenja prevlaka je relativno jeftin i prenosiv što mu daje široku upotrebu u praksi, ali prevlake pokazuju slabiju čvrstoću veze i veću poroznost. Prevlake odlično prijanjaju i visoke su kohezivne čvrstoće i proces je vrlo učinkovit zbog visokih temperatura u luku. [36]

U elektro-lučnom prskanju koriste se dvije žice metala s kojima se oblaže površina, a služe kao elektrode koje se zajedno „napajaju“ i između njih se stvara luk. Komprimirani zrak raspuhuje rastaljeni materijal s vrha žica stvarajući mlaz rastaljenih metalnih kapljica koje se talože na površini. Površina se prije vrućeg prskanja mora pripremiti pjeskarenjem pomoću prikladnog abraziva te osušiti. Priprema se provodi prema ISO 2063 standardu. [36]

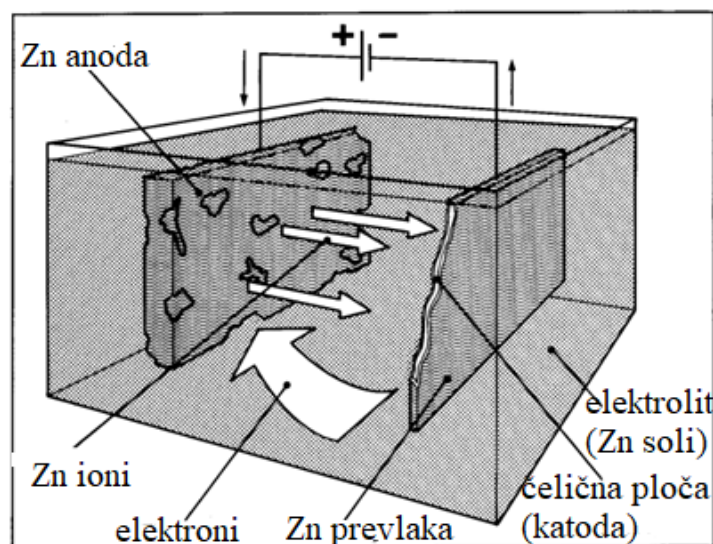
Vruće uranjanje ima veliki popis prednosti, uključuje mogućnost prevlačenja rubova i nedostupnih mjesta, visoku otpornost na mehanička oštećenja i niske cijene. Proces vrućeg uranjanja ovisi o predmetu koji se oblaže, ali bilo da se radi o malim predmetima kao što su vijci ili matice pa sve

do velikih čeličnih konstrukcija proces je približno sličan. Materijal se prvo odmašćuje i ispiru sumpornom ili klorovodičnom kiselinom što prethodi čišćenju vodom. Drugi korak je njegovo žarenje i hlađenje u atmosferi bez oksida. Kada se temperatura obratka smanji na temperaturu kupke otopljenog cinka koja je na temperaturi od 445 do 465 °C, obradak se uranja u kupku. Nakon određenog vremena, obradak se uklanja iz kupke za pocinčavanje, a višak cinka se može ukloniti brisanjem ili centrifugiranjem i na kraju se pregleda (slika 3.5.). [36, 38]



Slika 3.5. Proces vrućeg uranjanja [39]

Galvanizacija je elektrokemijsko nanošenje materijala koji je vrlo otporan na koroziju. Ova tehnika zaštite koristi se za prevlačenje cinka preko željeza i čelika (slika 3.6.). Navedena metoda je vrlo popularna i široko prihvaćena zbog svoje ekonomičnosti i primarno učinkovitosti. Proces taloženja događa se u „bazenu“ koji se sastoji od anode i katode uronjenih u elektrolitu, vodenu otopinu cinkove soli, i koristi se niski vanjski napon (40 V). Omogućuje se prijelaz iona cinka s anode na katodu te slijedi taloženje u obliku filma cinka. Anoda je obično šipka, oblika valjka, od cinka koja se naziva topiva anoda. Cink anoda se otapa kao rezultat apliciranja napona brzinom približno jednakom brzini taloženja čime se cink „lijepi“ na elektrolit. [40]



Slika 3.6. Proces elektrodepozicije cinka – galvanizacija [40]

3.3.2. Nemetalne prevlake

Nemetalne prevlake dijele se na organske i anorganske. Organske prevlake su često tekuće ili praškaste boje koje zahtijevaju nekoliko slojeva kako bi se postigao dovoljno debeli sloj premaza za dobru otpornost od korozije. Organski premazi temelje se na materijalima koji sadrže ugljik, a dobivaju se iz rafiniranih ili modificiranih naftnih derivata kao i na raznim otapalima na bazi vode, pigmentima i aditivima. U industrijskoj primjeni najčešće se koriste poliuretanske, epoksilne, alkidne i poliesterske prevlake. [41]

Poliuretanski premazi obogaćeni su specijalnim aditivima, a karakterizira ih iznimna otpornost na koroziju, kemikalije, abraziju i vremenske uvjete. Zbog multifunkcionalnosti, poliuretanske prevlake koriste se kao temeljni premazi, međusloj i kao završni premaz ovisno o potrebama primjene. [41]

Epoksilni premazi obuhvaćaju široku skupinu proizvoda za premazivanje, a ističu se izvrsnim filmskim, mehaničkim i kemijskim svojstvima. Premazi na bazi epoksida prijanjaju na različite površine što im daje široku upotrebu u zaštiti od habanja, korozije, vlage, vode, goriva i kemikalija, neoksidirajućih kiselina, lužina i soli. Najveći negativni faktor epoksi premaza je loš utjecaj sunčeve svjetlosti na premaz. [41]

Alkidni premazi primjenjivi su na podlogama u različitim uvjetima okruženja. Uglavnom se koriste u dekorativne svrhe i za zaštitu čelika izloženog blagim uvjetima okoline. Koriste kisik koji se raspršuje kroz film boje pa im je potrebno dulje vrijeme sušenja u usporedbi s drugim premazima. [41]

Poliesterski premazi dominiraju u upotrebi kao organski premazi. Postoji gotovo beskonačan broj mogućih poliestera koji se mogu koristiti. Varijacije u funkcionalnosti i molekularnoj masi omogućuju da temeljni i završni premazi imaju visoku otpornost na koroziju i postojanost na UV svjetlost i vlažnost. [41]

Anorganske nemetalne prevlake nanose se mehaničkim (prevlake emajla, betona, cementa) i kemijskim (nitridne, fosfatne, oksidne i kromatne prevlake) načinom. Pod mehaničkim načinom nanošenja ubrajaju se emajliranje i betoniranje/cementiranje.

Emajliranje je postupak zaštite od korozije pomoću borosilikatnog stakla na niskouglični čelik, a osim korozijske zaštite služi i kao dekoracija (slika 3.7.). Ima dobru otpornost na kiseline, organska otapala, na habanje i na zagrijavanje do 600 °C, ali slabu otpornost na lužine. Odličan je izolator, bez okusa i mirisa. Glavna slabost emajla je velika krhkost. Sirovina za email sastoji se od kombinacije materijala kao što su silicij, feldšpat, soda i boraks s pigmentima u boji i stabilizatorima. Kemikalije se zajedno rastope na 1200 do 1300 °C, a slijedi hlađenje u vodi ili drobljenje među valjcima. Mješavina je spoj vode, gline i natrijevog silikata u viskoznom stanju, a onda se nanosi na površinu prskanjem ili uranjanjem. Uobičajeni proces je nanošenje dva sloja emajla. [36]



Slika 3.7. Emajlirani otpornik [42]

Cementiranje / betoniranje obično se koristi kao prevlaka na cijevima (slika 3.8.). Cementni premazi imaju niz funkcija uključujući zaštitu od mehaničkih oštećenja i korozije, kao i balastiranje u morskoj vodi. Premazi su niskih troškova, a velika prednost je koeficijent ekspanzije sličan čeliku. Ukoliko dođe do oštećenja premaza lako se može reparirati, a nanose se raspršivanjem, gletanjem, lijevanjem u kalupe ili centrifugalnim lijevanjem ukoliko se želi cementirati unutrašnjost cijevi. Debljina sloja varira od 5 do 25 mm i više, ali se u tom slučaju mora ojačati žičanom mrežom. [36]



Slika 3.8. Prikaz cementiranja cijevi [43]

3.4. Elektrokemijska zaštita

Elektrokemijskoj zaštiti se pribjegava ukoliko je nemoguće zaštititi i održavati materijal premazima, a primjenjuje se za metalne konstrukcije koje se nalaze u agresivnoj okolini. Elektrokemijska zaštita najviše se koristi za zaštitu uronjenih, ukopanih ili teško dostupnih konstrukcija. Dijeli se na katodnu i anodnu zaštitu s obzirom na način polarizacije. Anodnom zaštitom se povećava elektrodni potencijal metala sve dok ne dođe do pasivnog stanja, a katodnom zaštitom se metalu smanjuje elektrodni potencijal što dovodi do imunog stanja.

3.4.1. Katodna zaštita

Katodna zaštita je uz zaštitu premazima najzastupljenija metoda zaštite od korozije uronjenih i ukopanih konstrukcija. U kombinaciji premaza i katodne zaštite, dobivaju se najbolji rezultati, jer premaz odvaja materijal od okoline, a katodna zaštita poništava tendenciju metala prema koroziji. Katodna zaštita smanjuje tendenciju materijala ka koroziji minimiziranjem razlike u potencijalu između anode i katode. [33, 44]

Elektrokemijska zaštita od korozije dijeli se na dvije metode:

1. zaštita žrtvujućom anodom (protektorima),
2. zaštita s vanjskim izvorom struje.

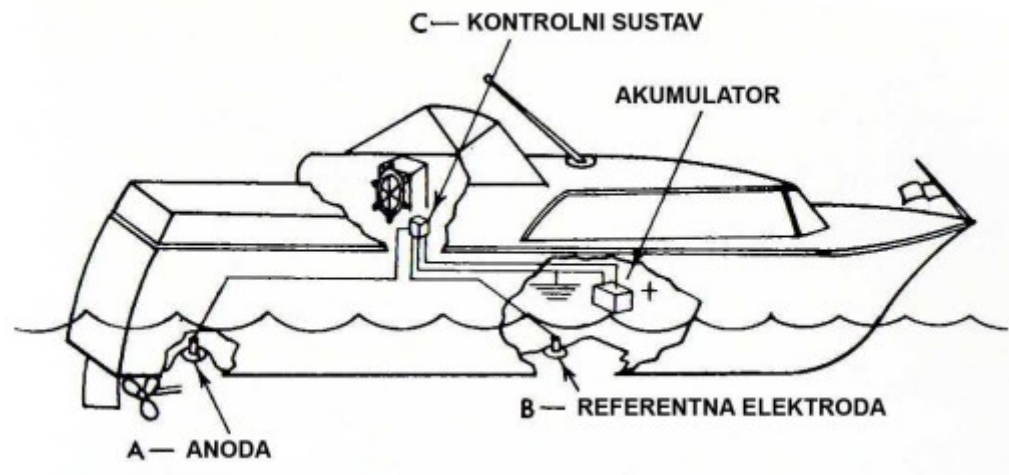
Žrtvujuće anode tj. protektori su visoko aktivni metali koji se koriste za sprječavanje nastanka korozije na metalnoj površini. Izrađene su od metalne legure s negativnijim elektrokemijskim potencijalom od površine metala kojoj služi kao zaštita. Žrtvujuća anoda se trošiti umjesto metala kojeg štiti iz čega proizlazi sam naziv metode. Materijali koji se koriste za žrtvujuće anode su cink i magnezij ili legure magnezija i aluminijske koje su posebno razvijene za tu svrhu i koriste se u brodogradnji (slika 3.9.). Anode napravljene od aluminijske imaju dulji životni vijek zbog kapaciteta od 2833 Ah/kg, dok je kapacitet cinka 738 Ah/kg. U slanoj vodi najmanje se koriste anode od magnezija, njezin kapacitet je 1100 Ah/kg. Konstrukcija se spaja u galvanski članak s elektrodom materijala koji je elektronegativniji nego što je sama konstrukcija. Na konstrukciji se uspostavlja električni potencijal, dok se anoda otapa što rezultira katodnom reakcijom. Žrtvujuće anode spadaju u ekonomične zaštite od korozije, ali imaju ograničeni vijek trajanja i teško je predvidjeti tijekom trošenja. [33, 44]



Slika 3.9. Žrtvujuća anoda [45]

Drugi način zaštite od korozije pomoću elektrokemijske zaštite je zaštita vanjskim izvorom struje ili zaštita narinutom strujom. (slika 3.10.) Primjenu katodne zaštite narinutom strujom moguće je vidjeti na velikim nepomičnim konstrukcijama koja se nalaze u okolišu slabije vodljivosti. Osim na nepomičnim konstrukcijama ima svoju ulogu i na brodovima. Plus pol se spaja na korozijski stabilne anode koje se ugrađuju u oplatu broda, a za minus pol izvora istosmjerne struje uzima se trup broda. Struja i napon nisu konstantni već se mijenjaju ovisno o salinitetu morske vode, veličini i brzini broda, položaju anoda i udjelu oštećene površine zaštitnih premaza. Sustav zaštite narinutom strujom ima svoje nedostatke i prednosti. Nedostaci su visoki početni troškovi i ukoliko

se krivo spoji sustav uzrokuje intenzivno oštećivanje broskog trupa, a ukoliko se ne prilagodi struja tj. prejaka je, oštećuju se zaštitni premazi. Prednost narinute struje je visoka pouzdanosti, mogućnost regulacije parametara i minimalni zahtjevi održavanja za razliku od žrtvujućih anoda. [33, 44]



Slika 3.10. Primjer katodne zaštite broda narinutom strujom [44]

3.4.2. Anodna zaštita

Anodna zaštita temelji se na činjenici da u određenom rasponu potencijala, metal ili legura može postati pasivan što rezultira smanjenjem korozijskog potencijala. Anodna zaštita funkcionira samo u slučaju metala koji proizvode pasivni film kao što su željezo, krom, titan, nehrđajući čelici, nikal, aluminij i njihove legure u otopinama nitrata i sulfata. Provodi se na način da se poveća potencijal metala tako što će se dovesti u pasivno stanje. Postiže se žrtvujućim katodama ili vanjskim izvorom struje. Nedostaci anodne zaštite su skupa instalacija i materijal koji je sklon pasivaciji, a prednosti su mala gustoća struje i smanjenje brzine rasta korozije. [7, 46]

3.5. Zaštita inhibitorima

Inhibitori su tvari organskog ili anorganskog podrijetla, a definiraju se kao kemijska tvar koja usporava koroziju kada se doda u okoliš u maloj koncentraciji, bez značajne promjene koncentracije bilo kojeg drugog korozivnog sredstva. Preduvjet koji mora biti zadovoljen za kontrolu korozije je da se kemikalija apsorbira na korodirajućoj površini bilo u obliku molekule ili u obliku iona (anioni i kationi). Pomoću inhibitora brzina korozije se smanjuje do 0,1 mm/god.

Prema mehanizmu djelovanja inhibitora dijele se na one koji proizvode ili olakšavaju stvaranje tankog zaštitnog filma ili sloj korozivnog produkta, odnosno barijere između metalne površine i okoline. Također, prema mehanizmu djelovanja postoje i inhibitori koji smanjuju disocijaciju iona u korozivnoj otopini (smanjivanje toka korozije). [7, 47]

Inhibitori se dijele na [7]:

1. anodne,
2. katodne,
3. mješovite,
4. hlapive.

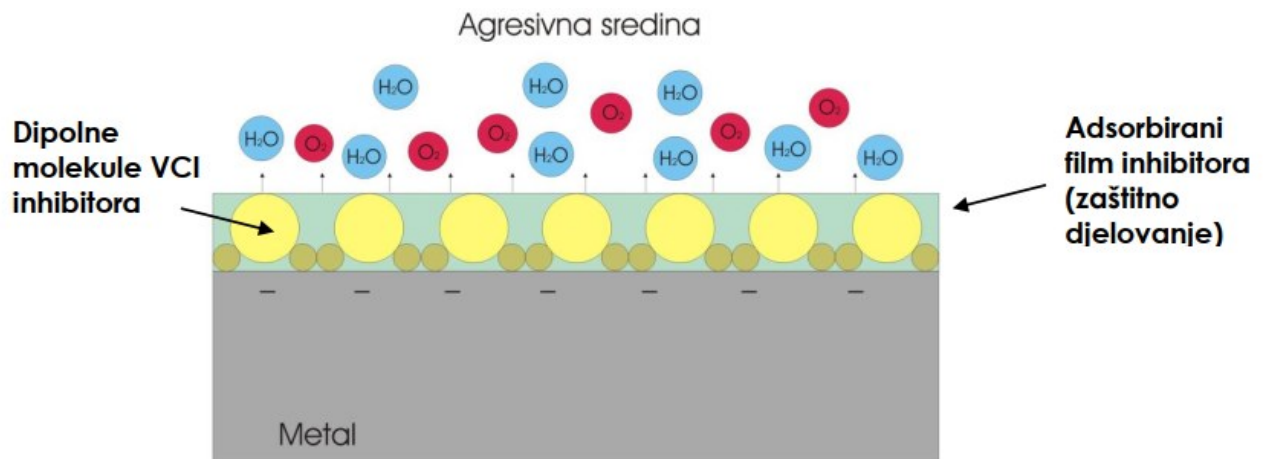
Anodni inhibitori su kemijske tvari koje tvore zaštitni sloj oksidnog filma na površini metala, uzrokujući otpornost na koroziju. Mijenjaju anodne reakcije u kemijskoj ćeliji, „tjerajući“ metalnu površinu u pasivizirajuće stanje. Anodni inhibitori su poznati kao i pasivatori. U elektrokemijskoj ćeliji, anodni inhibitori blokiraju anodna mjesta. Blokiranje anodnih mjesta ovisi o koncentraciji inhibitora. Kada je inhibitor u niskim koncentracijama, inhibitor prvo blokira slabe anode i nastaje zaštitni film. Ukoliko je koncentracija anodnih inhibitora veća, stvara se pasivni sloj koji usporava koroziju.

Katodni inhibitori djeluju po principu zaustavljanja katodne reakcije tj. reduciraju vodik ili kisik ili djeluju kao taložni inhibitori, stvarajući na katodama netopljive produkte. Cinkove i kalijeve soli koriste se kao katodni taložni inhibitori u lužnatim, neutralnim i slabo kiselim otopinama u kojima katodna reakcija korozivnog procesa reducira kisik iz zraka. Prilikom kiselinskog čišćenja uređaja i postrojenja koriste se inhibitori koji povećavaju prednapon redukcije vodikovih iona i izlučivanja vodika. [47]

Mješoviti inhibitori, istodobno inhibiraju i anodno i katodno odnosno usporavaju anodnu i katodnu reakciju. Najpoznatiji primjeri mješovitih inhibitora su: škrob, želatina, agar-agar, tanin i K-glukonat. Osim navedenih primjera ovoj skupini se pridružuju derivati acetilena, amini (spojevi s dušikom) i nitrati (njihove soli), tioalkoholi, sulfidi, spojevi sa sumporom i derivati acetilena. Mješoviti inhibitori su organski spojevi koji se apsorbiraju na metalnu površinu na kojoj tvore spojeve u obliku monomolekulskih filmova. [47, 48]

Hlapivi inhibitori su specijalna skupina organskih inhibitora za zaštitu metala od atmosfere korozije. Kako bi napravili nekorozivni okolni zrak ili neki drugi plin, djeluju na principu sublimacije (pretvorba iz krutog u plinovito stanje) pomoću niskog tlaka. Koriste se dva načina zaštite hlapivim inhibitorima, a to su u obliku praha ili pomoću papira koji je natopljen alkoholnom

otopinom. Hlapivi inhibitori isparavanjem putuju ka metalnoj površini na kojoj se kondenzira i stvara tanki ravnomjerno raspodijeljeni monomolekularni film. Molekule u organskim inhibitorima imaju pozitivan i negativan dio molekule. Pozitivni dio molekule veže se za površinu, a negativni dio je okrenut prema okolini i odbija kisik i vodu od metala (slika 3.11.). Kako bi se konstantno održalo postojanje sloja potrebno ga je pravovremeno nadomještati daljnjom kondenzacijom pare. [7, 47, 48]



Slika 3.11. Mehanizam djelovanja hlapivog inhibitora [48]

4. O ZAVARIVANJU

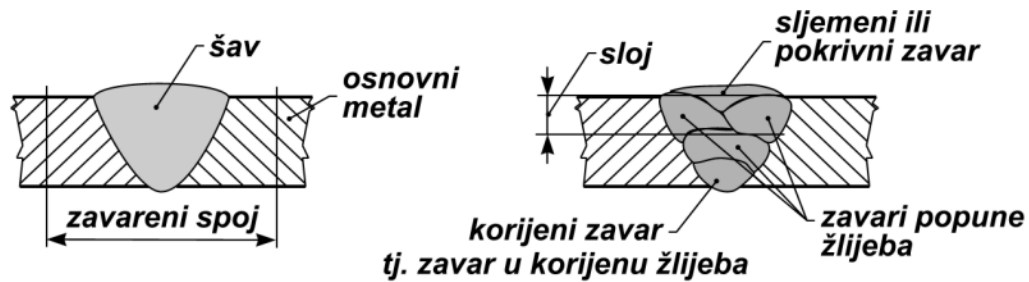
Zavarivanje je proces dobivanja trajnog/nerastavljivog spoja, obično metala ili termoplastike, uz lokalno ili šire zagrijavanje spojnih mjesta, a spajaju se staljivanjem uz ili bez dodavanja dodatnog materijala kako bi se dobio homogeni spoj. Osim zagrijavanja, često se primjenjuje i metoda spajanja povećanjem tlaka tj. pritiska. Zavarivanje je interdisciplinarna tehnologija. Kako bi se pravilno izvelo zavarivanje potrebno je poznavati znanost o materijalima i metalurgiji, termodinamici, kemiji, elektrotehnici i informatici. Za zavarene spojeve u konstrukciji može se reći krilatica: „Lanac je toliko jak koliko je jaka najslabija karika lanca“ jer su oni obično najslabije mjesto u konstrukciji.

4.1. Osnovni pojmovi

Žlijeb je obrađeni ili neobrađeni rubni dio osnovnog metala na kojemu će se vršiti spajanje zavarivanjem. Oblik i dimenzija žlijeba ovise o debljini elementa koji se zavaruje, postupku zavarivanja, vrsti i namjeni spoja i položaju zavarivanja. Priprema žljebova za zavarivanje izvodi se mehaničkom obradom ili raznim postupcima rezanja. Najčešće se koristi rezanje plinskim plamenom, plazmatskim lukom, laserskim snopom, električno rezanje ugljenom ili šupljom čeličnom elektrodom. Mješavina plinova koja se koristi kod rezanja plamenom je najčešće kombinacija kisika i acetilena ili butana. Za mehaničku obradu pripreme žljebova potrebni su posebni strojevi i prikladni alati. Rezanje i pripremu rubova moguće je izvesti ručno ili strojno ovisno o potrebi. [49]

Zavareni spoj je nerastavljivi spoj koji nastaje spajanjem rubnih dijelova (zavarivanjem), a obuhvaća skrućeni dio metala šava koji je nastao taljenjem i rubnih dijelova zavarenih komada.

Zavareni spoj se sastoji od šava, a šav je dio zavarenog spoja koji je nastao taljenjem osnovnog metala ili taljenjem dodatnog materijala i osnovnog metala u jednom ili više prolaza. Šav koji se sastoji od više zavara može sadržavati korijeni zavar, zavar popune žlijeba, pokrovni ili sljemeni zavar i završni ili pokrivni korijeni zavar ukoliko je to potrebno (slika 4.1.).

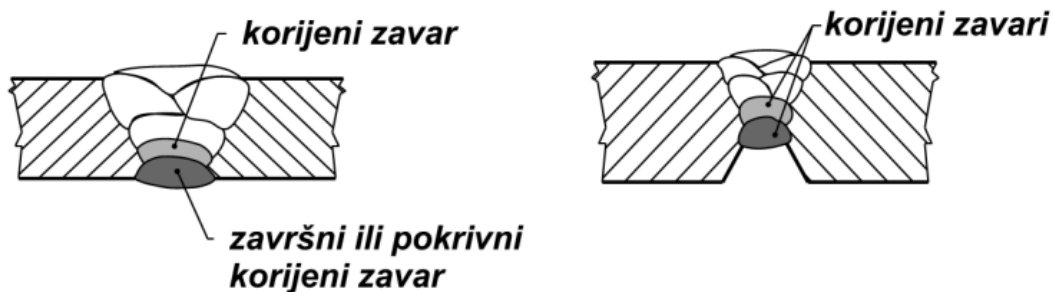


Slika 4.1. Prikaz skice zavarenog spoja s elementima [49]

Zavar je dio šava koji je nastao prilikom jednog prolaska zavarivanja, a sloj čini jedan ili više zavara u dijelu šava.

Korijeni zavar je zavar koji se nalazi u korijenu žlijeba, dok je završni ili pokrivni korijeni zavar položen sa strane naličja šava, nakon žlijebljena korijenog zavara.

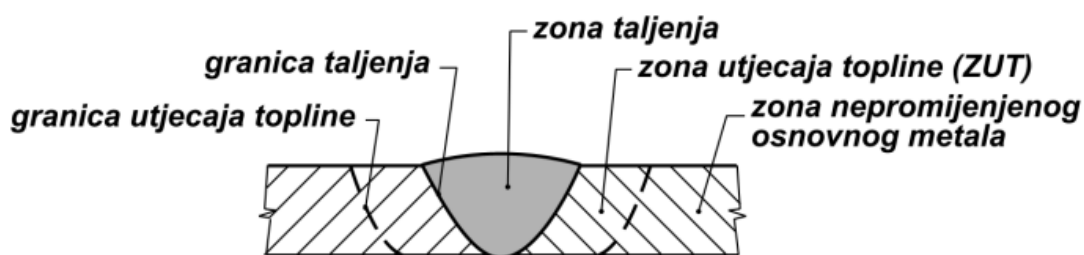
Zavari popune žlijeba slijede nakon korijenog zavara, a svrha im je ispunjavanje žlijeba te formiranje šava. Kao završni zavar, zavaruje se sljemeni ili pokrivni zavar na strani otvora žlijeba (slika 4.2.). [49]



Slika 4.2. Prikaz korijenog i završnog / pokrovnog zavara [49]

Struktura zavarenog spoja dijeli se na karakteristične zone (slika 4.3.):

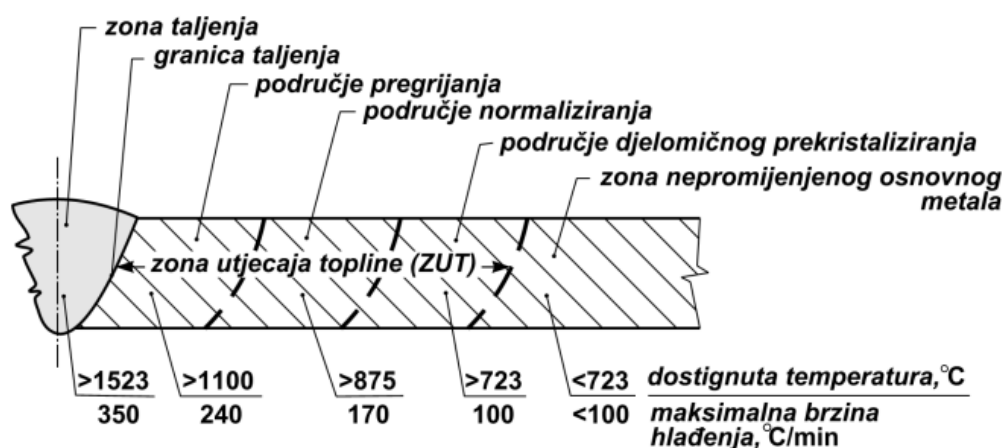
1. zona taljenja,
2. zona utjecaja topline (ZUT),
3. zona nepromijenjenog osnovnog metala.



Slika 4.3. Struktura zavarenog spoja [49]

Zona taljenja je područje zavarenog spoja koji se nalazi u granicama taljenja u kojem se osnovni metal u potpunosti istali. U zoni taljenja postižu se izrazito visoke temperature, metalurška struktura ovisi o izvođenju zavarivanja, a hlađenje metala ima najdulji vijek. Struktura u zoni taljenja sastoji se od krupnih zrna, a ukoliko se radi višeslojno zavarivanje struktura se normalizira na sitnozrnatu. [49, 55]

Zona utjecaja topline (ZUT) smjestila se izvan granica taljenja na rubnim dijelovima osnovnog metala. Dolazi do značajnih promjena u strukturi osnovnog metala zbog utjecaja povišenih temperatura, što dovodi do promjene u mehaničkim i drugim svojstvima zavarenog spoja. Svojstva metala u zoni utjecaja topline izrazito su važna nakon izvođenja zavara jer se smatra slabijom zonom, odnosno, najčešće je područje gdje dolazi do pojave loma kada je zavareni metal pod utjecajem velikih opterećenja. Zbog raznolikosti u samoj strukturi, zona utjecaja topline može se podijeliti na četiri područja, a to su: pregrijanja, normaliziranja, djelomičnog prekrystaliziranja i područje nepromijenjenog osnovnog metala (slika 4.4.). [50, 55]



Slika 4.4. Podzone u zoni utjecaja topline [49]

Mehanička svojstva zavarenog spoja u zoni utjecaja topline ovisit će o karakteristikama spoja npr. položaju spoja, debljini spoja, o unosu topline i prethodnoj toplinskoj obradi prije zavarivanja, ukoliko se primjenjuje. Mikrostrukturalne promjene u zoni utjecaja topline ovise o razini toplinske izloženosti i variraju o udaljenosti od zavara. Visoki unos topline povećava veličinu zone utjecaja topline što rezultira niskom udarnom čvrstoćom. [54]

Zonu utjecaja topline može se sumirati na kritičnu zonu u spoju zbog čega je potrebno kontrolirati njegove učinke, heterogena je zona i može se podijeliti na različite podzone, postoji mnogo mogućih metalurških reakcija u ZUT-u, a mikroskopska i mehanička svojstva ovise o toplini tijekom zavarivanja. [54]

4.2. Podjela postupaka zavarivanja

Postoje različite metode podjele kada je riječ o metodama i postupcima zavarivanja. Prema IIS/IIW (Međunarodni institut za zavarivanje) postupci zavarivanja podijeljeni su prema načinu prijenosa energije, a zavarivanje se dijeli na [49]:

1. plinskim plamenom,
2. električnim lukom,
3. energetske tokom velike gustoće,
4. mehaničkim djelovanjem,
5. prolaskom električne struje,
6. raznim načinima gdje nije moguće klasificirati nositelja energije (lemljenje, difuzijsko spajanje i drugi).

Konvencionalna podjela zavarivanja svodi se na dvije osnovne skupine [49]:

1. postupci zavarivanja uz djelovanje pritiska,
2. postupci zavarivanja taljenjem.

Zavarivanje uz djelovanje pritiska je način spajanja metala u čvrstom stanju pomoću mehaničkog pritiska bilo trenja ili eksplozije za zagrijavanje, obično bez ili uz minimalno lokalno zagrijavanje i uglavnom bez dodatnog materijala. Generalna podjela zavarivanja uz trenje je na kovačko, elektrootporno, elektroindukcijsko, eksplozijsko i zavarivanje trenjem. [49,50]

Kovačko zavarivanje je postupak zavarivanja u kojemu se dijelovi zagriju na temperaturu između 1200 i 1400 °C, jedan dio se prislanja na drugi i udarcima čekića dolazi do spajanja. Postupak se

rijetko primjenjuje zbog sporog zavarivanja i teških uvjeta rada, a u strojarstvu i brodogradnji se gotovo i ne koristi. [49]

Elektrootporno zavarivanje je zavarivanje spajanja metala primjenom pritiska elektroda i prolaskom električne struje. Spoj nastaje na mjestima dodira dva komada metala. Elektrode su najčešće od legure na bazi bakra, a struja koja se koristi je izmjenična, niskog napona, kratkog trajanja i velike jakosti. Strojevi za elektrootporno zavarivanje koriste se u automobilskoj i svemirskoj industriji. Proces je automatiziran, ima mogućnost za upotrebu u masovnoj proizvodnji uz jednostavno robotiziranje. Ovim načinom zavarivanja moguće je zavarivati šavno, točkasto i bradavičasto. [49, 51]

Elektroindukcijsko zavarivanje koristi visokofrekventnu električnu struju i indukcijsku zavojnicu kako bi zavarivao metal. Visokofrekventna struja stvara izrazito jako magnetsko polje i teče putem najniže induktivnosti. Na mjestu najmanje zračnosti stvara se najgušći magnetski tok silnica što rezultira velikim zagrijavanjem na tom mjestu. Prilikom zagrijavanja dolazi do lokalnog taljenja te uz pritisak dolazi do spajanja metala. Svoju primjenu pronalazi u izradi šavnih cijevi, konstrukcijskih profila i izmjenjivača topline. [49]

Eksplozijsko zavarivanje se koristi za spajanje čelika, aluminijskog, cinka, bakra, titanija i raznorodnih materijala na teško pristupnim mjestima i neprikladnim uvjetima. Prilikom eksplozije stvara se eksplozijski val koji se širi brzinom većom od brzine zvuka koji pritom „izbacuje“ nečistoće s površina i površinski sloj oksida. Nedostatak ove metode je dugotrajna priprema, ali sam postupak zavarivanja je vrlo brz. Prednost je zavarivanje bimetalnih konstrukcija i primjenjiv je na limove mase do 50 tona. [49]

Zavarivanje trenjem kao što i sam naziv govori, bazira se na zagrijavanju metalnih površina trenjem pri njihovom relativnom gibanju. Do zagrijavanja dolazi prilikom trenja vrtnjom jednog ili oba dijela koja se zavaruju, a do samog zavarivanja dolazi nakon pritiska jednog dijela u drugi. Zbog lake automatizacije koristi se u automobilskoj industriji, dok se u serijskoj proizvodnji koristi za reparaturno zavarivanje. [49]

Zavarivanje taljenjem je način spajanja metalnih dijelova u rastaljenom stanju na mjestu spoja, a proces može ili ne mora zahtijevati upotrebu dodatnog materijala, bez djelovanja pritiska ili udaraca. Zavarivanje taljenjem dijeli se na ljevačko, plinsko, zavarivanje elektroprovodljivom troskom, električnim i plazmatskim lukom te elektronskim i laserskim snopom. [49, 52]

Ljevačko zavarivanje jedan je od najstarijih postupaka zavarivanja tj. spajanja materijala. Željezni spoj metalnih dijelova dobiva se na način da se rastaljeni materijal odnosno, talina ulijeva na

mjesto spajanja. Primjenu pronalazi za popunjavanje većih zračnosti između dijelova. Pod ljevačkim postupkom zavarivanja ubraja se i aluminotermijsko zavarivanje. Talina se dobiva reakcijom oksida željeza i termitne smjese (aluminijevog praška) koja mora biti zagrijana na oko 100 °C. Navedeni postupak se u praksi koristi u slučaju terenskog zavarivanja tračnica [49].

Plinsko zavarivanje je proces zavarivanja koji topi i spaja metale zagrijavanjem plamenom uzrokovan reakcijom gorivog plina i kisika. Acetilen se najčešće koristi kao gorivi plin, a slijede ga propan, butan, metan i drugi. Gorivi plin mora osiguravati visoku temperaturu plamena, veliku brzinu širenja i po mogućnosti što manje kemijske reakcije s osnovnim i dodatnim metalom. Zbog svoje jednostavnosti i prenosivosti koristi se za održavanje i reparacije na terenu. [49, 52]

Kod zavarivanja pod elektroprovodljivom troskom toplina se stvara zbog otpora prolaska električne struje kojeg stvara troska. U navedenom procesu nema električnog luka, a žica, kao dodatni materijal, se taloži u donjem dijelu i hlađenjem oblikuje šav spoja. Primjenjuje se za zavarivanje sučeljnih, križnih, kutnih i drugih spojeva u vertikalnom položaju. Prednosti su zavarivanje većih zračnosti, nije potrebna priprema rubova i zavarivanje limova većih debljina samo u jednom prolazu. [49]

Zavarivanje električnim lukom je najrašireniji način zavarivanja taljenjem, često se koristi pod nazivom elektrolučno zavarivanje. Elektrolučno zavarivanje je vrsta zavarivanja koja stvara električni luk između elektrode i osnovnog materijala i dodatnog materijala za taljenje metala na mjestu zavarivanja. Mogu se koristiti istosmjerna (DC) ili izmjenična (AC) struja kao i potrošne ili nepotrošne elektrode. Postupci elektrolučnog zavarivanja mogu se izvoditi ručno, poluautomatski i automatski. Komercijalnu svrhu postiže u brodogradnji tijekom drugog svjetskog rata, a danas ostaje kao važan proces za izradu čeličnih konstrukcija i vozila. [49, 52]

Zavarivanje plazmatskim lukom koristi plazmatski luk koji je veće strujne gustoće i ioniziranosti, što rezultira povišenom energetske razinom i temperaturom. Temperature su izrazito visoke, čak i do 50 000 °C. Prijelazni luk između volframove netopive elektrode i zavarivanog metal služi za zavarivanje metala, a neprijelazni luk se koristi za rezanje keramike i polimera. [49, 52]

Zavarivanje elektronskim snopom toplina se dobiva kinetičkom energijom ubrzanih elektrona prilikom udara u metalnu površinu na mjestu zavarivanja. Zavaruju se male debljine čelika, kao i teško zavarljivi metali kao što su volfram, molibden, niobij, tantal i brzo oksidirajućih metala (titanij, cirkonij, berilij). Zavarivanje elektronskim snopom ne koristi dodatni materijal, ali je izrazito skup proces i koristi se za izradu samo specifičnih proizvoda. [49]

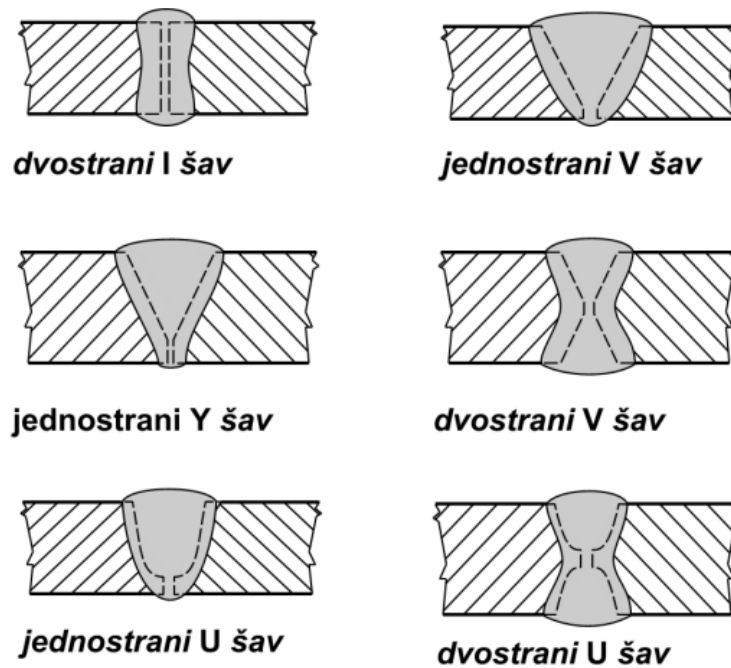
Zavarivanje laserskim snopom je postupak spajanja metala ili termoplastike pomoću lasera pri čemu nastaje vrlo uzak šav od 1 do 2 mm. Toplina za taljenje dobiva se pomoću topline dobivene energijom snopa ubrzanih svjetlosnih čestica tzv. fotona. Zavarivanje laserskim snopom se koristi za spajanje metala malih debljina. Primjenjuje se za zavarivanje metala visokih tališta, ali i onih metala koji se teško zavaruju kao što su bakar, nikal, aluminij, titanij i drugi. U praksi se zavaruju titanijevi čelici kod nuklearnih podmornica, turbinskih lopatica, ali i za spajanje raznorodnih metala. [49]

4.3. Osnovni tipovi zavarenih spojeva

Tip zavarenog spoja odnosi se na raspored ili konfiguraciju dvije metalne pločice koje se spajaju. U praksi tipovi zavarenih spojeva mogu se podijeliti na:

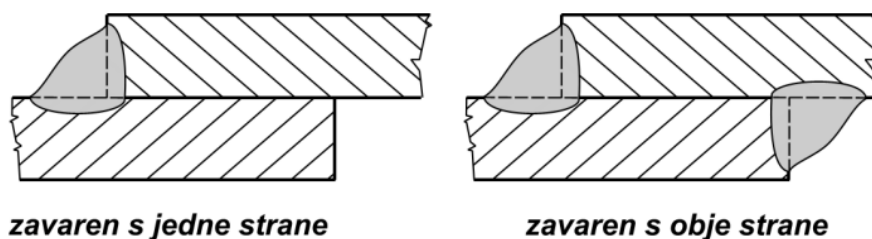
1. sučeljni,
2. preklopni,
3. kutni,
4. kutni rubni,
5. prirubni.

Sučeljni ili čeonni spoj postiže se postavljanjem pločica tako da međusobno zatvaraju kut između 160 i 200 stupnjeva, ali najčešći kut koji zatvaraju je 180 stupnjeva. U zavarivanju, ovo je najčešći tip spoja. U praksi, zavarivanje čeonih spojeva koristi se za izradu konstrukcija, zavarivanja cijevi, armatura i drugih. Sučeljni spojevi imaju mnogo varijacija koje se mogu primijeniti kako bi se postigao željeni rezultat. Varijacije se odnose na kutove, širinu razmaka, oblik utora, korijen i veličinu zavara. Najčešće korišteni tipovi varijacija sučeljnih spojeva su: dvostrani I šav, jednostrani V šav, jednostrani Y šav, dvostrani V šav, jednostrani U šav i dvostrani U šav (slika 4.5.). [49, 53]



Slika 4.5. Tipovi sučeljnih spojeva [49]

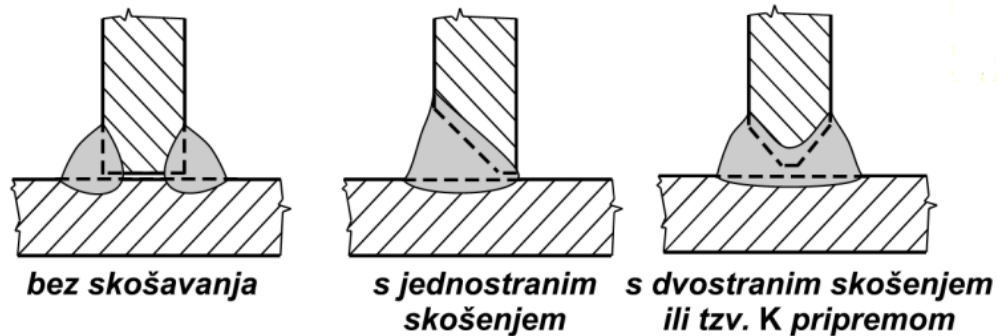
Preklopni spoj je u osnovi modifikacija sučelnog spoja, u kojoj se dvije metalne pločice postavljaju tako da se preklapaju jedna s drugom. Preklopni spojevi primjenjuju se za zavarivanje metala različitih debljina, a ako će zavareni dijelovi biti podvrgnuti većim opterećenjima moguće je spoj zavariti s obje strane (slika 4.6.). Preklopni spojevi se najčešće koriste za spajanje limova manjih debljina. Nedostatak preklopnog spoja je “lamelno kidanje” ili korozija koja nastaje zbog preklapanja metala, ali ih je moguće izbjeći primjenom ispravne tehnike i modificiranjem. [49, 53]



Slika 4.6. Primjer preklopnih spojeva [49]

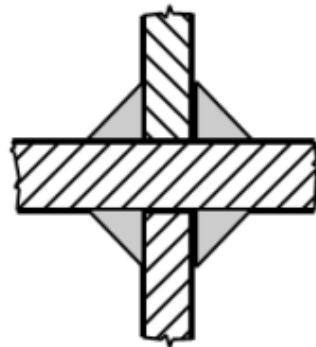
Kutni spoj ili T spoj nastaje kada se dvije metalne ploče sijeku pod kutom od 90 stupnjeva pri čemu jedna ploča „leži“ na sredini druge ploče u obliku slova T od kuda potječe sami naziv. Kutni spoj moguće je izvesti samo s jedne ili s obje strane, s ili bez skošenja stranice ruba zavarivanog elementa, a koristi se za zavarivanje debljih dijelova. Također, moguća je izvedba kutnog spoja s

jednostranim ili dvostranim skošenjem. Kutne spojeve s jednostranim skošenjem koriste se za spajanje limova debljine do 12 mm, a s dvostranim skošenjem za debljine do 40 mm i više (Slika 4.7.). [49, 53]



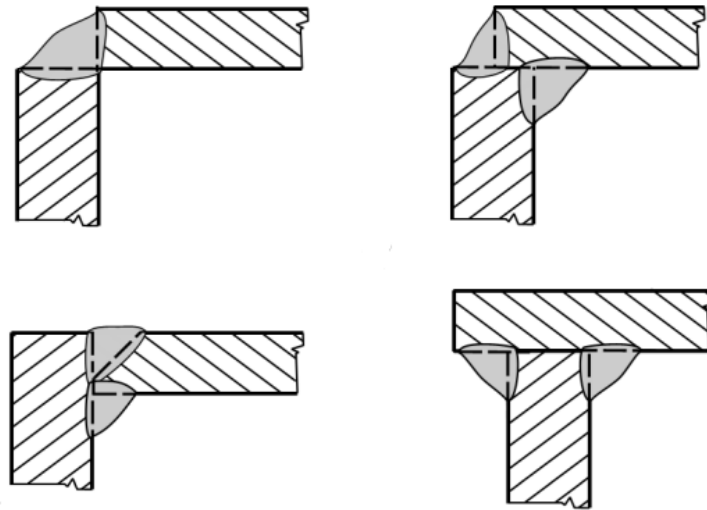
Slika 4.7. Primjeri kutnih spojeva [49]

Pod kutnim spojem spada i poseban oblik, križni spoj, a osnovna karakteristika je da ima jedan kontinuirani element, dok je drugi prekinut u dva dijela. Svrhu pronalazi kod većih metalnih konstrukcija kao što su brodovi i razne kutijaste konstrukcije s unutrašnjim uzdužnim i poprečnim elementima (slika 4.8.). [49, 53]



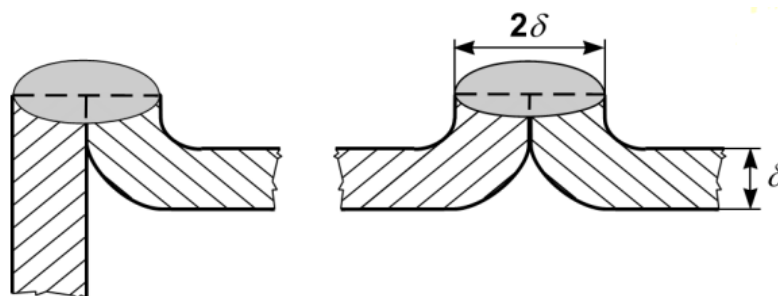
Slika 4.8. Primjer križnog spoja [49]

Kutni rubni spoj je gotovo sličan kutnom spoju, a jedina razlika je u položaju metalnih ploča. U usporedbi s T spojem gdje su ploče postavljene u sredini, kod rubnog spoja obje ploče tvore pravi kut u obliku slova L. Navedeni spoj primjenjuje se za izradu kućišta, kutijastih konstrukcija, okvira i u sklopovima pojedinih strojnih dijelova (slika 4.9.). [49, 53]



Slika 4.9. Primjeri kutnog rubnog spoja [49]

Posljednji tip zavarenog spoja je prirubni spoj. Spoj je prilično sličan preklopnom spoju, ali su ploče postavljene tako da budu paralelne na mjestu zavarivanja. Koriste se za tanke limove debljine do najviše 4 mm i za manje opterećene spojeve. Prednost prirubnog spoja leži u ukupnoj širini polja za polaganje zavara jer je jednaka dvostrukoj debljini spajanih dijelova, što rezultira lakšim kontroliranjem taline i vođenjem izvora topline (slika 4.10.). [49, 53]



Slika 4.10. Primjer prirubnog spoja [49]

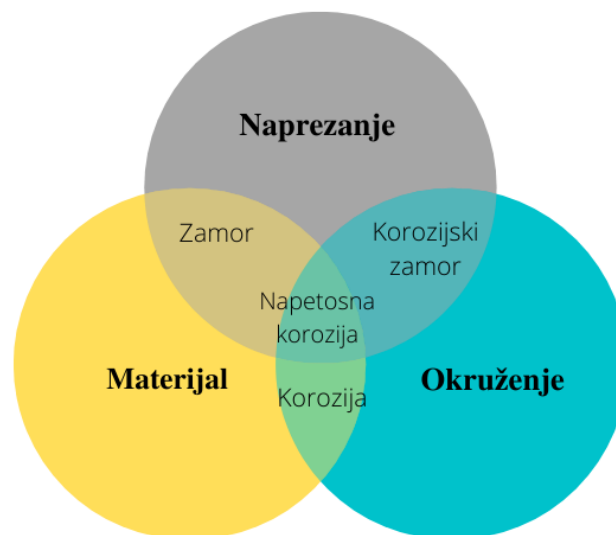
4.4. Utjecaj grešaka zavarenih spojeva na korozijsko ponašanje

Pojava korozije zavarenih spojeva je neizbježna, javlja se unatoč činjenici da su odabrani odgovarajući osnovni i dodatni metali. Također, do pojave dolazi usprkos poštivanju svih pravila zavarivanja i standarda te pravilnog oblika zavara i pune penetracije šava. U praksi, nije neobično da je odabrani metal ili legura u određenom okruženju otporan na koroziju, a njihov zavareni spoj

nije. S druge strane, moguće je da zavareni spoj pokazuje bolju otpornost na koroziju od nezavarenog osnovnog metala.

4.4.1. Uzroci korozije zavarenih spojeva

Ponekad je teško odrediti uzročnike korozije zavara, međutim, obično je potreban jedan ili više čimbenika, a neki od čimbenika su: dizajn zavara, tehnika izrade, način i redoslijed zavarivanja, utjecaj vlage, oksidni film, zavarivanje troske i prskanja tijekom zavarivanja, nepotpune penetracije zavara, pukotine, poroznost, nepravilan odabir dodatnog metala, završna obrada, visoka zaostala napreznja i mnogi drugi. Uzroke korozije najlakše je podijeliti pomoću Vennovog dijagrama u tri kategorije: materijal, okolina u kojem se nalazi i napreznja koja svojim preklapanjima tvore moguće uzročnike (slika 4.11.).



Slika 4.11. Uzročnici korozije zavarenih spojeva

Pod uzročnike materijala ubrajaju se metalurški čimbenici. Kao što je poznato, tijekom zavarivanja postoje ciklusi zagrijavanja i hlađenja koji imaju izrazito veliki utjecaj na mikrostrukturu i površinski sastav zavara i osnovnog metala. Neki od čimbenika koji smanjuju otpornost na koroziju su kontaminacija zavara, rekristalizacija i rast zrna u zoni utjecaja topline (ZUT), stvaranje „nepromiješanih“ zona i mikrosegregacija. [54, 55]

Uz navedene utjecaje, otpornost na koroziju se može držati pod kontrolom uravnoteženjem sastava legure kako bi se spriječilo taloženje, zaštitom vrućih i rastaljenih metalnih površina od reaktivnih

plinova i odabirom odgovarajućih parametara zavarivanja i uklanjanjem osnovnog metala koji je osiromašen kromom. [55]

Kao što je navedeno u ovom poglavlju, struktura zavarenog spoja dijeli se na zone: taljenja, utjecaja topline i nepromijenjenog osnovnog metala. Zona taljenja se svojim sastavom uvelike razlikuje od osnovnog metala, što uzrokuje stvaranje galvanskog članka. Različiti elektrodni potencijali mogu rezultirati makroskopskom galvanskom korozijom. Osim makroskopske korozije, u zoni taljenja pojavljuje se i mikroskopski galvanski članak zbog mikrostrukturalne segregacije koja je rezultat hlađenja tj. skrućivanja. U zoni utjecaja topline nastaju mikrostrukturne promjene u čvrstom stanju zbog visokih temperatura, ali nedovoljno visokih da bi se osnovni metal rastalio. Ovisno o udaljenosti od zone taljenja, svaka podzona zone utjecaja topline razlikuje se po mikrostrukturim značajkama i osjetljivosti na koroziju. Što je bliže zoni taljenja veća je mogućnost nastanka pukotine koja može biti potencijalno mjesto nastanka korozije. Zona nepromijenjenog osnovnog metala nije prošla kroz metaluršku promjenu, vjerojatno će biti u stanju visokog zaostalog uzdužnog i poprečnog naprezanja, ovisno o načinu izvođenja zavara. [55]

Zavari su podložni svim oblicima korozije, ali su posebno osjetljivi na one na koje utječe varijacija u mikrostrukтури i sastavu. Pri projektiranju zavarenih spojeva potrebno je uzeti u obzir galvansku koroziju, rupičastu koroziju, napetosnu koroziju, interkristalnu koroziju, koroziju pod utjecajem vodika i koroziju pod mikrobiološkim utjecajem. [55]

Iako se neke legure mogu zavarivati autogeno, češća je primjena zavarivanja s dodatnim metalom. Korištenjem dodatnog metala koji ima drugačiji sastav od osnovnog metala može proizvesti elektrokemijsku razliku potencijala koja čini područja zavara aktivnijim i podložnijim koroziji. Galvanska korozija je izrazito opasna kada se zavareni spoj nalazi u teškim uvjetima npr. u morskoj vodi, stoga je potrebno pažljivo odabrati odgovarajući dodatni metal koji će biti što kompatibilniji osnovnom metalu. [55]

Prilikom zavarivanja nehrđajućih čelika mogu se razviti područja osjetljiva na koroziju, proces se naziva senzibilizacija. Senzibilizacija je uzrokovana stvaranjem krom karbida duž granica zrna, što dovodi do iscrpljivanja kroma iz područja granica i dolazi do stvaranja lokaliziranih galvanskih ćelija. Ukoliko sadržaj kroma padne ispod 12% koji su potrebni kako bi se održao pasivni film, područje postaje podložno interkristalnom korozijskom napadu. Najčešće se događa u zoni utjecaja topline i rezultira propadanjem zavara. Senzibilizaciju se može svesti na minimum visokotemperaturnim žarenjem i gašenjem nakon zavarivanja. Tijekom procesa krom se ponovno otapa na granicama zrna i sprječava stvaranje krom karbida tijekom procesa hlađenja. [55]

Rupičasta korozija je oblik lokaliziranog napada koji je uzrokovan propuštanjem tankog pasivnog oksidnog filma koji štiti metal od korozije. Jednom kada se formira jamica ona djeluje kao anoda, dok se oko nje nalaze relativno velika katodna područja. Rupice često nastaju na specifičnim mikrostrukturnim značajkama u dodatnom metalu. Rupičasta korozija nastaje kada se postigne potencijal koji prekoračuje kritičnu vrijednost, poznatu kao potencija rupičaste korozije između metala i otopine. Rupičasta korozija se najlakše razvija u metalurškim heterogenim materijalima. U praksi, kada se austenitni nehrđajući čelik zagrije na temperaturu pri kojoj dolazi do senzibilizacije, nastaje područje osiromašeno kromom. Rupice se, također, mogu pojaviti na graničnim mjestima austenita i ferita u zavarenom metalu od nehrđajućeg čelika. [55]

Zavareni spojevi mogu biti osjetljivi na napetosnu koroziju, ako se nalaze u specifičnim uvjetima korozivne okoline. Kako bi se dogodila napetosna korozija potrebna je odgovarajuća kombinacija korozivnog medija, vlačnog naprezanja i osjetljive mikrostrukture zavarenog spoja. Zavareni spojevi su uobičajeno pod utjecajem vlačne sile, koju je uzrokovalo preostalo naprezanje, do razine koja se približava granici tečenja osnovnog metala. Zbog razlike u heterogenoj mikrostrukтури, zavareni spoj ima izrazito visoku tendenciju ka napetosnoj koroziji. Pukotine nastale od napetosne korozije imaju anodni vrh pukotine i vidljive su duž loma. Nerijetko dolazi do grananja pukotina uz vrijeme odgode prije nastanka pukotine pri čemu se inicijacija javlja u korozijskim jamicama. Povećanjem sadržaja ferita u metalu šava od nehrđajućeg čelika smanjuje se osjetljivost na napetosnu koroziju. Optimalnu otpornost čini metal s približno 50% ferita. Prilikom zavarivanja mora se pripaziti na unos topline jer dovodi do zaostalih naprezanja koja mogu biti pokretači nastanka i širenja pukotina uz pomoć korozivne okoline. Da bi se smanjila zaostala naprezanja potrebno je napraviti više prolaza zavara. [55]

Korozija pod mikrobiološkim utjecajem je pojava u kojoj mikroorganizmi imaju ulogu u stvaranju korozije metala. Može se podijeliti na pokretačku ulogu i ulogu ubrzavanja korozijskog procesa. Voda i neki organski mediji mogu sadržavati određene mikroorganizme koji mogu proizvesti biofilm kada su u kontaktu s metalnom površinom. Osim toga, metabolički proces mikroorganizama može proizvesti lokaliziranu kiselu okolinu koja mijenja korozijsko ponašanje izloženog metala, mijenjajući anodne i katodne reakcije koje uništavaju zaštitne filmove i stvaraju korozivne produkte. U zavarenim spojevima od austenitnog nehrđajućeg čelika mikrobiološki organizmi „prodiru“ u rupice u području zone utjecaja topline gdje graniči sa zonom taljenja. Koroziju pod mikrobiološkim utjecajem moguće je smanjiti odgovarajućim dizajnom zavara i sprječavanjem okruženja koji je pogodan za mikroorganizme. [55]

4.4.2. Metode zavarivanja za smanjenje korozije zavarenih spojeva

Koroziju nije moguće u potpunosti spriječiti, a isto vrijedi i za koroziju zavarenih spojeva. Zato je potrebno djelovati pravovremeno sa specifičnim metodama kako bi se smanjila tendencija ka koroziji zavarenih spojeva.

Odabir osnovnog i dodatnog materijala za zavarivanje - Pažljivim odabirom osnovnog i dodatnog materijala za zavarivanje može se smanjiti makro i mikro kompozicijska razlika u zavarivanju i tako smanjiti mogućnost nastajanja galvanskih članaka. [55]

Priprema površine - Ukoliko se odabere pravilan postupak čišćenja površine moguće je smanjiti nedostatke tj. defekte koji su često podložni korozijskom napadu u agresivnoj korozivnoj okolini. S druge strane, proces čišćenja površine može donijeti i nedostatke. Površina koja je očišćena pjskarenjem ili brušenjem može ostaviti nečistoće na površini zavarenog spoja. Prilikom odabira četke za čišćenje, uobičajeno se odabire četka od nehrđajućeg čelika jer ne stvara korozijske produkte koji mogu zadržati vlagu. [55]

Dizajn zavara - Dizajn zavara treba imati što pravilnije zavare, bez troske s niskim profilima i ravnim prolazom. Loše izrađen dizajn zavara može stvoriti pukotine koje će ispuniti korozivna okolina, što dovodi do rupičaste korozije ili korozije u procjepu. [55]

Način zavarivanja - Prilikom zavarivanja poželjna je potpuna penetracija u zavarenom spoju kako bi se izbjegle praznine. Šljaku je potrebno ukloniti nakon svakog prolaza električnom brusilicom ili električnim alatom za usitnjavanje. Geometrija zavarenog spoja mora biti projektirana tako da omogućuje potpuno uklanjanje korozivnih i hidrofilnih ostataka toka. [55]

Završna obrada zavarenih spojeva - Zavar je potrebno vizualno pregledati neposredno nakon izvođenja zavarivanja. Kako bi se postigla maksimalna otpornost na koroziju potrebno je dobiti glatku jednolično oksidiranu površinu bez stranih čestica i nepravilnosti. Zavari se obično razlikuju po hrapavosti i stupnju prskanja, što se može smanjiti naknadnom obradom površine npr. brušenjem. Za glatke zavarene spojeve, dovoljna je žičana čelična četka, dok za nehrđajući čelik četkanje remeti postojeći pasivni film i može pospješiti koroziju. [55]

Površinski premaz - Poželjno je koristiti premaze kada varijacija u sastavu metala šava može uzrokovati lokalni napad. Premaz treba pokriti zavar i osnovni metal i često zahtijeva posebnu pripremu površine. [55]

Toplinska obrada nakon zavarivanja - Toplinska obrada nakon zavarivanja može biti učinkovit način za smanjenje osjetljivosti na koroziju, a postiže se smanjenjem gradijenata zaostalih

naprezanja koja utječu na rast napetostne korozije. Tijekom toplinske obrade izvlači se zaostali vodik iz zavara i smanjuje osjetljivost na pucanje vodika. Također, smanjuje mikrosegregaciju i mikrogalvanske članke. [55]

Predgrijavanje i temperatura međuprolaza - Izbor i korištenje odgovarajućeg tretmana predgrijavanja i temperature međuprolaza mogu spriječiti pucanje vodikovih veza u ugljičnom i niskolegiranom čeliku. [55]

Pasivacijski tretman - Pasivacijska obrada može povećati otpornost na koroziju zavarenih spojeva koji su izrađeni od nehrđajućeg čelika. [55]

Izbjegavanje stvaranja pukotina - Pukotine mogu nastati zbog troske koja se još uvijek drži za zavar i zbog defekata kao što su nedostatak penetracije i mikropukotine koje mogu rezultirati korozijom u pukotinama. Pravilan odabir dodatnog metala, pravilan način zavarivanja i temeljito uklanjanje troske mogu smanjiti ovaj oblik oštećenja od korozije. [55]

Uklanjanje izvora vodika - Vodik je moguće drastično smanjiti pravilnim odabirom dodatnog materijala za zavarivanje, odnosno, elektrode za elektrolučno zavarivanje s niskim udjelom vodika, pravilnim sušenjem fluksa i zavarivanjem čistih površina. [55]

5. EKSPERIMENTALNI DIO RADA - SLANA KOMORA

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je ispitivanje korozijskog ponašanja zavarenih spojeva u slanoj komori prema standardiziranom postupku. Prije slane komore uzorci su bili podvrgnuti penetrantskom ispitivanju. Nakon slane komore provedena je destruktivna metoda testiranja prionjivosti premaza, metoda urezivanja mrežice prema međunarodnom standardu ISO 2409 te vizualni pregled uzoraka mikroskopom. Ispitivanje je provedeno na osam uzoraka zavarenih pločica. Ispitivanje u slanoj komori provedeno je na Građevinskom fakultetu u Rijeci, dok je ostatak ispitivanja proveden na Tehničkom fakultetu u Rijeci.

5.1. Uzorci za ispitivanje

5.1.1. Materijal

Materijal koji se koristio za izradu uzoraka u eksperimentalnom dijelu diplomskog rada je konstrukcijski niskouglični čelik pod nazivom S355, prema normi EN 10027-1. Konstrukcijski čelici su najčešće korišteni čelični materijali u odnosu na druge čelike zbog njihove zadovoljavajuće kvalitete i ono što je uvijek bitno, relativno niske cijene. U inženjerstvu je vrlo pogodan pri izradi strojeva koji nemaju visoke zahtjeve za izdržljivost ili otpornost na velika opterećenja.

Konstrukcijski čelici, u ovom slučaju čelik S355 lako podliježe atmosferskoj koroziji, pa ga je potrebno zaštititi premazima protiv korozije ili vrućim pocinčavanjem. Kako bi premaz bio što dugotrajniji i pružao veću otpornost na koroziju, površina mora biti prethodno obrađena.

Mehanička svojstva konstrukcijskih čelika dana su u tablici 5.1. Broj u nazivu konstrukcijskog čelika označava njegovu granicu razvlačenja tj. označava njegovo maksimalno opterećenje u MPa koje ne završava plastičnom deformacijom. Naprezanje iznad definirane vrijednosti dovodi do trajne deformacije materijala. U slučaju korištenog materijala S355 u eksperimentalnom dijelu rada iznosi 355 MPa. Sve vrijednosti ispod navedene granice rezultiraju elastičnom deformacijom. Vlačna čvrstoća odnosi se na najveću čvrstoću tijela na krivulji ovisnosti naprezanja o deformaciji čvrstog tijela, a iznosi između 470 i 630 MPa. [56]

Tablica 5.1. Mehanička svojstva konstrukcijskih čelika

| Mehanička svojstva konstrukcijskog čelika | Vlačna čvrstoća, R_m , MPa (N/mm ²) | 0,2% granica razvlačenja, $R_{p0,2}$ min, (MPa) | Tvrdoća po Brinellu, HB max |
|---|---|---|-----------------------------|
| S235 | 360 – 510 | 235 | 100 – 154 |
| S275 | 370 – 530 | 275 | 121 – 163 |
| S355 | 470 – 630 | 355 | 146 – 187 |
| S420 | 480 – 620 | 420 | 143 – 184 |

Kemijski sastav konstrukcijskih čelika vidljivi su u tablici 5.2. [56]

Tablica 5.2. Kemijski sastav konstrukcijskih čelika

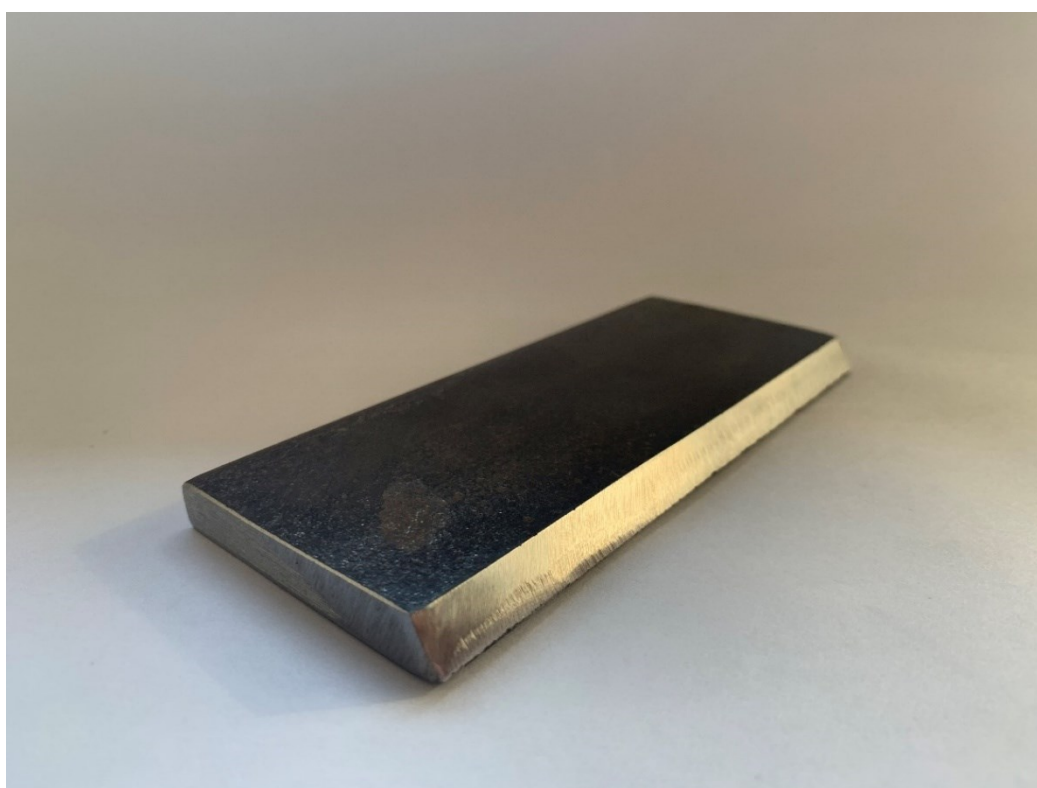
| Kompozicija (maseni udjeli %) | S235 | S275 | S355 | S342 |
|-------------------------------|------|------|------|-------|
| Mangan (Mn)max | 1,60 | 1,60 | 1,60 | 1,60 |
| Silicij (Si) max | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,5 |
| Ugljik (C) max | 0,22 | 0,25 | 0,23 | 0,12 |
| Fosfor (P) max | 0,05 | 0,04 | 0,05 | 0,025 |
| Sumpor (S) max | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,015 |

5.1.2. Priprema uzoraka

Probni uzorci izrezani su iz čelične ploče materijala S355 debljine 10 mm na tračnoj pili za metal proizvođača TP Strojevi d.o.o. marke ADAL (slika 5.1.), a izrezano je ukupno 16 komada dimenzija 125 x 50 mm (slika 5.2.).



Slika 5.1. Tračna pila marke ADAL model CY135



Slika 5.2. Pločica uzorka dimenzija 125 x 50 mm

Nakon pripremljenih pločica u količini od 16 komada kako bi se dobilo 8 uzoraka na kojima će se provoditi ispitivanje u slanoj komori, na duljoj strani uzorka pripremljen je žlijeb zavara prema tehnološkoj uputi za zavarivanje prema WPS-u (eng. *Welding Procedure Specification*) kao i samo zavarivanje uzoraka. Postupak koji se koristio za zavarivanje je ručno elektrolučno zavarivanje (REL) s obloženom elektrodom (111). Pri zavarivanju uzoraka koristio se aparat za zavarivanje proizvođača Lincoln Electric V250-S (slika 5.3.).



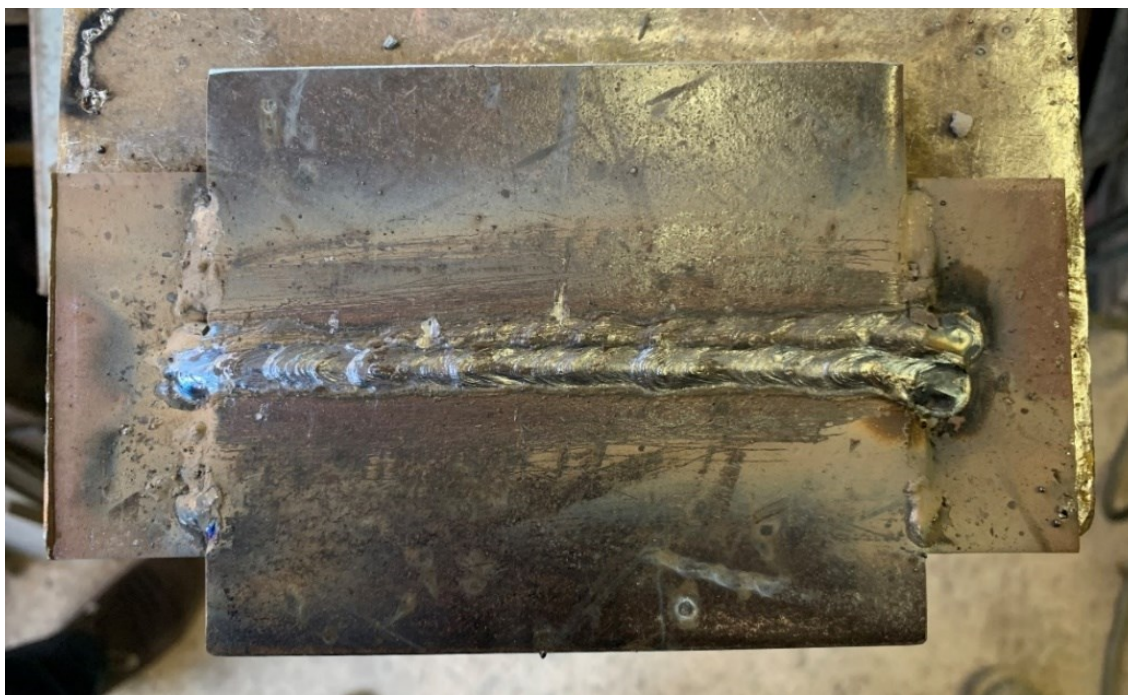
Slika 5.3. Uređaj za zavarivanje Lincoln Electric V250-S

Kao dodatni materijal zavarivanja korištene su elektrode proizvođača Elektroda Zagreb d.d., EZ–50 B (slika 5.4.), a temelje se na normi HRN EN ISO 2560-A. EZ – 50 B elektroda je debelo obložena bazična elektroda za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika čvrstoće do 640 N/mm², kao i za zavarivanje sitnozrnatih čelika s granicom razvlačenja do 440 N/mm². Promjer elektrode je 3,2 mm, a jakost struje prilikom zavarivanja je varirala između 110 i 140 A.



Slika 5.4. Zagreb Elektroda EZ – 50 B

Prvo su se zavarile dodatne čelične pločice koje su služile kao potpora prilikom zavarivanja kako se ne bi savile glavne pločice pod utjecajem topline uzrokovane zavarivanjem. Zavarivanje je provedeno kroz četiri prolaza i pokrovnim korijenim zavarom u jednom prolazu. Nakon svakog prolaza zavar je očišćen čeličnom četkom kako bi se maknula troska i očistila površina za bolje prijanjanje sljedećeg prolaza (slika 5.5.).



Slika 5.5. Uzorak prilikom zavarivanja

Navedenim načinom dobiveno je osam uzoraka pločica dimenzija 125 x 105 mm, debljine 10 mm. Osam uzoraka podijeljeno je u dvije skupine po četiri uzorka u kojima je površina tretirana na različite načine kako bi se vidio različit utjecaj slane atmosfere ovisno o načinu zaštite zavarenih spojeva. Prvi uzorak je u potpunosti neočišćen zavar, dok su ostala tri uzorka očišćena abrazivnim rotacijskim alatima. Drugi uzorak je pušten kao očišćena površina. Treći uzorak je premazan s dva sloja brzosušivom temeljnom bojom proizvođača Iskra kemijska industrija d.o.o. za metal Ferolin BS u sivoj nijansi (slika 5.6.). Slojevi su se nanosili po preporuci proizvođača svakih sat vremena na sobnoj temperaturi na dobro pripremljenu površinu koja je bila potpuno odmašćena, suha, očišćena od prašine, hrđe i mehaničkih nečistoća. Premazi su nanoseni kistom, što je zahtijevalo razrjeđivanje temeljnog premaza univerzalnim nitro razrjeđivačem do 5%. Premazi su nanošeni u intervalu od jednog sata.



Slika 5.6. Temeljna boja Iskra kemijska industrija d.o.o. Ferolin BS

Četvrti uzorak sadrži sve prethodno navedene korake i još dva sloja završnog premaza istog proizvođača, Iskralux BS, u bijeloj nijansi (slika 5.7.). Sadrži karakteristike odličnog prijanjanja na podlogu, brzo se suši, otporan je na vremenske utjecaje, ulja i blage kemikalije. Završni premaz nanesen je na zavarenu površinu identičnim postupkom kao i temeljni premaz.



Slika 5.7. Antikorozivni završni premaz Iskralux BS

U tablici 5.3. navedena je grupa uzorka, broj uzorka te način tretiranja površine.

Tablica 5.3. Plan tretiranja površine uzoraka.

| Grupa uzoraka | Broj uzorka | Način tretiranja površine |
|---------------|-------------|---------------------------|
| 1 | 1 | Neočišćena površina |
| 1 | 2 | Očišćena površina |
| 1 | 3 | Temeljni premaz |
| 1 | 4 | Temeljni i završni premaz |
| 2 | 1 | Neočišćena površina |
| 2 | 2 | Očišćena površina |
| 2 | 3 | Temeljni premaz |
| 2 | 4 | Temeljni i završni premaz |

Zbog lakšeg praćenja teksta uzorcima su dana imena kao u tablici 5.4. gdje prvi broj označava grupu uzorka, a drugi broj način tretiranja površine.

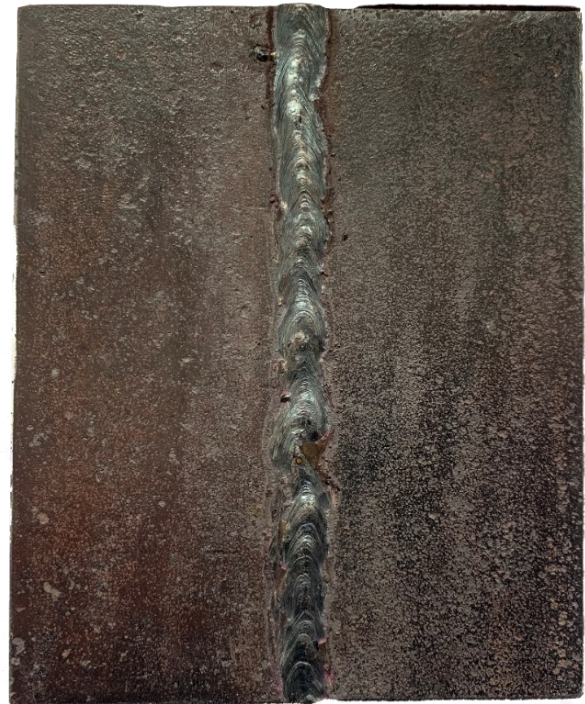
Tablica 5.4. Nazivlje uzoraka

| Grupa uzoraka | Broj uzorka | Ime uzorka |
|----------------------|--------------------|-------------------|
| 1 | 1 | Uzorak 1-1 |
| 1 | 2 | Uzorak 1-2 |
| 1 | 3 | Uzorak 1-3 |
| 1 | 4 | Uzorak 1-4 |
| 2 | 1 | Uzorak 2-1 |
| 2 | 2 | Uzorak 2-2 |
| 2 | 3 | Uzorak 2-3 |
| 2 | 4 | Uzorak 2-4 |

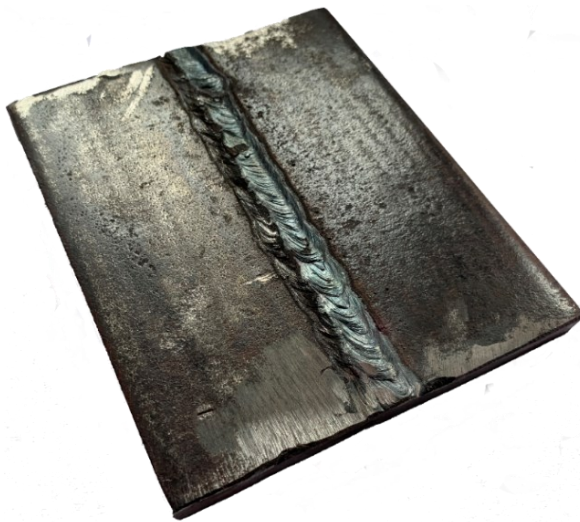
Na slikama od 5.8. do 5.15. prikazane su fotografije uzoraka prije ispitivanja u slanoj komori.



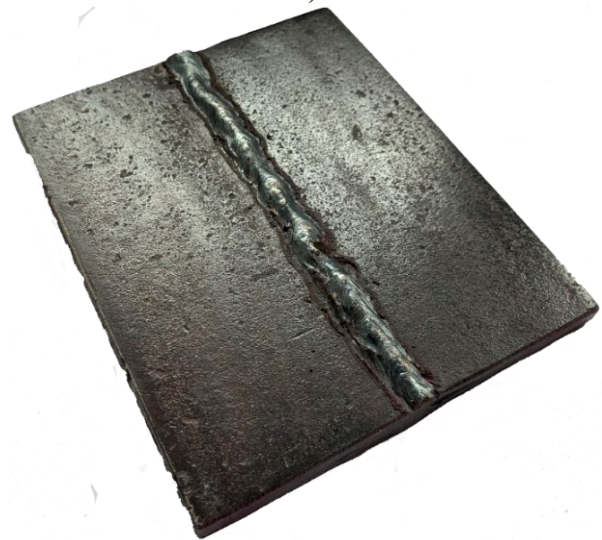
a)



b)



c)



d)

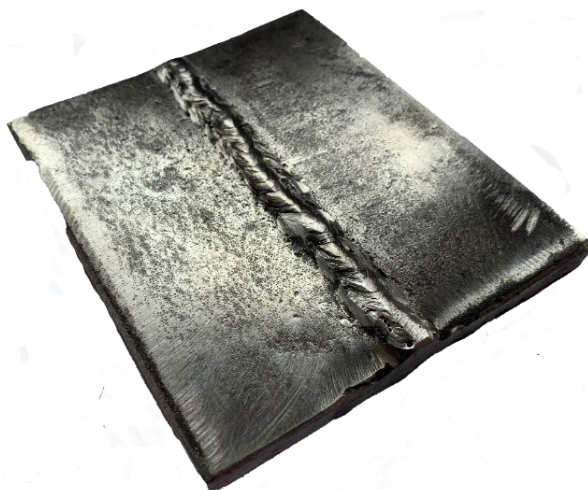
Slika 5.8. Uzorak 1-1: a) lice zavora, b) korijen zavora, c) lice zavora izometrija, d) korijen zavora izometrija



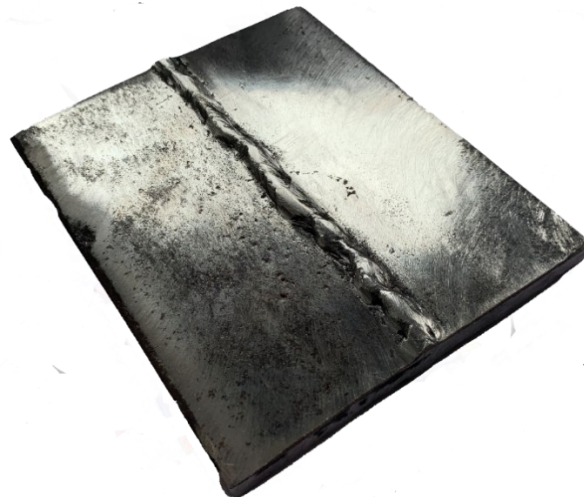
a)



b)



c)

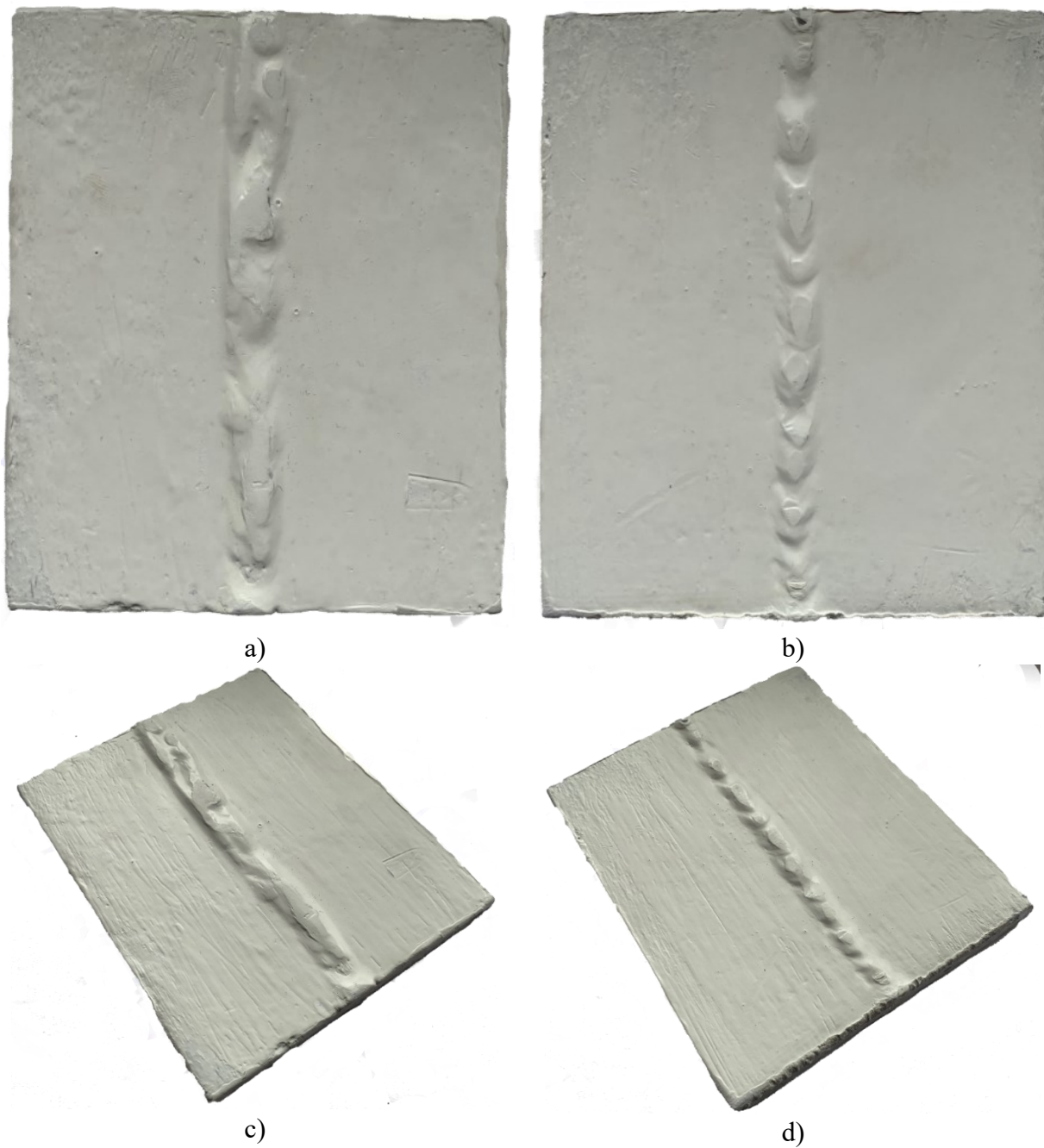


d)

Slika 5.9. Uzorak 1-2: a) lice zavora, b) korijen zavora, c) lice zavora izometrija, d) korijen zavora izometrija



Slika 5.10. Uzorak 1-3: a) lice zavara, b) korijen zavara, c) lice zavara izometrija, d) korijen zavara izometrija



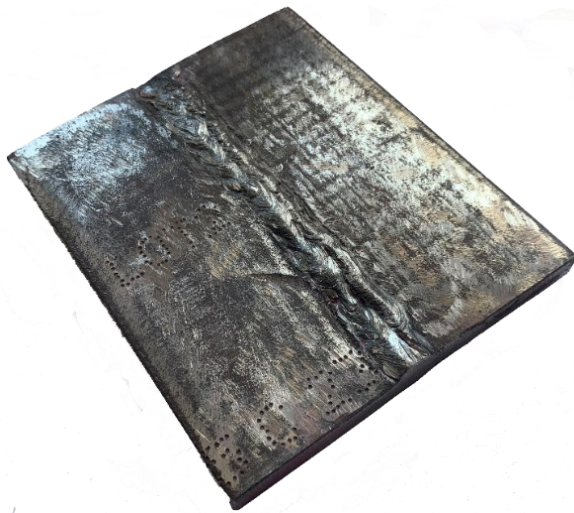
Slika 5.11. Uzorak 1-4: a) lice zavara, b) korijen zavara, c) lice zavara izometrija, d) korijen zavara izometrija



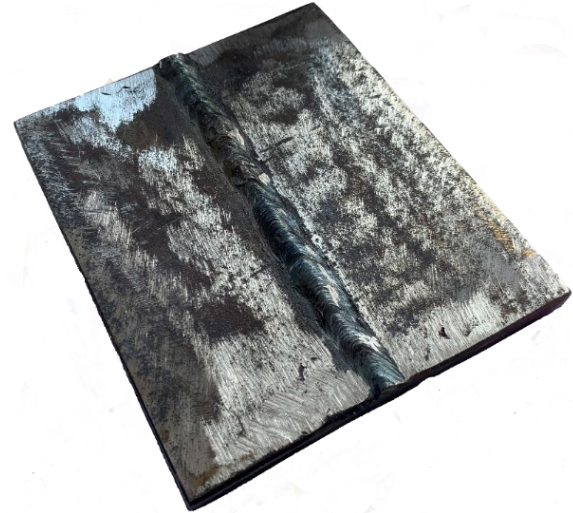
a)



b)



c)



d)

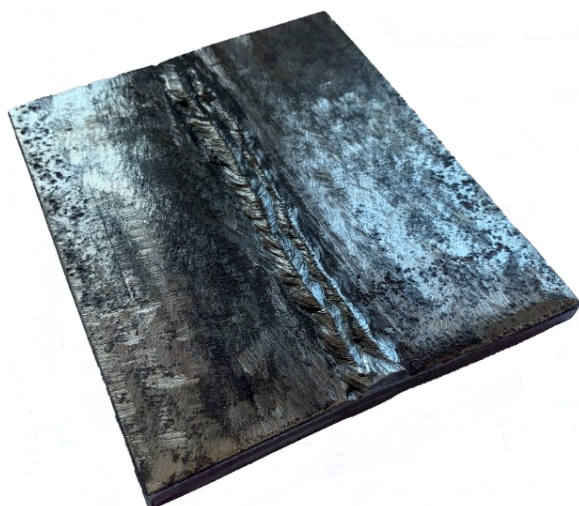
Slika 5.12. Uzorak 2-1: a) lice zavara, b) korijen zavara, c) lice zavara izometrija, d) korijen zavara izometrija



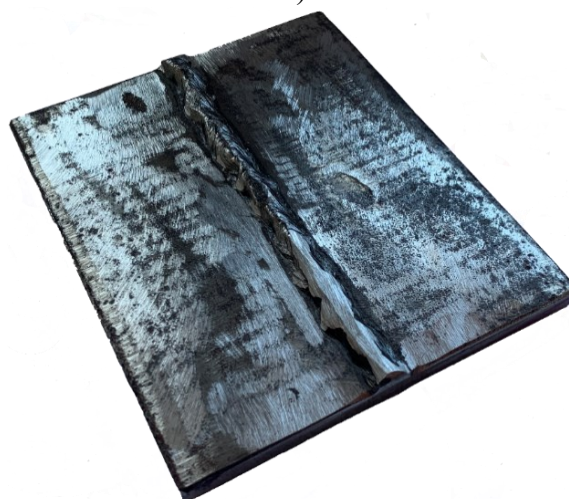
a)



b)



c)



d)

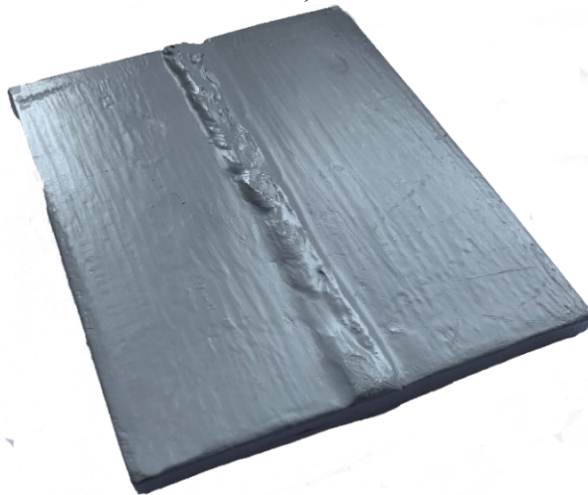
Slika 5.13. Uzorak 2-2: a) lice zavora, b) korijen zavora, c) lice zavora izometrija, d) korijen zavora izometrija



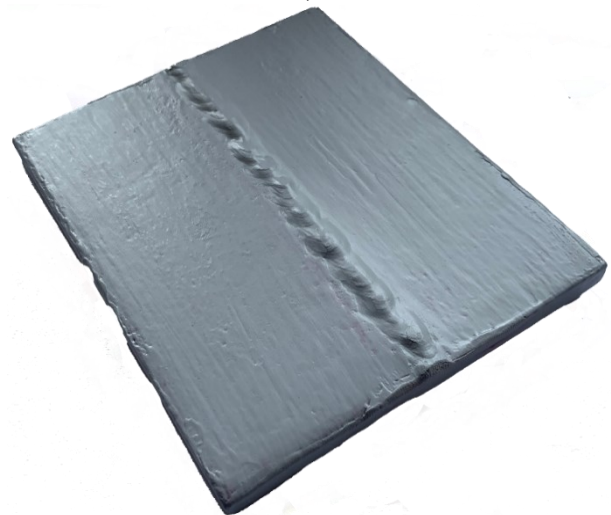
a)



b)

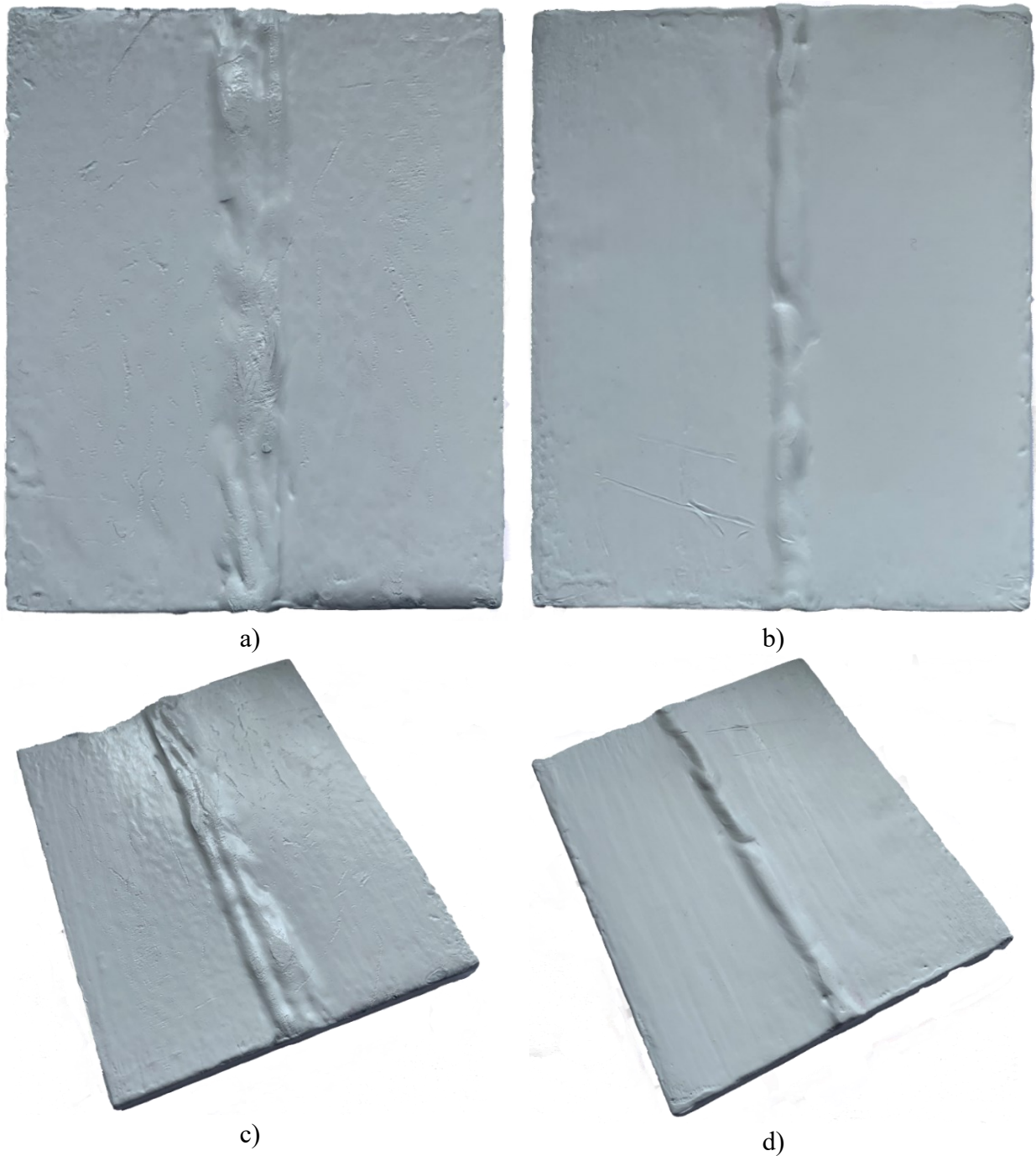


c)



d)

Slika 5.14. Uzorak 2-3: a) lice zavara, b) korijen zavara, c) lice zavara izometrija, d) korijen zavara izometrija



Slika 5.15. Uzorak 2-4: a) lice zavara, b) korijen zavara, c) lice zavara izometrija, d) korijen zavara izometrija

Ispitivanje penetrantima jedna je od najpopularnijih metoda nedestruktivnog ispitivanja nepravilnosti u materijalu u industriji. Ekonomičan je, svestran i zahtjeva minimalnu obuku u usporedbi s drugim metodama ispitivanja bez razaranja. Pomoću metode ispitivanja penetrantima provjerava se ima li nedostataka u materijalu na površini tako da se nanese penetrantska tekućina u pukotine uobičajeno crvene boje, a zatim se tekućina izvuče pomoću razvijачa bijele boje zbog kontrasta i boljeg vizualnog uočavanja pukotina. Najčešće se koristi za ispitivanje zavarenih spojeva, ali se koristi i za pregledavanje odljevaka, otkivaka, ploče, šipki i cijevi.

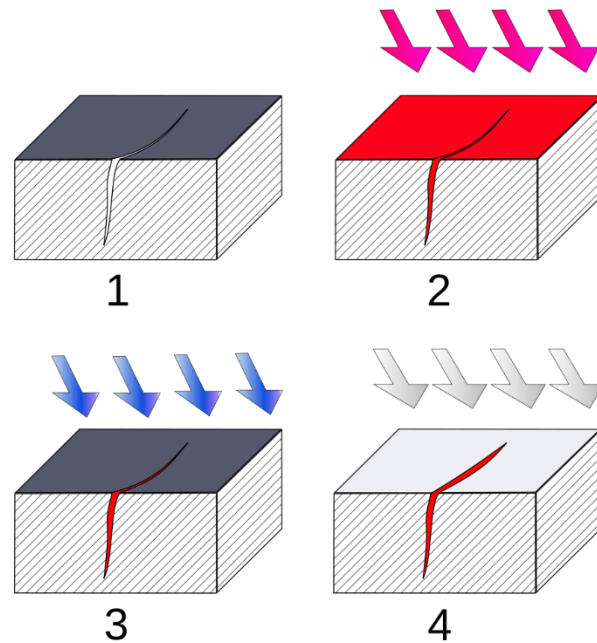
Ispitivanje penetrantima provedeno je na Tehničkom fakultetu u Rijeci u laboratoriju. Od osam uzoraka ispitivanje penetrantom provedeno je na šest uzoraka jer su dva već bila podvrgnuta premazima. Koristili su se penetranti proizvođača MAGNAFLUX Spotcheck SK3 (slika 5.16.) Penetrantsko ispitivanje provedeno je na uzorcima zbog lakšeg detektiranja površinskih nepravilnosti kao što su makro i mikro pukotine, šupljine poroznost itd.



Slika 5.16. Sprejevi za testiranje penetrantima s lijeva na desno, čistač, penetrant i razvijatelj

Ispitivanje penetrantima zahtjeva sljedećih pet glavnih koraka, a isti su provedeni na uzorcima (slika 5.17.):

1. priprema površine,
2. nanošenje penetranta,
3. uklanjanje viška penetranta,
4. razvijanje,
5. pregled (ispitivanje).



Slika 5.17. Prikaz procesa ispitivanja penetrantima [61]

Na slikama 5.18. i 5.19. prikazane su fotografije procesa ispitivanja penetrantima na uzorcima zavarenih spojeva. Slika 5.18. prikazuje uzorke s nanesenim slojem penetranta crvene boje, dok slika 5.19. prikazuje proces razvijanja indikacija na uzorcima.



Slika 5.18. Nanošenje penetranta



Slika 5.19. Razvijanje indikacija

5.2. Postupak ispitivanja

Slana komora je laboratorijska simulacija korozivne slane okoline. Ispitivanje u slanoj komori služi kao ubrzani test na koroziju u kojemu se uzorci izlažu maglici natrijeva klorida uobičajeno u količini od 5% NaCl. Ukoliko se žele postići neki drugi uvjeti postoji mogućnost dodavanja i nekih drugih kemikalija. Glavna svrha ispitivanja u slanoj komori je ispitivanje prevlaka na materijalima, kao i utjecaj soli na materijal. Za izvođenje eksperimenta ovog diplomskog rada korištena je slana komora proizvođača Ascott tipa CC1000ip sa zapremninom 1000 litara (slika 5.20.).



Slika 5.20. Slana komora Ascott CC1000ip

Navedena slana komora spada pod grupu uređaja koji ispituju ciklički test korozije (eng. *Cyclic Corrosion Test (CCT)*). Ascott CCT komore dizajnirane su kako bi bile u skladu sa što više različitih CCT specifikacija. Standardno dolaze s mogućnošću stvaranja četiri različita uvjeta [56]:

1. slano špricanje,
2. kondenzacijska vlažnost,
3. sušenje zrakom,
4. kontrolirana vlažnost.

Navedene uvjete moguće je programirati bilo kojim redoslijedom ovisno o potrebama i oni se automatski tj. ciklički ponavljaju u zadanom vremenskom periodu. [57]

Tri vrste standarda koji se koriste su:

1. ISO 9227,
2. ASTM B117,
3. CCT.

ISO 9227 spada pod međunarodni standard za testiranje u slanoj komori, a on specificira alate, reagense i postupak koji se koristi za provođenje ispitivanja u neutralnom slanom raspršivanju (eng. *Neutral salt spray test (NSS)*), raspršivanju octene kiseline (eng. *Acetic acid salt spray*

(AASS) i raspršivanju soli octene kiseline ubrzane bakrom (eng. *Copper-accelerated acetic acid salt spray test (CASS)*) za procjenu korozijske otpornosti metalnih materijala s trajnom ili privremenom zaštitom od korozije ili bez nje. Također, ISO 9227 opisuje i korištenu metodu za procjenu korozivnog okruženja. Standard ne navodi dimenzije ili vrste uzoraka koji će se ispitivati, period izlaganja koji će se koristiti ili tumačenje rezultata. Ispitivanje u slanoj komori korisno je za otkrivanje diskontinuiteta, kao što su pore ili neki drugi nedostaci materijalu ili premazima. [58]

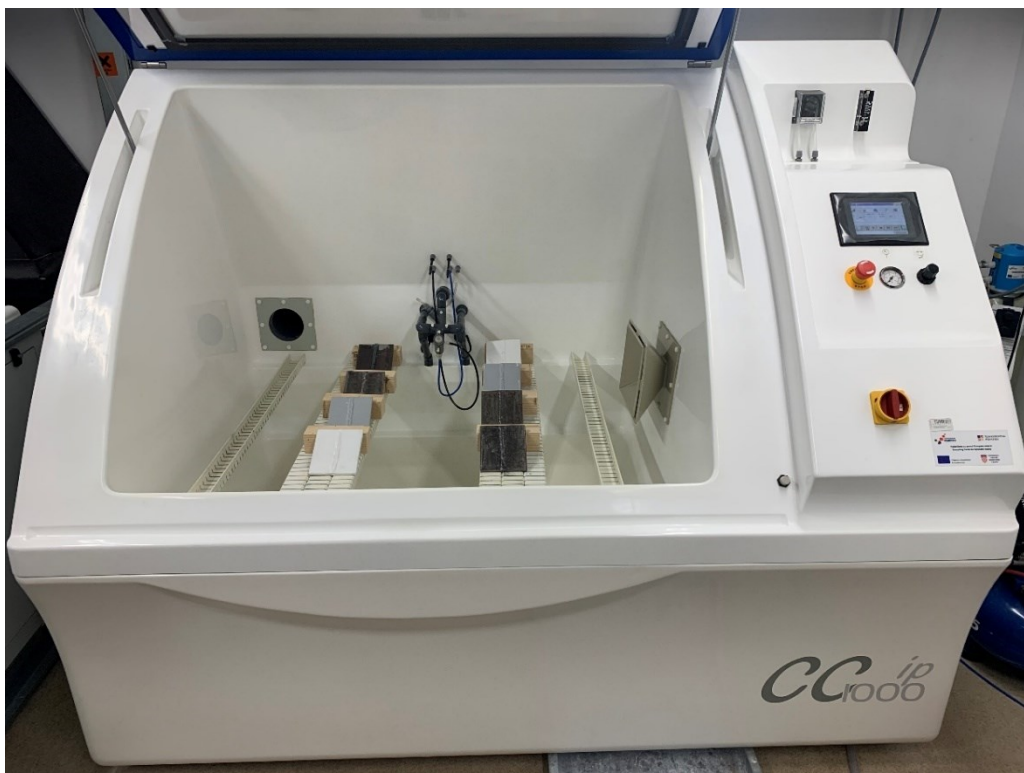
ASTM B117 je američki standard za provođenje testiranja u slanoj komori od Američkog društva za testiranje i materijale (eng. *American Society for Testing and Materials*), poznat kao „Standardna praksa za rad slanim špricanjem (maglom)“. Koristi se za analizu korozije na metalnim uzorcima s ili bez korozijske zaštite u različitim simuliranim klimatskim uvjetima u kontroliranom okruženju. Ovaj način testiranja objavljen je 1939. godine i vrlo brzo je prihvaćen diljem svijeta u svim segmentima industrije. [59]

Za razliku od ISO 9227 i ASTM B117, cikličko ispitivanje korozije (CCT) pokušava na što realističniji način prikazati izvođenje ispitivanja u slanoj komori. U prirodi, stvarna atmosferska izloženost obično uključuje i vlažne i suhe uvjete što omogućuje CCT standard. Istraživanja pokazuju bolju korelaciju CCT testova nego konvencionalnih testova slane komore. Standard je učinkovit za procjenu različitih mehanizama korozije, uključujući opću, galvansku i koroziju u pukotinama. Cikličko ispitivanje korozije namijenjeno je stvaranju korozije u vanjskom korozivnom okruženju. [60]

Ključna je napomena da testovi provedeni u slanoj komori nemaju vremensku korelaciju s realnim uvjetima u eksploataciji. Ukoliko se uzorak nalazi određeni broj sati unutar slane komore nije moguće zaključiti koliko iznosi taj vremenski period u prirodnim vremenskim uvjetima i koliko će premaz biti otporan na koroziju. Razlog tome je što se u stvarnim životnim situacijama korozija može pojaviti čak i godinama nakon izlaganja korozivnoj okolini. Stoga se test u slanoj komori mora uzeti samo kao pokazatelj ishoda u realnom okruženju.

5.2.1. Priprema slane komore

Ispitni uzorci, zavarene pločice, stavljaju se u zatvorenu komoru (slika 5.21.) i izlažu promjeni klime koja se sastoji od tri ciklusa koji se ponavljaju u vremenskom periodu od sedam dana tj. u 168 sati.



Slika 5.21. Pripremljena komora s uzorcima

Jedan ciklus sastoji se od kontinuiranog izlaganja prskanju neutralnom otopinom slane vode (pH je po standardu zadan od 6,5 do 7,2) u trajanju od 4 sata brzinom od 1,0 do 2,0 ml/80 cm²/sat pri temperaturi od +35 °C. Nakon toga slijedi 2 sata sušenja na zraku u klimi od 20 do 30% RH na +60 °C i zadnji dio ciklusa je, također, u trajanju od 2 sata, a izlaže se klimi kondenzacijske vode tzv. vlaženje od 95 do 100% RH vlage na +50 °C (tablica 5.5.). Zbroj trajanja jednog ciklusa iznosio je 8 sati, što bi u tjedan dana iznosilo 21 ciklus.

Tablica 5.5. Režimi rada slane komore i njihovo trajanje

| Režim rada: | Vrijeme trajanja (h) |
|-------------|----------------------|
| Prskanje | 4 |
| Sušenje | 2 |
| Vlaženje | 2 |

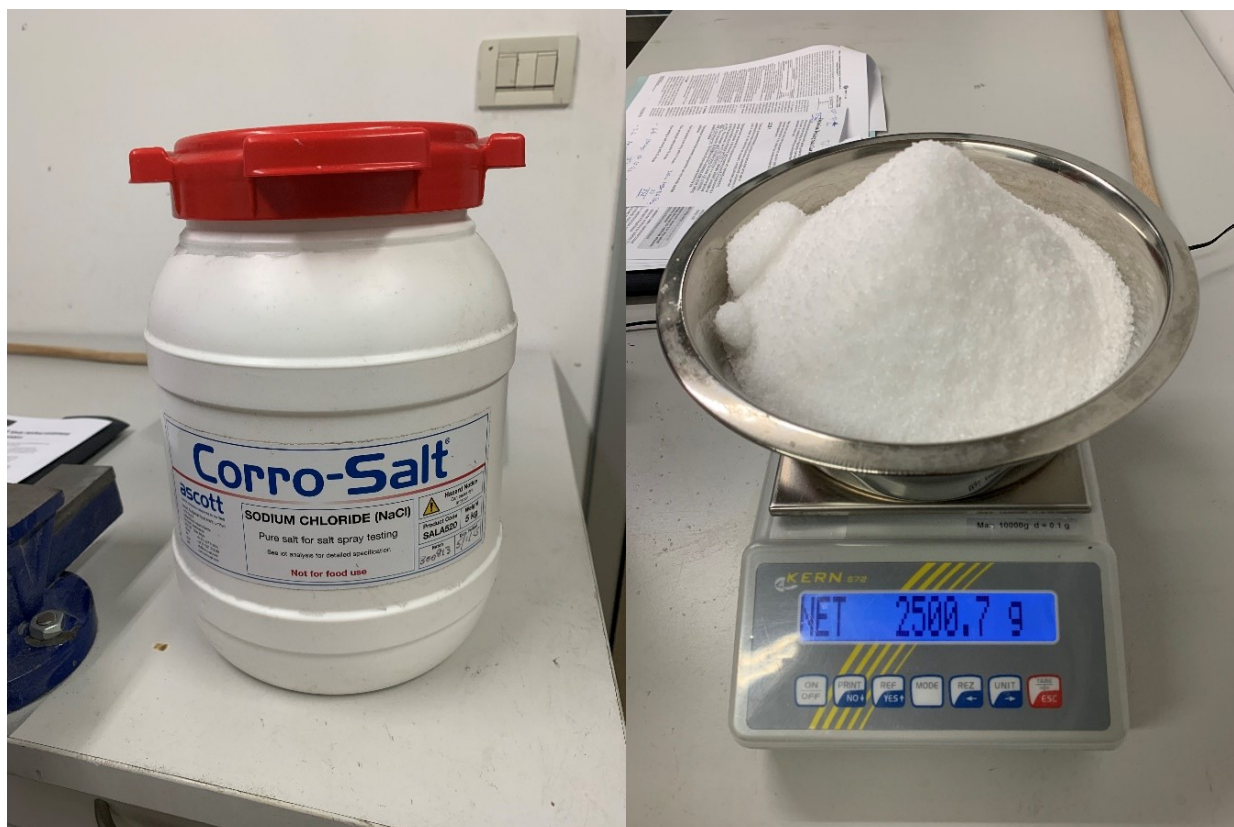
Za pokretanje rada slane komore potrebno je prvo pripremiti sve parametre koji su zadani standardom. Proveden je 24-satni ciklus ispitivanja s praznom komorom i praćena je temperatura koja mora biti u toleranciji 35 °C ± 2 °C. Osim temperature potrebno je provjeriti i pH otopine soli unutar spremnika otopine. Otopina je pripremljena u količini od 50 litara (slika 5.22.)

destilirane vode u kojoj je otopljeno 2,5 kilograma čiste soli, također, proizvođača Ascott naziva Corro-Salt (slika 5.23.).

Prema standardu, temperatura zasićenosti zraka mora biti između 46 i 49 °C (u eksperimentu - 47 °C), dok pritisak u raspršivaču maglice mora biti od 0,83 do 1,24 bar (u eksperimentu - 1 bar).



Slika 5.22. Destilirana voda količine 50 litara



Slika 5.23. Corro-Salt specijalizirana sol za Ascott slanu komoru

Tijekom ispitivanja potrebno je bilježiti podatke na dnevnoj bazi prema ISO 9227 – 2017(E) standardu (slika 5.24.). Podatke navedene u tablici potrebno je zapisati odnosno pratiti minimalno 24 sata ili maksimalno do 96 sati ukoliko je subota i nedjelja ili praznici.

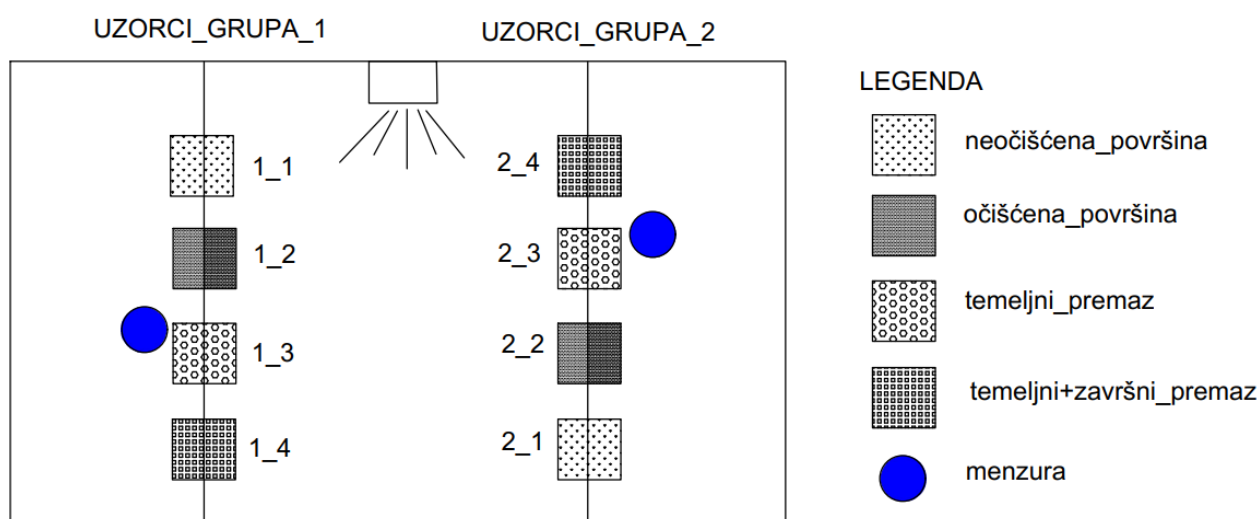
| Datum | Sati | Temperatura u komori (°C) | Temperatura zasićenog zraka (°C) | Prikupljeno ml/h (2 menzure) | pH prikupljene otopine | Slanost otopine | Brzina pumpe | Tlak zraka u raspršivaču (bar) | Režimi rada komore |
|-------|------|---------------------------|----------------------------------|------------------------------|------------------------|-----------------|--------------|--------------------------------|--------------------|
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |

Slika 5.24. ISO 9227-2017(E) tablica za praćenje podataka [61]

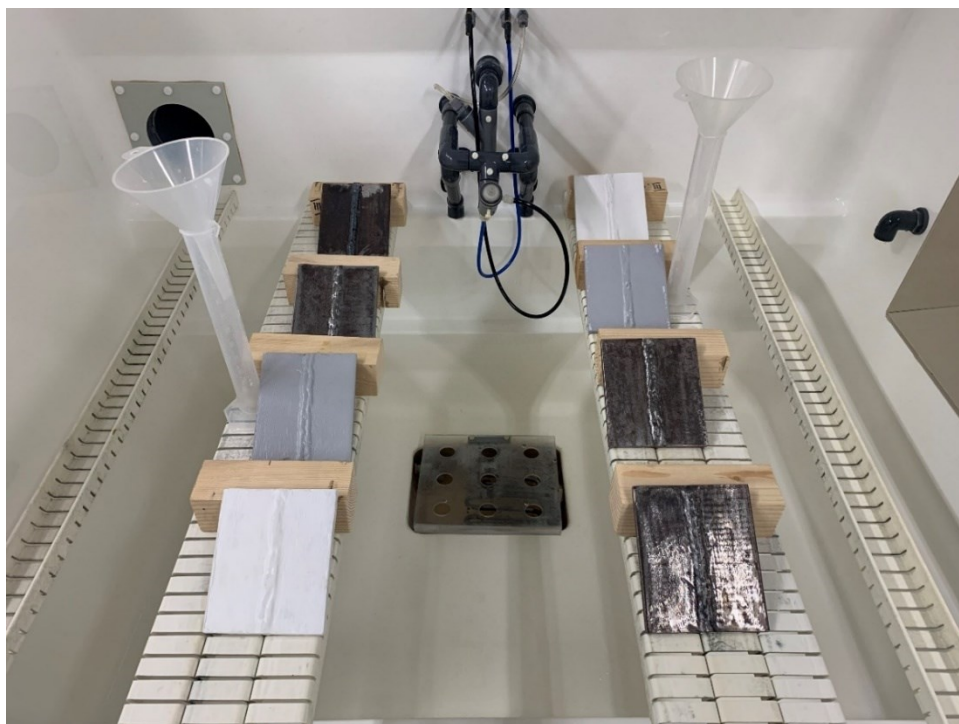
5.2.2. Početak ispitivanja

Dana 3.5.2022. (utorak) u 09:33 puštena je u rad slana komora s ispitnim uzorcima prema rasporedu u slanoj komori kao na slici 5.25. Uzorci su postavljeni pod nagibom od 30 stupnjeva na drvene grede kako bi otjecala otopina natrijevog klorida tj. stvorena maglica (slika 5.26.).

U slanu komoru osim uzoraka postavljene su i dvije menzure tzv. tornjevi koje je potrebno pozicionirati na dvije različite strane kako bi se prikupila maglica i iz nje očitala količina u mililitrima. Razlog pozicioniranja tornjeva na dvije različite strane leži u saznanju da uvjeti u slanoj komori nisu svugdje identični.



Slika 5.25. Raspored uzoraka u slanoj komori



Slika 5.26. Lokacija uzoraka u slanoj komori prije pokretanja

Iz bazena otopine uzeta je mala količina kako bi se odredio pH i gustoća otopine natrijeva klorida bazirano na temperaturi otopine. Prilikom mjerenja temperature dobivena je vrijednost 5%-tne NaCl otopine od 24 °C, vidljivo na slici 5.27.



Slika 5.27. Temperatura NaCl otopine na početku testiranja

Za navedenu temperaturu od 24 °C gustoća otopine je iznosila 1,032 g/cm³, dok je pH iznosio 7,09 (Slika 5.28.).



Slika 5.28. Očitavanje gustoće i pH otopine

U tablici 5.6. prikazani su prikupljeni podaci za 5%-tnu NaCl otopinu prije pokretanja slane komore.

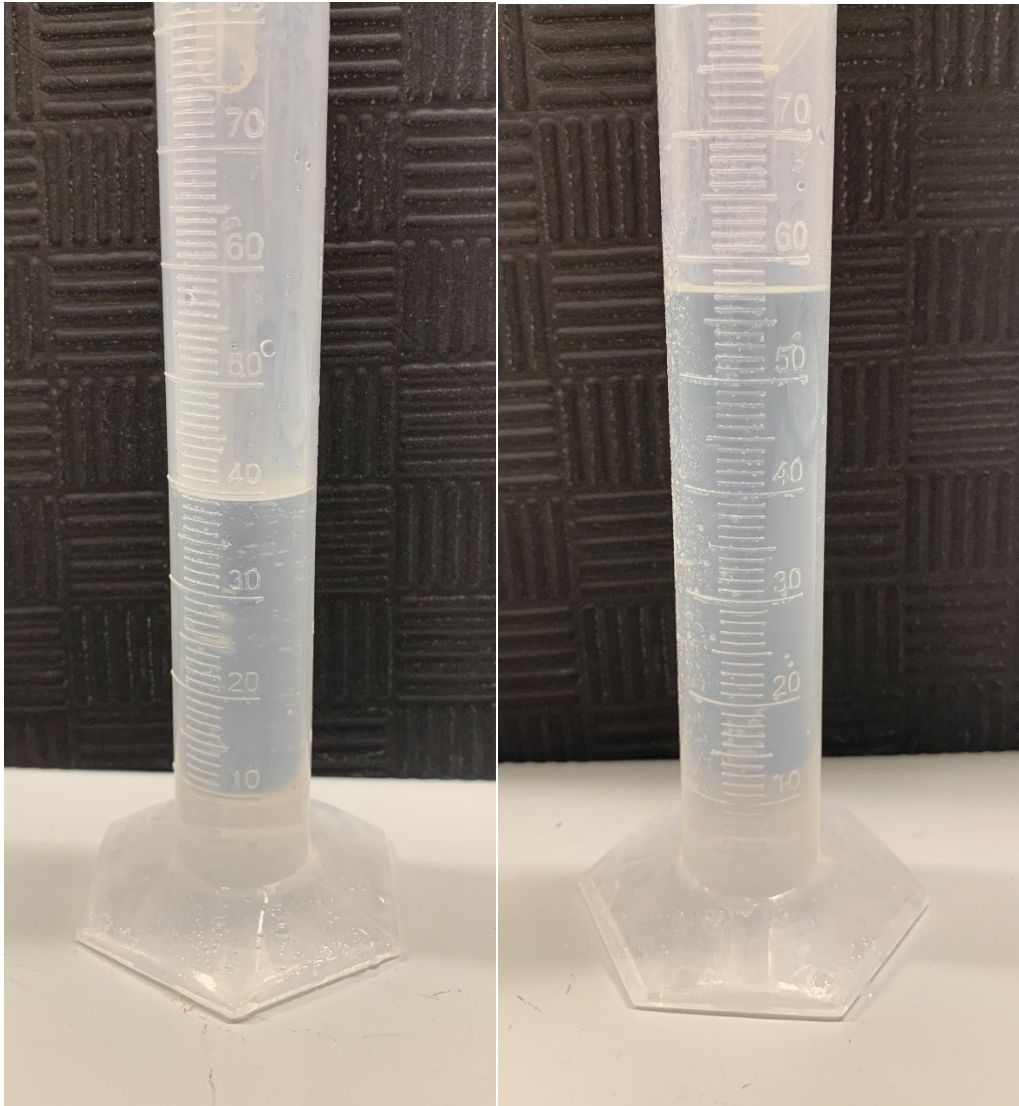
Tablica 5.6. Podaci 5%-tne NaCl otopine prije pokretanja

| 5%-tna NaCl otopina | |
|-----------------------|-------------------------|
| Temperatura: | 24 °C |
| pH vrijednost: | 7,09 |
| Gustoća: | 1,032 g/cm ³ |

5.2.3. Nakon 72 sata ispitivanja

Prva provjera uzoraka učinjena je nakon tri dana, odnosno 72 sata nakon pokretanja eksperimenta u slanoj komori. Komora se otvorila u petak 6.5.2022. u 10:00 h kako bi se provjerili i zarotirali uzorci u slanoj komori zbog nejednoličnih uvjeta unutar komore. Osim uzoraka provjerena je i količina prikupljene maglice u menzurama kako bi se vidjelo je li sve u zadanim granicama. U roku od 72 sata potrebno je prikupiti u menzurama od 36 do 72 ml maglice. Ustanovljeno je da su

obje količine u zadanim granicama (Slika 5.29.), menzura na lijevoj strani pokazuje količinu od 39,5 ml, dok ona s desne strane 58 ml, što potvrđuje nejednakost uvjeta u komori.



Slika 5.29. Količina prikupljene maglice u menzurama nakon 72 sata

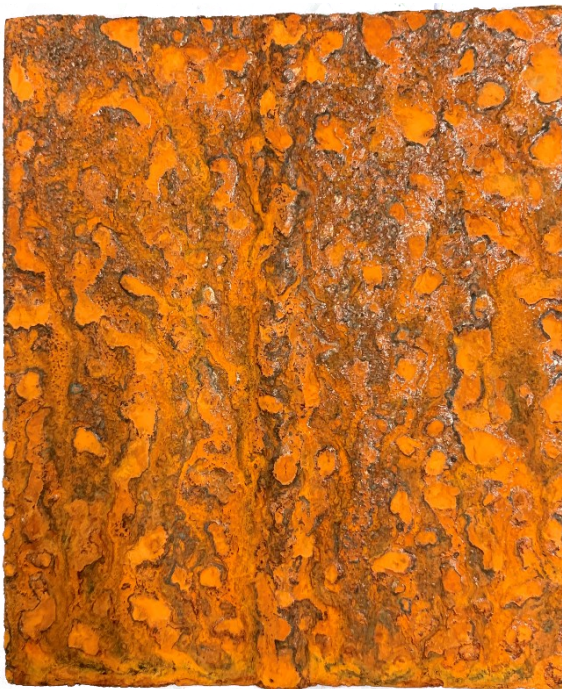
Na slikama od 5.30. do 5.33. prikazane su fotografije uzoraka nakon 72 sata ispitivanja u slanoj komori.



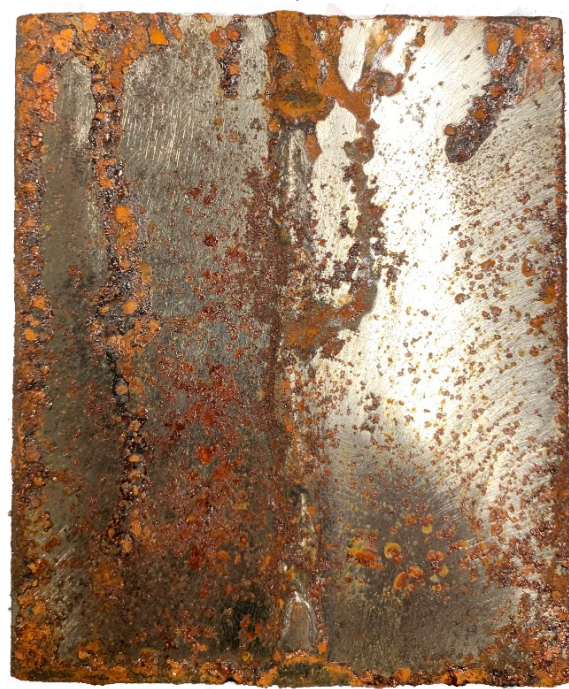
a)



b)



c)



d)

Slika 5.30. Uzorci nakon 72 sata: a) uzorak 1-1, lice zavara, b) uzorak 1-1, korijen zavara, c) uzorak 1-2, lice zavara, d) uzorak 1-2, korijen zavara



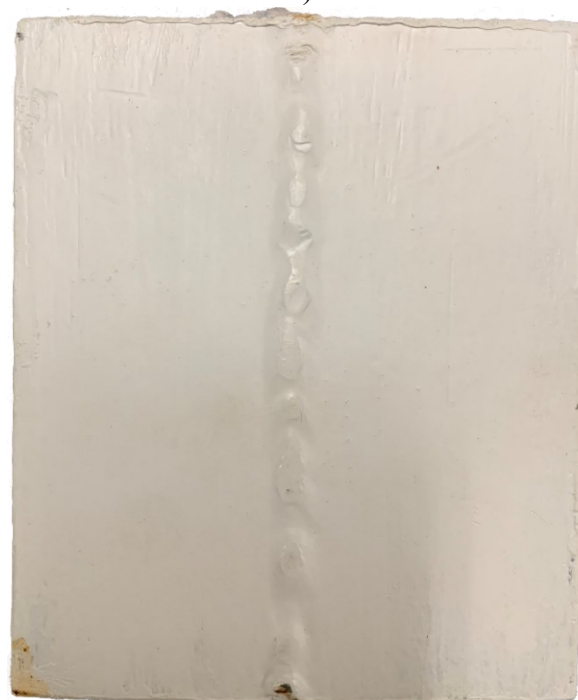
a)



b)



c)

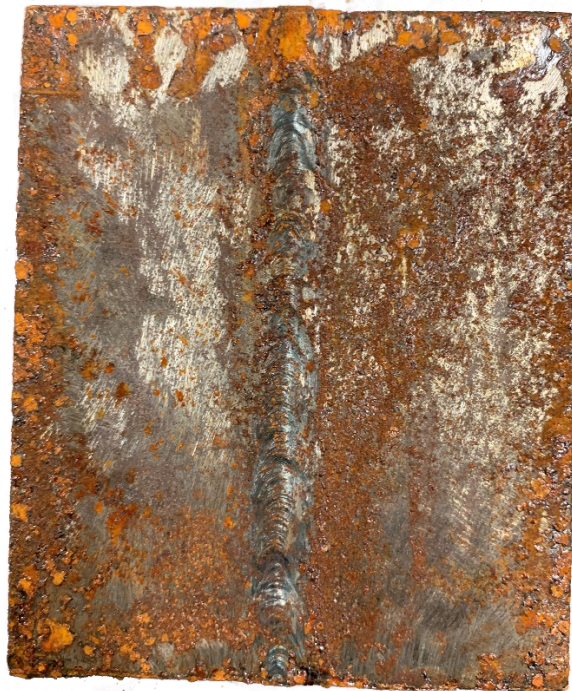


d)

Slika 5.31. Uzorci nakon 72 sata: a) uzorak 1-3, lice zavara, b) uzorak 1-3, korijen zavara, c) uzorak 1-4, lice zavara, d) uzorak 1-4, korijen zavara



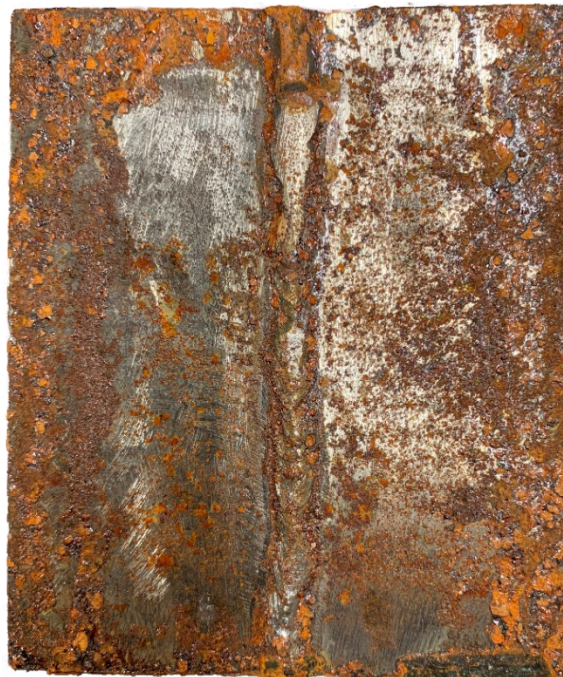
a)



b)

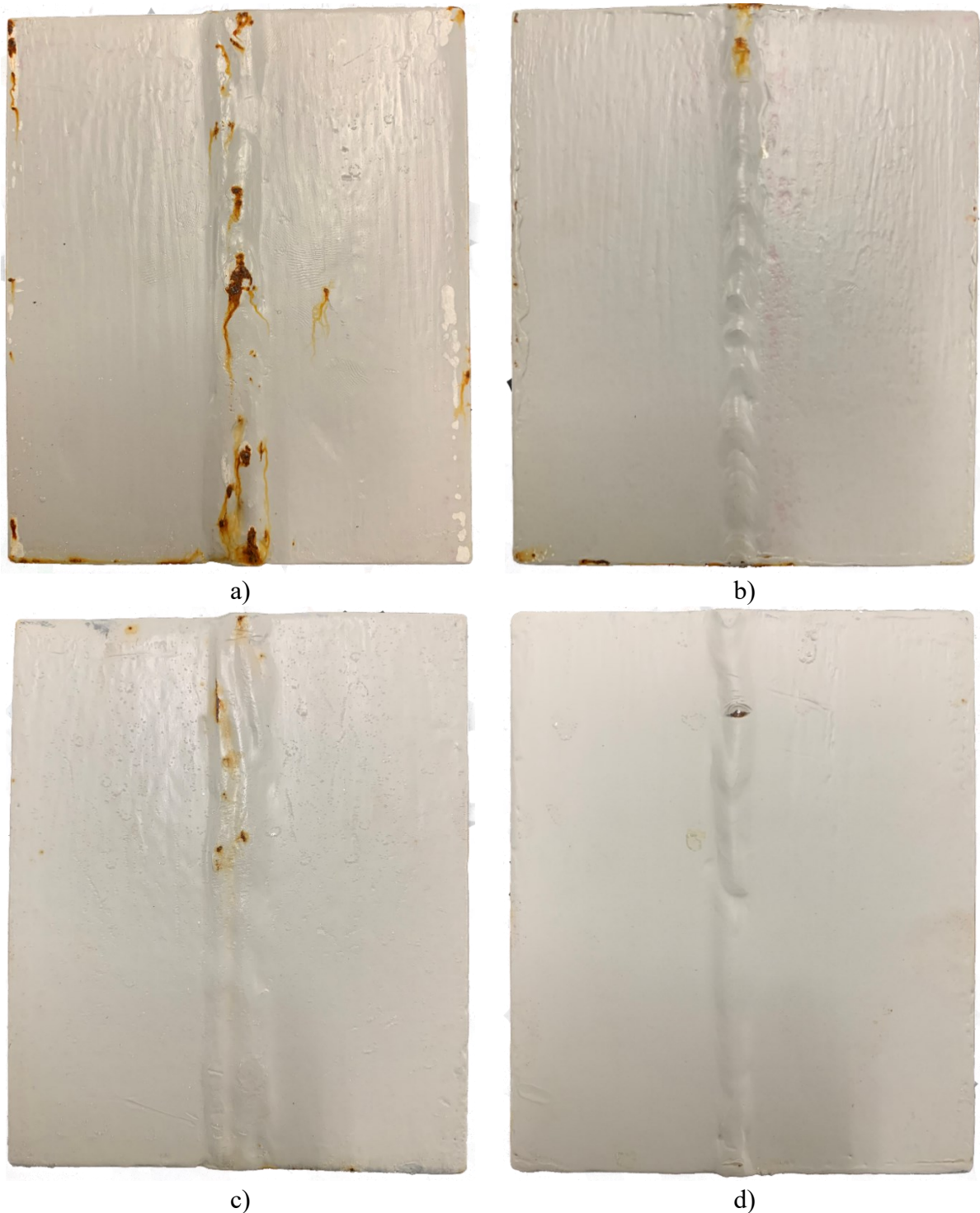


c)



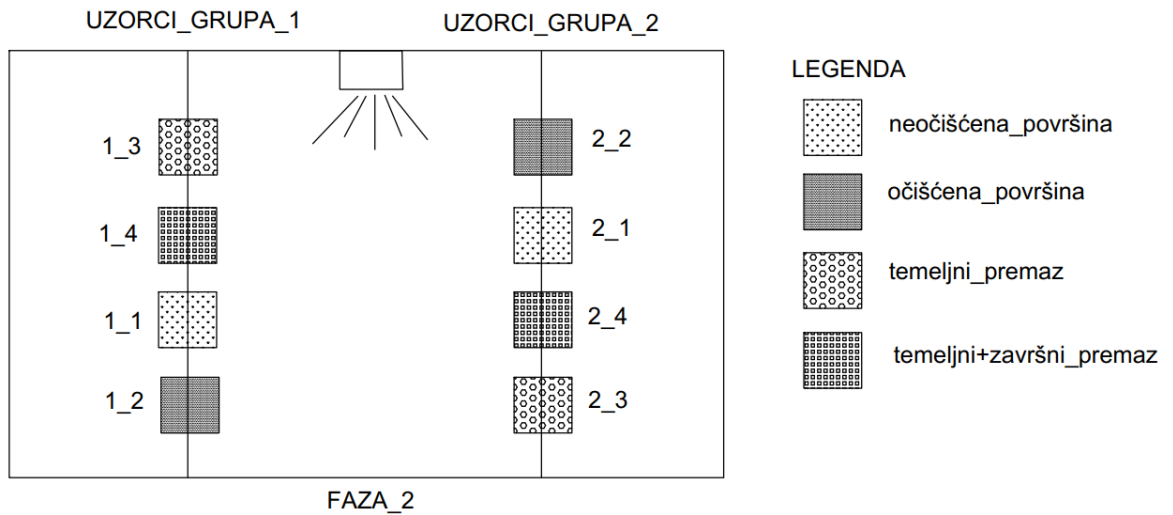
d)

Slika 5.32. Uzorci nakon 72 sata: a) uzorak 2-1, lice zavara, b) uzorak 2-1, korijen zavara, c) uzorak 2-2, lice zavara, d) uzorak 2-2, korijen zavara

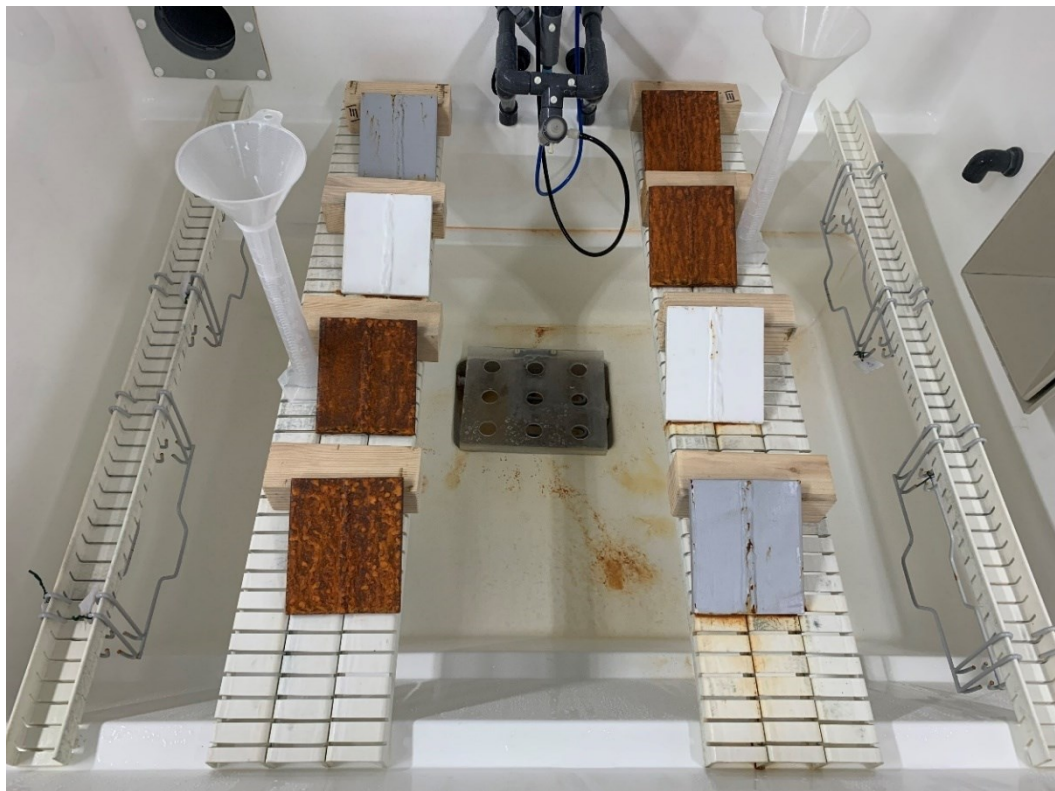


Slika 5.33. Uzorci nakon 72 sata: a) uzorak 2-3, lice zavara, b) uzorak 2-3, korijen zavara, c) uzorak 2-4, lice zavara, d) uzorak 2-4, korijen zavara

Zbog nejednolikih uvjeta u slanoj komori, dokazano prikupljenom količinom maglice, uzorci su se razmjestili unutar komore kao na slikama 5.34. i 5.35. Pregledom količine vode ustanovljeno je da potrošnja vode za izradu maglice iznosi oko 10 litara na dnevnoj bazi. U bazen s NaCl otopinom dodano je još 32,2 litre destilirane vode koja je prije izmiješana s Corro-Salt soli u količini od 1,61 kg i puštena kako bi postigla istu temperaturu kao i otopina u bazenu.



Slika 5.34. Razmještaj uzoraka u slanoj komori



Slika 5.35. Lokacija uzoraka u slanoj komori nakon razmještaja

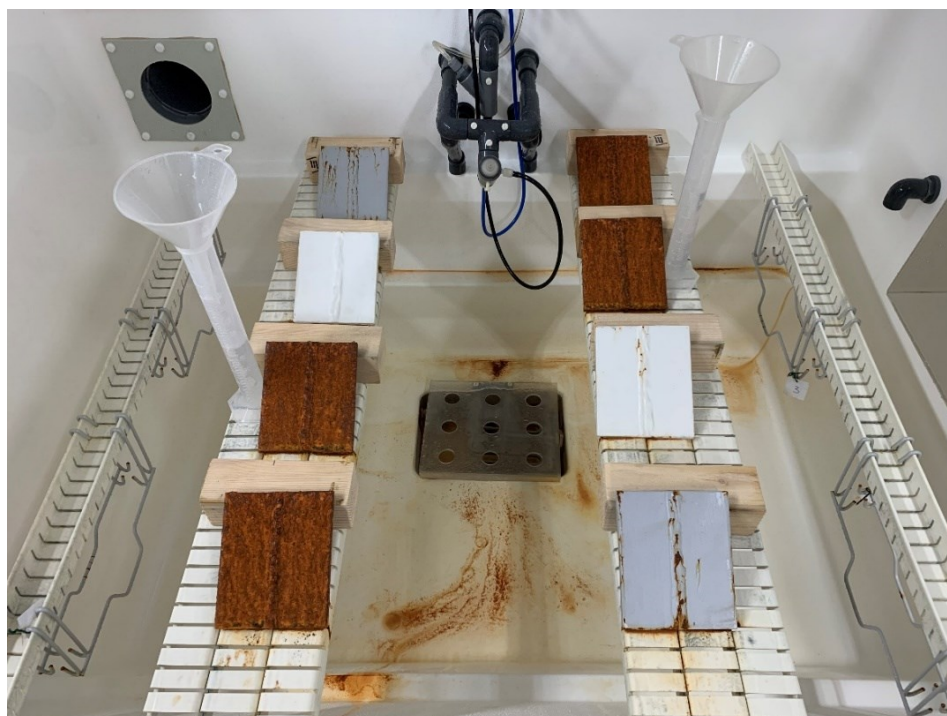
5.2.4. Nakon 168 sati – kraj ispitivanja

Nakon 168 sati rada slane komore i 21 ciklusa, slana komora prestaje s radom 10.5.2022. u 10:35 sati. Princip prikupljanja podataka je identičan kao i nakon 72 sata tijekom pauze (slika 5.36.). Na

drugo slici 5.37. je prikazan trenutak nedugo nakon otvaranja slane komore. Na dnu komore mogu se vidjeti korozivski produkti koji su „odneseni“ s površine uzoraka.

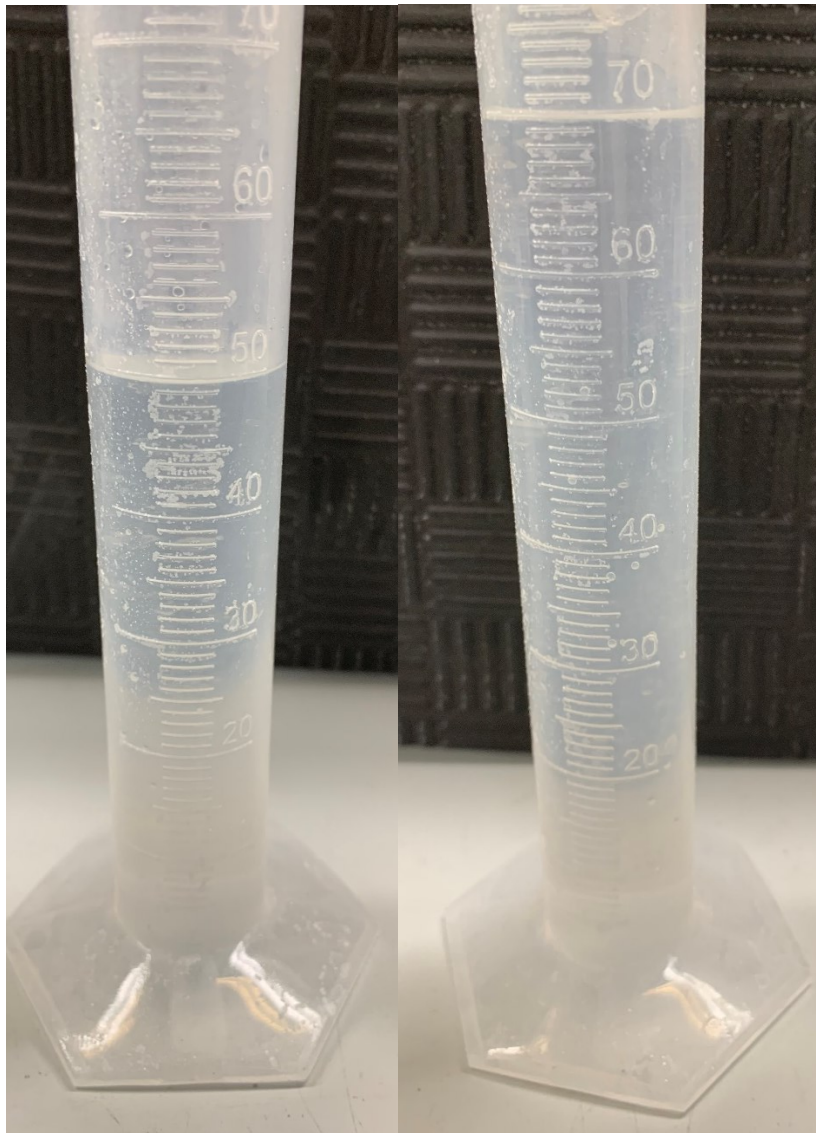


Slika 5.36. Otvaranje komore nakon 168 sati



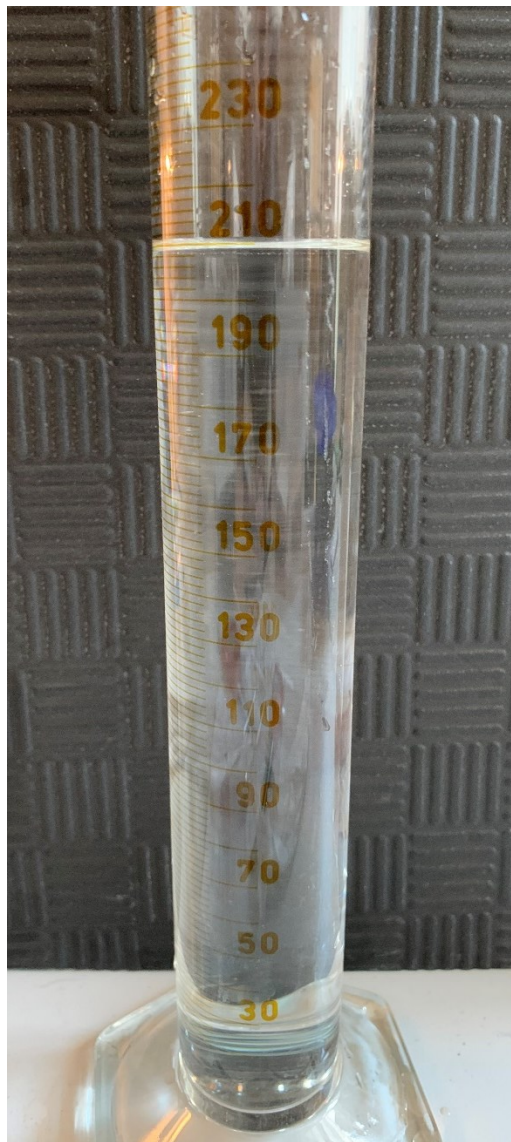
Slika 5.37. Prikaz završetka rada slane komore nakon 168 sati na upravljačkoj ploči slane komore

Količina maglice koja se skupila nakon pauze (72 sata) do kraja eksperimenta (168 sati) odnosno u vremenskom periodu od 96 sati (četiri dana), lijeva menzura je prikupila 49 ml, dok je ona postavljena s desne strane prikupila 69 ml (slika 5.38.).



Slika 5.38. Količina prikupljene maglice nakon 96 sati

Maglica koja se prikupila nakon 72 sata bila je spremljena u staklenu posudu i dobro zatvorena kako ne bi isparila, zbog potrebe zbrajanja čitave količine prikupljene maglice na kraju ispitivanja. Lijeva menzura je prikupila 39,5 ml i 48 ml nakon 96 sati rada slane komore, a desna 58 ml i 69 ml. Što bi značilo da se u lijevoj nalazi ukupno 87,5 ml, dok u desnoj 127 ml. Zbroj lijeve i desne menzure iznosi 214,5 ml ukupno prikupljene maglice (slika 5.39.).



Slika 5.39. Ukupno prikupljena maglica nakon 168 sati rada slane komore

Na slici se vidi količina prikupljene maglice od 211 ml, a gubici se mogu pripisati ispravanju i gubitku prilikom izlivanja u veću menzuru. Dobiveni rezultati odgovaraju zadanim granicama koji nalažu da u vremenskom razdoblju od 168 sati treba biti prikupljeno između 84 ml i 168 ml, što je u ovom slučaju zadovoljeno. Prikupljena količina maglice za svaku menzuru podijelila se s donjom granicom od 84 ml, te su dobivene količina prikupljene maglice u mililitrima po jednom satu.

$$87,5 \div 84 = 1,04 \text{ ml/h} \quad (5.1)$$

$$127 \div 84 = 1,51 \text{ ml/h} \quad (5.2)$$

Izračunavanjem su dobivene vrijednosti za pojedine menzure, u lijevoj menzuri je ta vrijednost iznosila 1,04 ml/h dok ona u desnoj 1,51 ml/h.

pH vrijednost maglice nakon mjerenja iznosi 4,57 pri temperaturi od 25 °C. Može se zaključiti da se pH izrazito smanjio zbog isparavanja tijekom rada slane komore pod režimima grijanja i vlaženja zbog visokih temperatura od 50 i 60 °C (slika 5.40.).



Slika 5.40. pH vrijednost prikupljene maglice nakon 168 sati rada slane komore

Zbog isparavanja dolazi i do povećanja gustoće prikupljene maglice koja iznosi 1,038 g/cm³.

Osim prikupljene maglice bilo je potrebno provjeriti pH i gustoću smjese NaCl otopine koja je ostala u bazenu. Sa slike 5.41. je vidljivo da je vrijednost pH otopine 7,12, a gustoća 1,0315 g/cm³.



Slika 5.41. Gustoća i pH vrijednost otopine NaCl nakon 168 sati

U tablici 5.7. prikazane su prikupljene vrijednosti za 5%-tnu NaCl otopinu i za prikupljenu maglicu koja se nalazila u menzurama nakon 168 sati u slanoj komori na kraju ispitivanja.

Tablica 5.7. Podaci 5%-tne NaCl otopine i maglice nakon 168 sati rada slane komore

| 5%- tna NaCl otopina | |
|-----------------------------|--------------------------|
| Temperatura: | 25 °C |
| pH vrijednost: | 7,12 |
| Gustoća: | 1,0315 g/cm ³ |
| Prikupljena maglica | |
| Temperatura: | 25 °C |
| pH vrijednost: | 4,57 |
| Gustoća: | 1,038 g/cm ³ |

Na slikama 5.42. do 5.45. evidentirani su uzorci kako bi se u poglavlju rezultati istraživanja mogli usporediti tijekom cijelog procesa provedenog u slanoj komori.



a)



b)



c)



d)

Slika 5.42. Uzorci nakon 168 sati: a) uzorak 1-1, lice zavara, b) uzorak 1-1, korijen zavara, c) uzorak 1-2, lice zavara, d) uzorak 1-2, korijen zavara



a)



b)



c)



d)

Slika 5.43. Uzorci nakon 168 sati: a) uzorak 1-3, lice zavara, b) uzorak 1-3, korijen zavara, c) uzorak 1-4, lice zavara, d) uzorak 1-4, korijen zavara



a)



b)

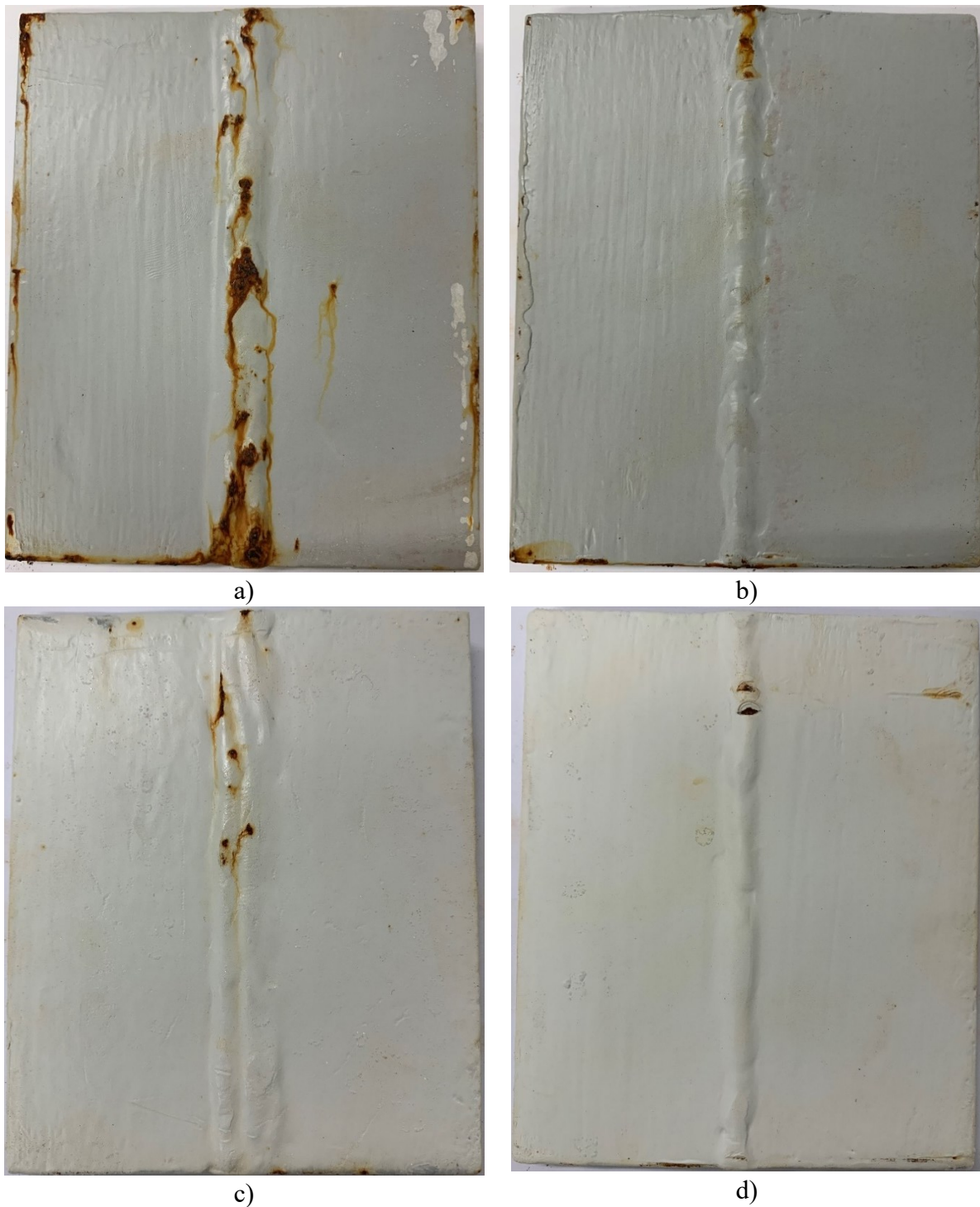


c)



d)

Slika 5.44. Uzorci nakon 168 sati: a) uzorak 2-1, lice zavara, b) uzorak 2-1, korijen zavara, c) uzorak 2-2, lice zavara, d) uzorak 2-2, korijen zavara



Slika 5.45. Uzorci nakon 168 sati: a) uzorak 2-3, lice zavara, b) uzorak 2-3, korijen zavara, c) uzorak 2-4, lice zavara, d) uzorak 2-4, korijen zavara

U tablici 5.8. su navedeni svi podaci koji su bili praćeni tijekom 21. ciklusa u 168 sati rada slane komore. Podaci su praćeni na dnevnoj bazi osim vikenda, po mogućnosti u sva tri režima: špricanje, grijanje i vlaženje. Zapisano je točno vrijeme svake kontrole, a bilježili su se: temperatura u komori, temperatura zasićenog zraka, količina prikupljene maglice, pH prikupljene otopine, slanost otopine, brzina pumpe, tlak zraka u raspršivaču i navedeni režimi rada komore.

Tablica 5.8. Tablica praćenja režima rada slane komore

| Datum | Sati | Temperatura u komori (°C) | Temperatura zasićenog zraka (°C) | Prikupljeno ml/h (2 menzure) | | pH prikupljene otopine | Slanost otopine | Brzina pumpe | Tlak zraka u raspršivaču (bar) | Režimi rada komore |
|-----------------------------|-------|---------------------------|----------------------------------|------------------------------|-----------|------------------------|-----------------|--------------|--------------------------------|--------------------|
| | | | | 1 (lijeva) | 2 (desna) | | | | | |
| 3.5.2022. | 10:30 | 37 | 47 | - | - | - | 5 | 25 | 1 | špricanje |
| | 11:40 | 35 | 47 | - | - | - | - | 25 | 0,9 | špricanje |
| | 14:45 | 60,2 | 47,3 | - | - | - | - | - | - | grijanje |
| | 16:45 | 50,5 | 47,1 | - | - | - | - | - | 0,95 | vlaženje |
| 4.5.2022. | 11:30 | 35,1 | 47 | - | - | - | - | - | 0,97 | špricanje |
| | 14:20 | 59,4 | 47,2 | - | - | - | - | - | - | grijanje |
| | 16:55 | 50,1 | 47,1 | - | - | - | - | - | - | vlaženje |
| | 22:13 | 58,4 | 47 | - | - | - | - | - | - | grijanje |
| 5.5.2022. | 8:35 | 50,5 | 47,1 | - | - | - | - | - | - | vlaženje |
| | 11:20 | 35 | 47 | - | - | - | - | - | 0,98 | špricanje |
| | 15:00 | 60,1 | 47 | - | - | - | - | - | - | grijanje |
| | 19:00 | 50,3 | 47 | - | - | - | - | - | 1 | špricanje |
| 6.5.2022. pauza | 8:35 | 50,3 | 46,9 | - | - | - | - | - | - | vlaženje |
| | 10:00 | - | - | 39,5 | 58 | - | - | - | - | - |
| | 12:35 | 35 | 47 | - | - | - | - | - | - | špricanje |
| | 9:25 | 50,2 | 47,1 | - | - | - | - | - | - | vlaženje |
| 9.5.2022. | 12:15 | 35 | 47 | - | - | - | - | - | 1,1 | špricanje |
| | 15:55 | 60 | 47,2 | - | - | - | - | - | - | grijanje |
| | 17:10 | 50,6 | 47,1 | - | - | - | - | - | - | vlaženje |
| | 19:40 | 35,5 | 47 | - | - | - | - | - | - | špricanje |
| 10.5.2022. zaustavljanje | 10:23 | 50 | 46,9 | - | - | - | - | - | - | grijanje |
| | 10:35 | - | - | 49 | 69 | - | - | - | - | - |

5.3. Rezultati eksperimenta

5.3.1. Ispitivanje u slanoj komori

Na slikama od 5.46. do 5.53. prikazane su fotografije uzoraka zavarenih spojeva tijekom čitavog eksperimenta počevši od ispitivanja penetrantima, prije pokretanja komore, nakon 72 sata u slanoj komori te na kraju eksperimenta, nakon 168 sati provedenih u slanoj komori.

Uzorci 1-1 i 2-1 neočišćenih površina te uzorci očišćenih površina 1-2 i 2-2 u potpunosti su prekriveni korozivnim produktom već nakon prve provjere nakon 72 sata u slanoj komori. Zaključuje se da neovisno o načinu obrade površine bilo neočišćena ili očišćena pod utjecajem slane atmosfere ukoliko zavareni spoj nije zaštićen premazima dolazi do opće korozije.

Uzorci 1-3 i 2-3 koji su zaštićeni s dva sloja temeljnog premaza u slanoj atmosferi prikazuju vrlo dobru otpornost na koroziju te se ona pojavljuje lokalno na dijelovima zavara i površini uzorka gdje je nastupilo probijanje temeljnog premaza.

Uzorci 1-4 i 2-4 zaštićeni s dva sloja temeljnog premaza i dva sloja završnog premaza daju zavarenom spoju vrlo visoku zaštitu nakon 72 i 168 sata u slanoj komori, a korozivni produkti prisutni su samo na zavarenoj površini.



a)



b)



c)



d)

Slika 5.46. Uzorak 1-1: a) ispitivanje penetrantom, b) početak ispitivanja, c) nakon 72 sata, d) nakon 168 sati



a)



b)



c)



d)

Slika 5.47. Uzorak 1-2: a) ispitivanje penetrantom, b) početak ispitivanja, c) nakon 72 sata, d) nakon 168 sati

nije provedeno



a)

b)



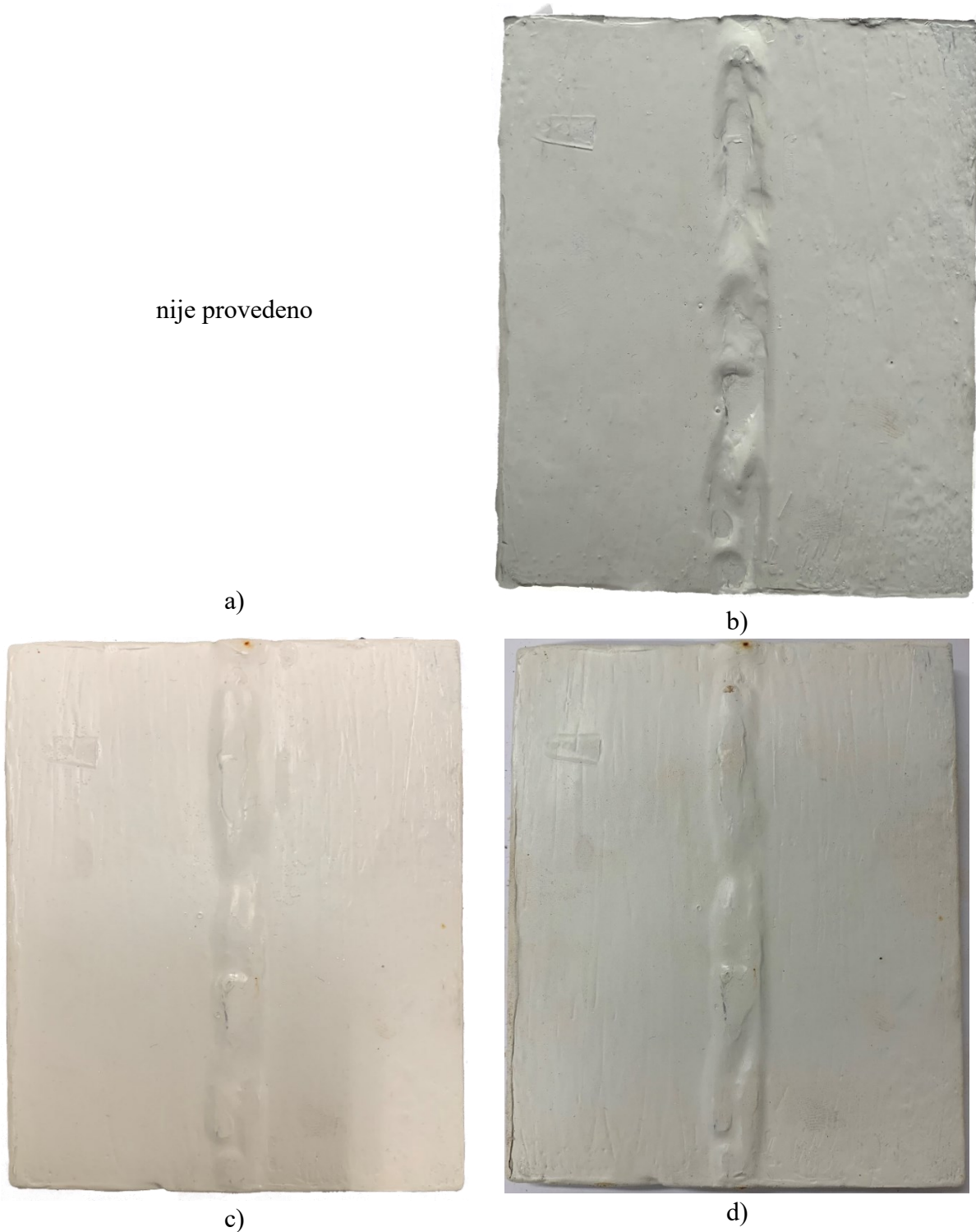
c)

d)



Slika 5.48. Uzorak 1-3: a) ispitivanje penetrantom, b) početak ispitivanja, c) nakon 72 sata, d) nakon 168 sati

nije provedeno



Slika 5.49. Uzorak 1-4: a) ispitivanje penetrantom, b) početak ispitivanja, c) nakon 72 sata, d) nakon 168 sati



a)



b)

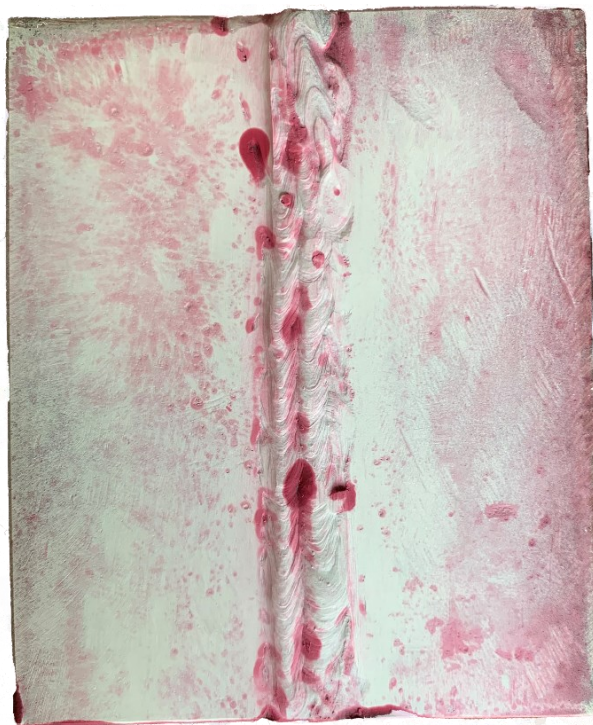


c)



d)

Slika 5.50. Uzorak 2-1: a) ispitivanje penetrantom, b) početak ispitivanja, c) nakon 72 sata, d) nakon 168 sati



a)



b)



c)



d)

Slika 5.51. Uzorak 2-2: a) ispitivanje penetrantom, b) početak ispitivanja, c) nakon 72 sata, d) nakon 168 sati



a)



b)

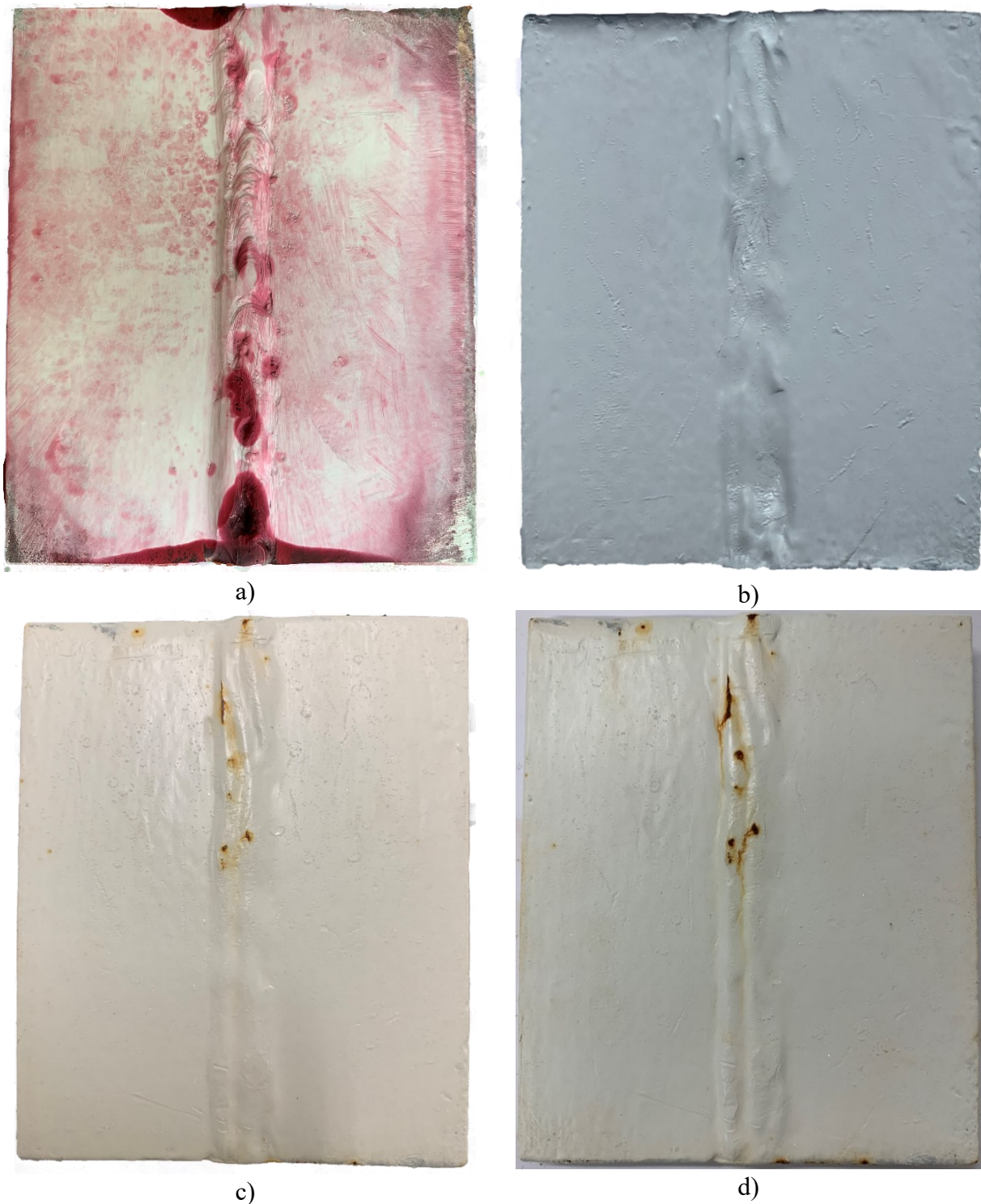


c)



d)

Slika 5.52. Uzorak 2-3: a) ispitivanje penetrantom, b) početak ispitivanja, c) nakon 72 sata, d) nakon 168 sati

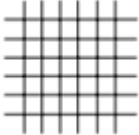
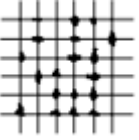
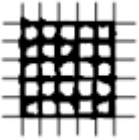

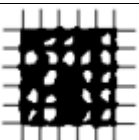


Slika 5.53. Uzorak 2-4: a) ispitivanje penetrantom, b) početak ispitivanja, c) nakon 72 sata, d) nakon 168 sati

5.3.2. Ispitivanje prionjivosti

Ispitivanje prionjivosti premaza provedeno je metodom urezivanja mrežice pomoću uređaja Elcometer 107 koji se temelji na standardu ISO 2409:2022, a utvrđuje ispitnu metodu za ocjenjivanje otpornosti premaza boje od odvajanja od glavne površine. Opisana metoda može se

koristiti na način prošao ili nije prošao ili na temelju vizualne procjene pomoću tabličnih vrijednosti (slika 5.54.). Ispitivanje se može provesti na gotovim predmetima i/ili na posebno pripremljenim uzorcima. Navedena metoda spada pod destruktivne metode ispitivanja.

| Klasifikacija | Opis | Izgled površine zarezivanjem mrežice |
|---------------|--|---|
| 0 | Rubovi su potpuno glatki, nijedan kvadratić mrežice nije oštećen ni oljušten |  |
| 1 | Vrlo malo premaza je oštećeno i oljušteno na području sjecišta ureza. Manje od 5% površine je oštećeno. |  |
| 2 | Dio premaza oštećen je i oljušten na rubovima i sjecištima ureza u mrežici. 5 do 15% površine je oštećeno. |  |
| 3 | Premaz je oljušten na rubovima i po sjecištima ureza. 15 do 35% površine je oljušteno. |  |
| 4 | Premaz je oljušten duž rubova cijelih ureza, neki kvadratići su u potpunosti oljušteni. Sveukupno je oljušteno 35 do 65% površine |  |
| 5 | Više od 65% površine je oljušteno | - |

Slika 5.54. Skala za ocjenjivanje prionjivosti (HRN EN ISO 2409)



Postupak ispitivanja urezivanjem mrežice započinje urezivanjem mreže skalpelom po uzorku pod pravim kutem, a premaz se urezuje do osnovnog materijala. Nakon urezivanja potrebno je četkicom očistiti površinu zbog boljeg prljanjanja ljepljive vrpce. Ljepljivu vrpcu potrebno je zalijepiti preko dobivene mreže te povući naglo i jednolikom brzinom pod kutem od 60°. Posljednji korak koji se proveo je usporedba mrežice prema međunarodnom standardu ISO 2409.

Ispitivanje urezivanjem mrežice provedeno je na uzorcima koji sadrže premaze:


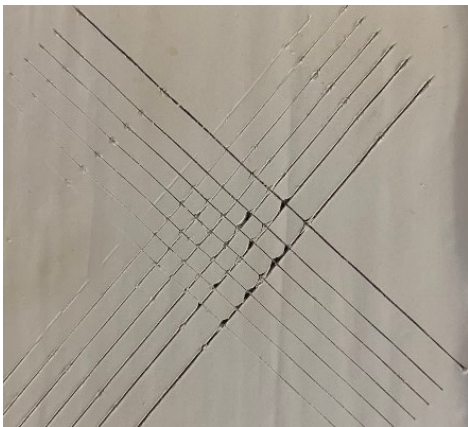
- Uzorak 1-3: uzorak grupe 1, temeljni premaz
- Uzorak 1-4: uzorak grupe 1, temeljni i završni premaz
- Uzorak 2-3: uzorak grupe 2, temeljni premaz
- Uzorak 2-4: uzorak grupe 2, temeljni i završni premaz

U tablici 5.9. i 5.10. prikazan je test provedenog ispitivanja urezivanja mrežice na uzorcima nakon slane komore u kojoj su proveli 168 sati te njihove ocjene prionjivosti.

Tablica 5. 9. Ispitivanje urezivanjem mrežice na uzorcima grupe 1

| Uzorak: | Slika | Ocjena prionjivosti nakon slane komore prema ISO 2409 |
|----------------|--|--|
| Uzorak 1-3 |  | 1 |
| Uzorak 1-4 |  | 1 |

Tablica 5. 10. Ispitivanje urezivanjem mrežice na uzorcima grupe 2

| Uzorak: | Slika | Ocjena prionjivosti nakon slane komore prema ISO 2409 |
|------------|---|---|
| Uzorak 2-3 |  | 2 |
| Uzorak 2-4 |  | 1 |

5.3.3. Vizualni pregled mikroskopom

Za vizualni pregled korozijskih produkata na uzorcima koristio se mikroskop Dino-Lite AM7515MT8A (slika 5.55.). Model AM7515MT8A je digitalni USB mikroskop s rezolucijom od 5 megapiksela, mogućnošću povećanja od 700 do 900 puta i ugrađenom opcijom koaksijalnog osvjetljenja. Koaksijalni način osvjetljenja omogućuje detaljniji uvid u detalje koje je teško uočiti pod normalnim svjetlom. Navedeni model sadrži mogućnost fleksibilne LED kontrole, izmjenu ili miješanje običnog i koaksijalnog osvjetljenja. Druga važna mogućnost je opcija automatskog očitavanja uvećanja (eng. *AMR – automatic magnification reading*) koji automatski prikazuje stupanj povećanja u Dino-Lite programskoj podršci za Windows koji dolazi s uređajem. Zbog svojih jedinstvenih značajki model Dino-Lite AM7515MT8A pogodan je za analizu materijala, kontrolu elektronike ili za druge slične poslove koji zahtijevaju koaksijalno osvjetljenje, visoku

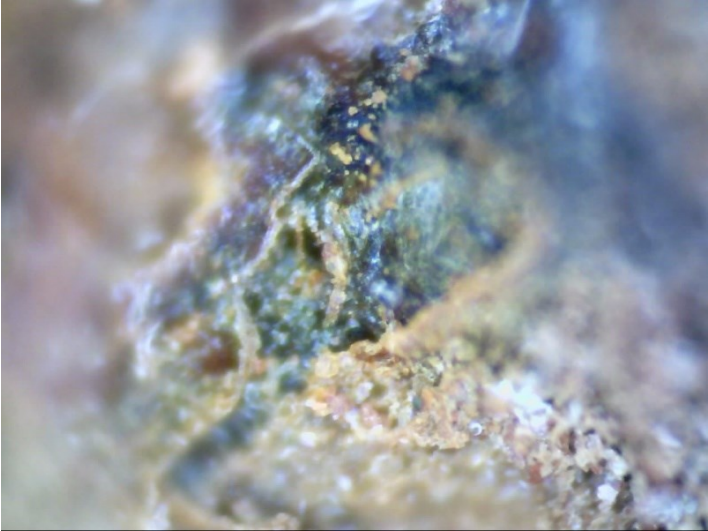
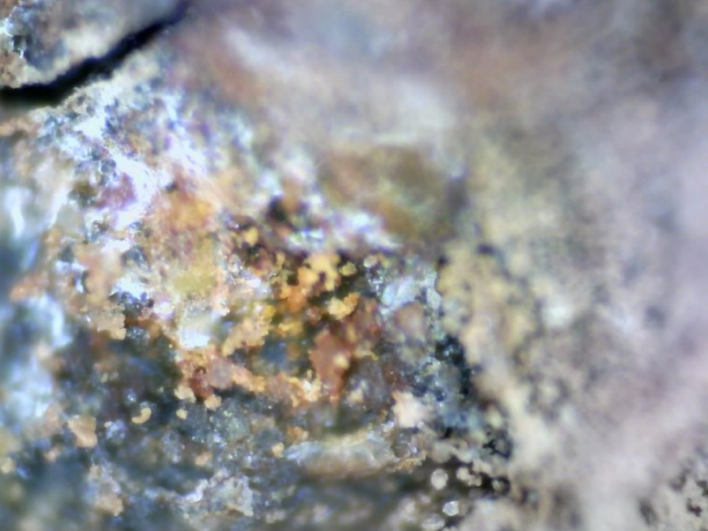
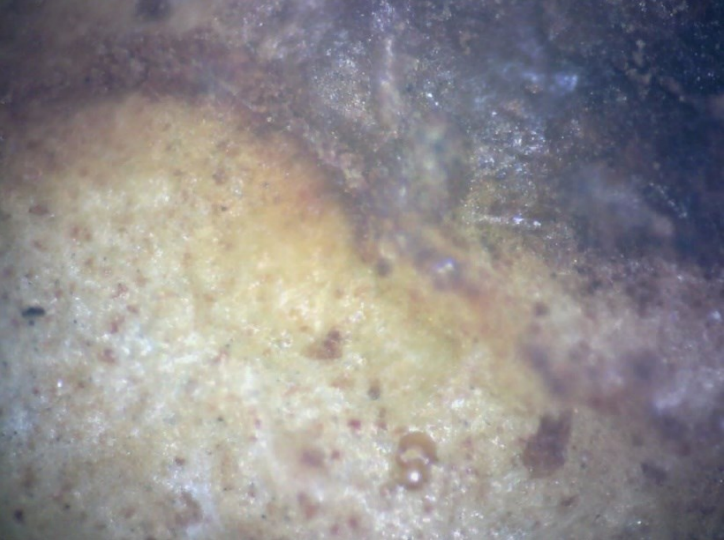
razinu povećanja, prenosivost i svestranost. Programska podrška DinoCapture 2.0 sadrži dodatne funkcije uz navedeni model kao što su automatsko očitavanje uvećanja, mjerenje, snimanje i označavanje fotografija, kalibracije te snimanje videozapisa.



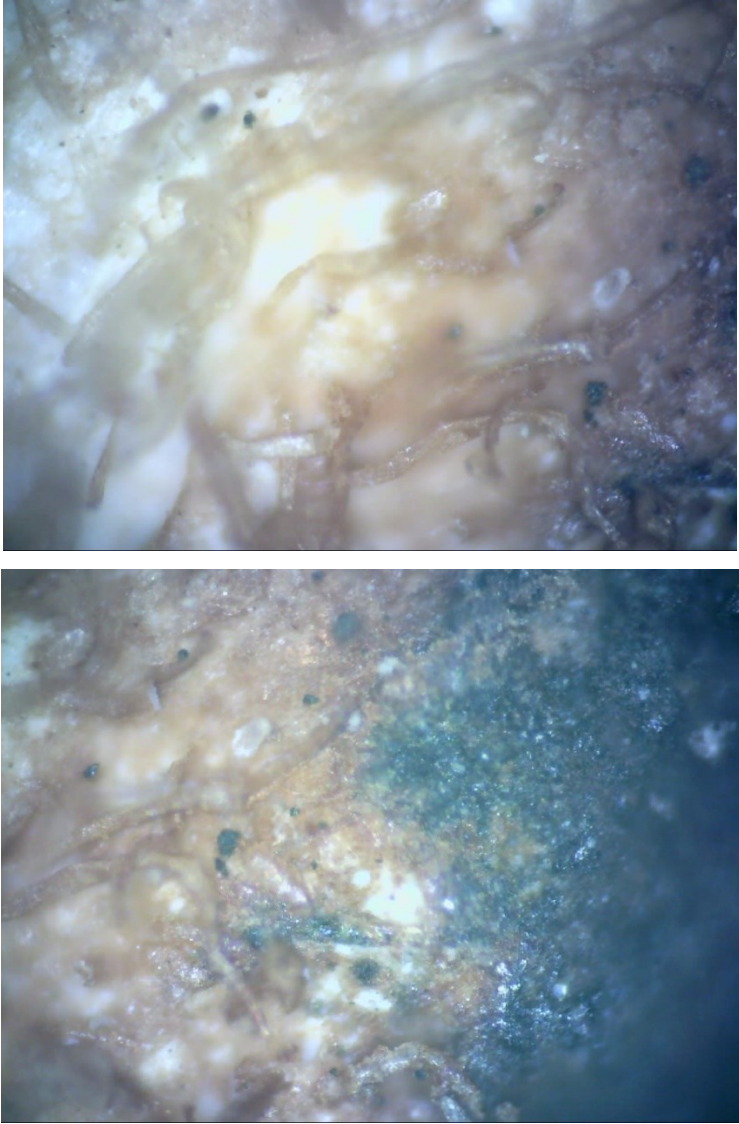
Slika 5.55. Dino-Lite AM7515MT8A

Za potrebe diplomskog rada pomoću mikroskopa Dino-Lite gledana su područja zavarenih spojeva na uzorcima kako bi se поближе uočili nastali korozivni produkti. Povećanje je bilo namješteno na 802,0 puta, a uzroci su gledani i fotografirani u kombinaciji običnog i koaksijalnog osvjetljenja zbog reljefnog oblika korozivnog produkta. U tablicama 5.11., 5.12., 5.13. i 5.14. prikazane su zabilježene fotografije uzoraka.

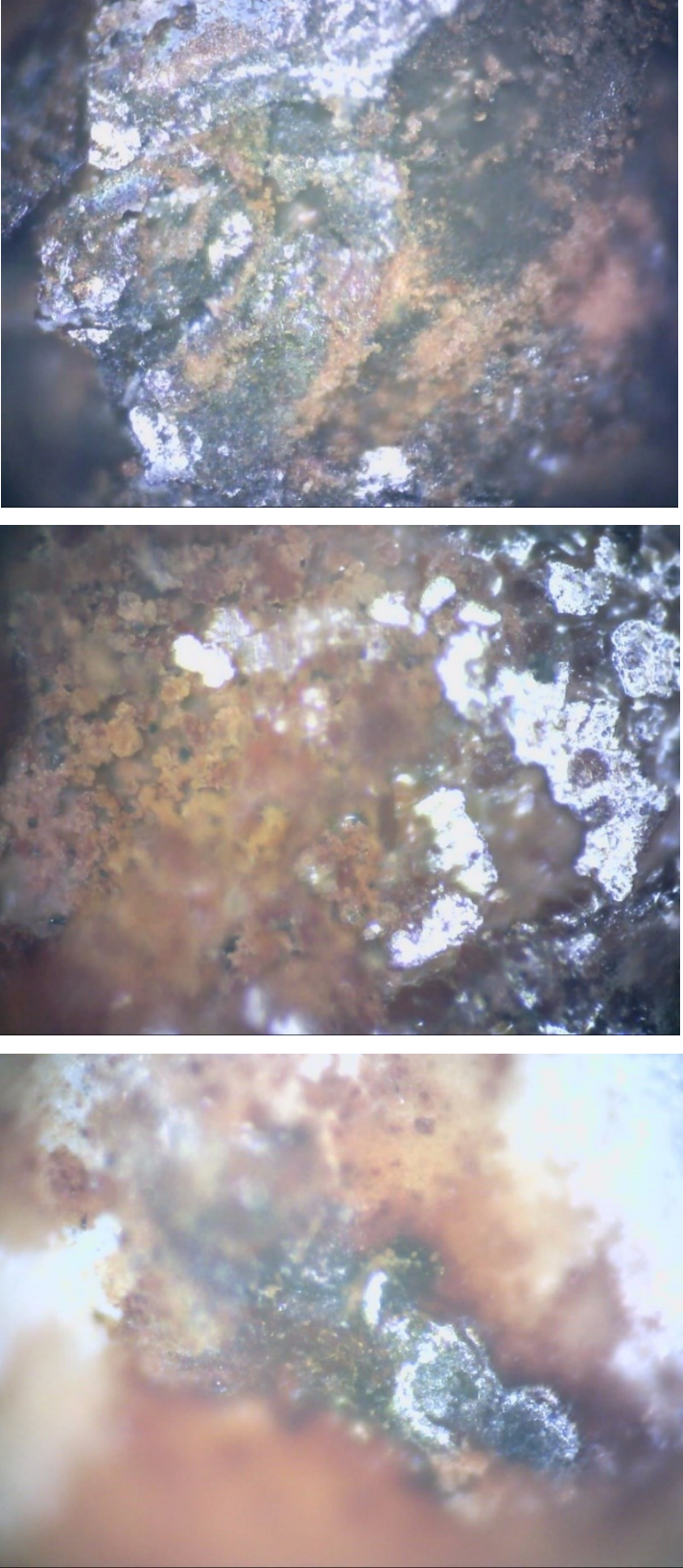
Tablica 5.11. Uzorak 1-3 pod mikroskopom

| Uzorak: | Slike |
|------------|---|
| Uzorak 1-3 |    |

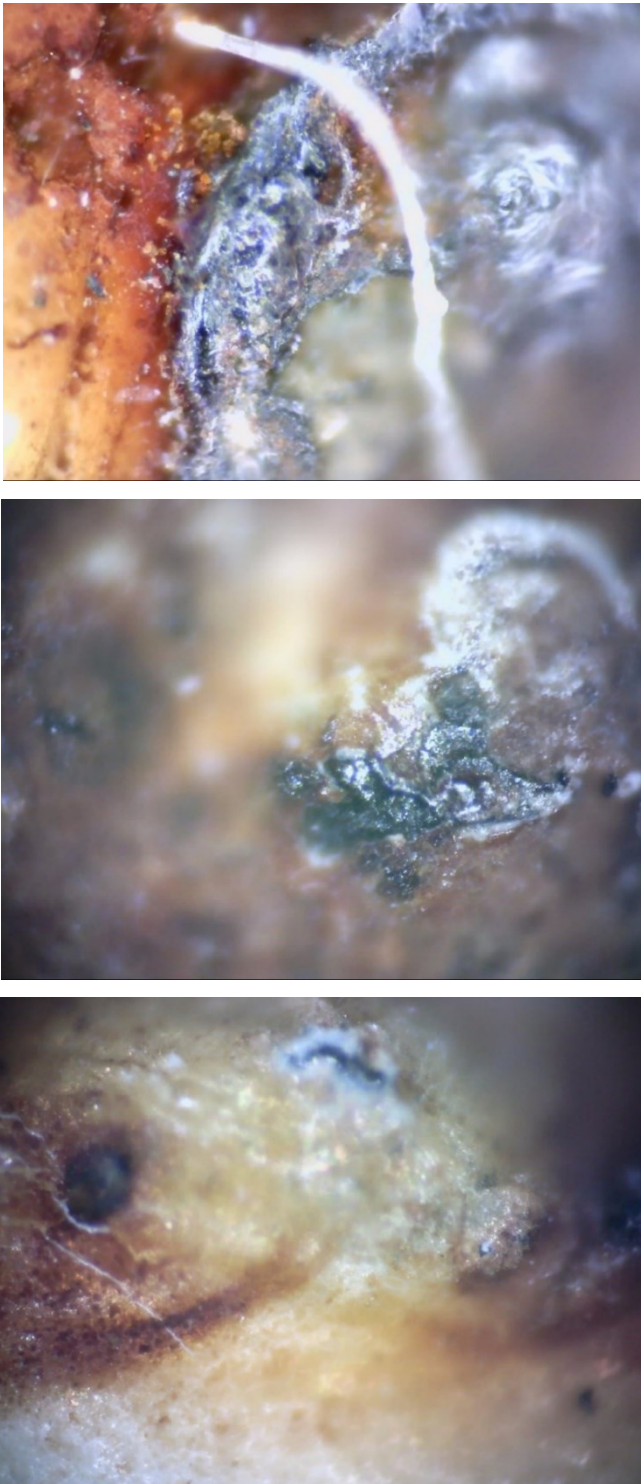
Tablica 5.12. Uzorak 1-4 pod mikroskopom

| Uzorak: | Slike |
|------------|---|
| Uzorak 1-4 |  <p>The image block contains two vertically stacked microscopic photographs of a weld sample. The top photograph shows a central, bright yellowish-white area surrounded by a darker, brownish matrix, with some small, dark, circular inclusions. The bottom photograph shows a similar area but with a more prominent, dark, granular region on the right side, suggesting a different stage or type of corrosion product formation.</p> |

Tablica 5.13. Uzorak 2-3 pod mikroskopom

| Uzorak: | Slike |
|------------|---|
| Uzorak 2-3 |  |

Tablica 5.14. Uzorak 2-4 pod mikroskopom

| Uzorak: | Slike |
|------------|---|
| Uzorak 2-4 |  |

6. ZAKLJUČAK

Korozija je razaranje materijala kao rezultat njegove interakcije s okolinom. Korozija prema mehanizmu djelovanja može biti kemijska i elektrokemijska, a prema obliku razaranja dijeli se na opću, lokalnu, selektivnu i interkristalnu. Mnogi unutarnji i vanjski čimbenici utječu na oblik same korozije, a kako bi se spriječio nastanak korozije nužno je znanje o mehanizmima iste.

Korozija zahvaća od najjednostavnijih strojarских dijelova kao što su matice i vijci pa sve do kompleksnih tehničkih sustava poput automobila, brodova i konstrukcija mostova. Proces zaštite od korozije započinje s konstruiranjem gdje je potrebno voditi računa o konstrukcijsko-tehnološkim mjerama i odabiru materijala s kojima će se usporiti proces širenja korozije, a zaštita i pravovremeno djelovanje mogu uvelike smanjiti troškove i nepoželjne posljedice izazvane korozijom. Također, zaštita od korozije sastavni je dio održavanja tehničkih sustava.

Metode zaštite od korozije temeljan su i djelotvoran način upravljanja korozijom. Brojne su dobrobiti metoda zaštita od korozije, a kao ključne se ističu očuvanje mehaničkih svojstava proizvoda i njegov duži vijek trajanja. Najčešće korišten način zaštite od korozije je zaštita prevlakama koje mogu biti metalne i nemetalne (organske i anorganske).

Konstrukcijski čelici primjenjuju se u konstrukcijskim dijelovima strojeva i uređaja koji obavljaju funkciju, a od konstrukcijskih čelika očekuju se dobra mehanička svojstva, otpornost na koroziju, otpornost na trošenje i dobra tehnološka svojstva. Opći konstrukcijski čelici su najrasprostranjeniji u brodogradnji, mostogradnji, visokogradnji, vozilima i ostalima. Od konstrukcijskih čelika očekuje se visoka nosivost, visoka čvrstoća za rad na visokim temperaturama i otpornost na trošenje. Od tehnoloških svojstava bitna je zavarljivost.

Zavarivanje je spajanje dijelova korištenjem topline, pritiska ili oboje tvoreći nerastavljivi spoj. Prema načinu spajanja zavarivanje se dijeli na zavarivanje taljenjem i zavarivanje pritiskom. Strukturu zavarenog spoja može se podijeliti na zonu taljenja, zonu utjecaja topline (ZUT) i zonu nepromijenjenog osnovnog metala. Kako bi se zaštitio zavareni spoj od korozije potrebno je posebno pripaziti na zonu taljenja i zonu utjecaja topline jer se u njima događaju najveće promjene unutar strukture metala.

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je ispitivanje osam uzoraka sa zavarenim spojevima u slanoj komori. Uzorci se međusobno razlikuju prema načinima mehaničke pripreme površine te zaštite premazima. Slijedila je vizualna usporedba uzoraka prije slane komore te nakon 72 sata i 168 sati u slanoj komori. Dobiveni rezultati ukazuju na minorne razlike između uzoraka s očišćenim i neočišćenim površinama te se uočava opća korozija. Suprotno tome, kod uzoraka s

temeljnim premazom, a posebice sa završnim premazom, javlja se minimalni proboj korozije u području zavarenog spoja, što je posljedica geometrije i nesavršenosti na površini zavarenog spoja te posljedično manje debljine temeljnog i završnog premaza. Uzorci s temeljnim i završnim premazom ukazuju na visoku otpornost u slanoj atmosferi s boljom otpornosti uzoraka koji sadrže i temeljni i završni premaz. Na posljjetku uzorci s premazima su podvrgnuti testu urezivanja mrežice kojim je utvrđena prionjivost premaza na površinu konstrukcijskog čelika. Slana komora nije ostavila veliki utjecaj prilikom urezivanja mrežice te svi premazi prikazuju vrlo visoku prionjivost na metalnu površinu.

LITERATURA

- [1] Korozija, *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje*, Leksikografski zavod Miroslav Krleža 2021., s Interneta, <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=33255>, 31.3.2022.
- [2] Corrosion, ISO 8044:2020: „Corrosion of metals and alloys — Vocabulary“, s Interneta, <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:8044:ed-5:v1:en>, 31.3.2022.
- [3] Bard, A.; Inzelt, G.; Scholz, F.: „Electrochemical Dictionary“, Springer, Berlin, Heidelberg, 2008., s Interneta, https://doi.org/10.1007/978-3-540-74598-3_5, 31.3.2022.
- [4] NACE study estimates global cost of corrosion at \$2.5 trillion annually, NACE International, s Interneta, <https://inspectioneering.com/news/2016-03-08/5202/nace-study-estimates-global-cost-of-corrosion-at-25-trillion-ann>, 31.3.2022.
- [5] Copper sheathing, s Interneta, https://www.wikiwand.com/en/Copper_sheathing, 1.4.2022.
- [6] Davy, H.: „On the corrosion of copper-sheeting by sea-water, and on methods of preventing this effect; and on their application to ships of war and other ships“, The Royal Society, vol. 2, str. 207, 1833., s Interneta, <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspl.1815.0229>, 1.4.2022.
- [7] S. S. Hanza: „Zaštita materijala - materijali s predavanja“, Rijeka, Tehnički fakultet Rijeka, 2020.
- [8] Wet and dry corrosion, s Interneta, <https://www.materials.unsw.edu.au/study-us/high-school-students-and-teachers/online-tutorials/corrosion/introduction/wet-and-dry-corrosion>, pristupljeno 2.4.2022.
- [9] Juraga, I.; Alar, V.; Stojanović, I.: „Korozija i zaštita premazima“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [10] Alar, V.: „Kemijska postojanost metala“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [11] Urquhart, J.: „Simulations solve mystery of why silver tarnishes“, s Interneta, <https://www.chemistryworld.com/news/simulations-solve-mystery-of-why-silver-tarnishes/3010299.article>, 3.4.2022.
- [12] How To Stop Copper Pipe Corrosion With Electrical Grounding?, s Interneta, <https://experts.esgrounding.com/how-to-stop-copper-pipe-corrosion-with-electrical-grounding>, 3.4.2022.

- [13] McCafferty, E.: „Introduction to Corrosion Science“, Alexandria VA, SAD, 2010.
- [14] What is corrosion? - definition and prevention, s Interneta, <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-corrosion>, 3.4.2022.
- [15] Banović, M.: „Analitička kemija“, Školska knjiga, Zagreb, 1995.
- [16] Sharland, S.M.: „A review of theoretical modelling of crevice and pitting corrosion“, vol. 27, br. 3, str. 289-323, 1987.
- [17] Kutz. M.: „Handbook of Environmental Degradation of Materials“, 2018.
- [18] Wiley, D.: „2 Types of Corrosion that Occur in Industrial Piping Systems“, s Interneta, <https://www.nuflowmidwest.com/2-types-of-corrosion-that-occur-in-industrial-piping-systems/>, 6.4.2022.
- [19] Westin, E.: „Example of pitting after corrosion testing in accordance with ASTM G48 Method A“, s Interneta, https://www.researchgate.net/figure/Example-of-pitting-after-corrosion-testing-in-accordance-with-ASTM-G48-Method-A-The-test_fig2_257809727, 6.4.2022.
- [20] Akpanyung, K.V.; Loto, R.T.: „Pitting corrosion evaluation: a review“, Journal of Physics: Conference Series, 2019.
- [21] Zhang, X.G.: „Uhlig’s Corrosion Handbook - Galvanic corrosion“, John Wiley & Sons, 2011.
- [22] Hildenbrand, B.: „Mixed Metals and Galvanic Corrosion: Ticking Time Bomb or Tempest in a Teapot?“, s Interneta, <https://www.climbing.com/gear/mixed-metals-and-galvanic-corrosion-ticking-time-bomb-or-tempest-in-a-teapot/>, 8.4.2022.
- [23] Understanding corrosion in and around your boat, s Interneta, <https://www.goldeagle.com/tips-tools/understanding-corrosion-around-boat/>, 8.4.2022.
- [24] Korozija, s Interneta, https://hawaiicorrosionlab.org/photos/aircraft/exfoliation_1024.jpg, 8.4.2022.
- [25] Popov, B. N.: „Corrosion Engineering“, 2015.
- [26] Matador: „Filiform corrosion“, s Interneta, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Filiform_corrosion.jpg, 8.4.2022.
- [27] Crevice Corrosion, s Interneta, https://www.cdcorrosion.com/mode_corrosion/corrosion_crevice.htm, 9.4.2022.

- [28] Rashidi, N.; Alavi-Soltani, S.; Asmatulu, R.: „Crevice Corrosion Theory, Mechanisms and Prevention Methods“, 2007.
- [29] The dezincification of brass...a lesson learned, s Interneta, <https://www.festoolownersgroup.com/home-improvement-other-projects/the-dezincification-of-brass-a-lesson-learned/>, 10.4.2022.
- [30] Bharadwaj, M.: „Study of Graphitization in Carbon Steel Weldments for Remaining Life Assessment“, PhD diss., University of Tennessee, 2016., s Interneta, <https://www.semanticscholar.org/paper/Study-of-Graphitization-in-Carbon-Steel-Weldments-Bharadwaj/650969a14c0be4a185c079d0e512e850289510e6>, 11.4.2022.
- [31] Karlsdóttir, S.N.: „Comprehensive Renewable Energy“, 2012.
- [32] How to avoid intergranular corrosion?, s Interneta, <https://www.sacome.com/en/avoid-intergranular-corrosion/>, 12.4.2022.
- [33] Juraga, I.; Šimunović, V.; Stojanović, I.; Alar, V.: „Mehanizmi zaštite od korozije“, Zagreb, 2012.
- [34] Materials selection, s Interneta, <https://www.standard.no/pagefiles/1174/m-dp-001r1.pdf>, 16.4.2022.
- [35] Korozijska svojstva pojedinih tehničkih materijala, s Interneta, https://www.pfri.uniri.hr/web/dokumenti/uploads_nastava/20180308_093522_sakan_2.Korozijska.svojstva.pojedinih.tehnickih.materijala.pdf, 18.4.2022.
- [36] Corrosion technology metallic and inorganic coatings, s Interneta, <https://membership.corrosion.com.au/wp-content/uploads/2017/05/ACA-11-Corrosion-Technology-Metallic-and-Inorganic-Coatings.pdf>, 19.4.2022.
- [37] Thermal Metal Spray, s Interneta, <http://www.austinhayes.com/what-we-do/thermal-metal-spray/>, 19.4.2022.
- [38] Metal coating processes, s Interneta, <http://www.ignou.ac.in/upload/Unit-4.pdf>, 20.4.2022.
- [39] Surface Preparation, s Interneta, <https://galvanizeit.org/hot-dip-galvanizing/hdg-process>, 22.4.2022.
- [40] Electro galvanizing: The electrical way to improve the long- PaF term performance of steel sheet. s Interneta, <https://p2infohouse.org/ref/29/28218.pdf>, 23.4.2022.

- [41] Wicks, Z.W.Jr.; Jones, F.N., Pappas; S.P.; Wicks, D.A.: „Organic Coatings: Science and Technology 3rd edition“, New Jersey, 2007.
- [42] Emajlirani otpornik, s Interneta, <https://thunder-resistor.en.made-in-china.com/product/moTxLtDCaZAs/China-Vitreous-Enamel-Coating-Wire-Wound-Resistors.html>, pristupljeno 24.4.2022.
- [43] Prikaz cemetiranja cijevi, s Interneta, <https://www.youtube.com/watch?v=hHO5RJndPvQ>, pristupljeno 23.4.2022.
- [44] Kekez, K.; Stojanović, I.; Pažmeta, D.: „Monitoring system for sacrificial anodes cathodic protection“, 2012.
- [45] Žrtvujuća anoda, s Interneta, <https://cathwell.com/design-lifetime-of-sacrificial-anodes/>, pristupljeno 24.4.2022.
- [46] Cathodic and anodic protection, s Interneta, <https://membership.corrosion.com.au/wp-content/uploads/2017/05/ACA-10-Corrosion-Technology-Cathodic-and-Anodic-Protection.pdf>, pristupljeno 24.4.2022.
- [47] Singh, D. D. N.: „Industrial Corrosion: Evaluation & Mitigation - Corrosion inhibitors“
- [48] Juraga, I.; Šimunović, V.; Stojanović, I.: Primjena inhibitora u zaštiti od korozije u brodogradnji, SORTA 2006, Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci i 3. maj brodogradilište d.d., Rijeka, 2006., 183-198
- [49] Meden, G.; Pavletić, A.; Pavletić, D: Osnove zavarivanja, Fintrade & Tours d.o.o., Rijeka, 2000.
- [50] Mahabunphachai, S.; Koc.; M.; Ni., J.: „Pressure Welding of Thin Sheet Materials: Experimental Investigations and Analytical Modeling“, 2009.
- [51] What is resistance welding, s Interneta: <https://www.aws.org/rwma/page/resistance-welding>, 1.5.2022.
- [52] Ahmad A. Y. Al-Qenaei: „Journal of Engineering Research and Applications“, Vol 6, Issue 3, 2016.
- [53] Types of welding joints, s Interneta, <https://www.theengineerspost.com/types-of-welding-joints/> 1.5.2022.
- [54] Boumerzoug, Z.: „Heat Affected Zone in Welded Metallic Materials“, 2020.

- [55] Davis J.R.: „Corrosion of Weldments“, s Interneta, https://www.academia.edu/21040233/corrosion_of_weld, 2006.
- [56] Structural steel, s Interneta, <https://fractory.com/structural-steels-s235-s275-s355-s420-and-their-properties/>, 4.5.2022.
- [57] Ascott – Corrosion Test Chambers and Accessories, s Interneta, http://www.mmq-europe.de/pdf/Ascott_brochure_ENGLISH.pdf, 7.5.2022.
- [58] ISO 9227:2017 Corrosion testa in artificial atmospheres – Salt spray test, s Interneta, <https://www.iso.org/standard/63543.html>, 7.5.2022.
- [59] ASTM B117 Testing Quality Control, s interneta, <http://www.micomlab.com/wp-content/uploads/2016/05/ASTM-B117-Testing-Quality-Control-Micom-Laboratories.pdf>, 7.5.2022.
- [60] What is a cyclic corrosion test?, s Interneta, <https://labomat.eu/gb/corrosion-testing-faq/720-what-is-a-cyclic-corrosion-test.html>, 7.5.2022.
- [61] Penetrantsko ispitivanje, s Interneta, https://hr.wikipedia.org/wiki/Penetrantsko_ispitivanje#/media/Datoteka:Ressuage_principe_2.svg, 13.5.2022.

POPIS TABLICA

| | |
|---|-----|
| Tablica 2.1. Troškovi povezani s korozijom u automobilske industriji..... | 4 |
| Tablica 2.2. Galvanski niz standardnih elektrodnih potencijala metala..... | 16 |
| Tablica 2.3. Galvanski niz pojedinih konstrukcijskih materijala u morskoj vodi [10] | 22 |
| | |
| Tablica 5.1. Mehanička svojstva konstrukcijskih čelika..... | 59 |
| Tablica 5.2. Kemijski sastav konstrukcijskih čelika | 59 |
| Tablica 5.3. Plan tretiranja površine uzoraka. | 64 |
| Tablica 5.4. Nazivlje uzoraka..... | 65 |
| Tablica 5.5. Režimi rada slane komore i njihovo trajanje..... | 79 |
| Tablica 5.6. Podaci 5%-tne NaCl otopine prije pokretanja..... | 84 |
| Tablica 5.7. Podaci 5%-tne NaCl otopine i maglice nakon 168 sati rada slane komore..... | 95 |
| Tablica 5.8. Tablica praćenja režima rada slane komore | 100 |
| Tablica 5. 9. Ispitivanje urezivanjem mrežice na uzorcima grupe 1 | 111 |
| Tablica 5. 10. Ispitivanje urezivanjem mrežice na uzorcima grupe 2..... | 112 |
| Tablica 5.11. Uzorak 1-3 pod mikroskopom..... | 114 |
| Tablica 5.12. Uzorak 1-4 pod mikroskopom..... | 115 |
| Tablica 5.13. Uzorak 2-3 pod mikroskopom..... | 116 |
| Tablica 5.14. Uzorak 2-4 pod mikroskopom..... | 117 |

POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 2.1. Cijena korozije u 2013. godini | 4 |
| Slika 2.2. Bakrena oplata broda Kraljevske mornarice iz 19. stoljeća [5] | 5 |
| Slika 2.3. Klasifikacija korozije | 6 |
| Slika 2.4. Wagnerova teorija kemijske korozije [10] | 8 |
| Slika 2.5. Oksidni slojevi na površini čelika u vrućem zraku [9] | 9 |
| Slika 2.6. Tri osnovna kinetička zakona za rast oksidnog sloja [7] | 10 |
| Slika 2.7. Korozija srebrnog pribora za jelo [11] | 12 |
| Slika 2.8. Korozija bakrene cijevi [12] | 12 |
| Slika 2.9. Primjer anodne reakcije željeza [13] | 13 |
| Slika 2.10. Primjer katodne reakcije – nastajanje vodika na željezu uronjenom u kiselinu [13] .. | 14 |
| Slika 2.11. Ilustracija anodne i katodne reakcije na površini željeza [13] | 14 |
| Slika 2.12. Uzroci nastajanja elektrokemijske reakcije [13] | 15 |
| Slika 2.13. Oblici korozivskih razaranja metalnih materijala | 17 |
| Slika 2.14. Prikaz opće korozije [14] | 18 |
| Slika 2.15. Shematski prikaz opće ravnomjerne korozije (a) i opće neravnomjerne korozije (b) [10] | 18 |
| Slika 2.16. Primjer rupičaste korozije na cijevi [18] | 19 |
| Slika 2.17. Rupičasta korozija u presjeku zavarenog spoja [20] | 20 |
| Slika 2.18. Oblici rupica kod rupičaste korozije [10] | 20 |
| Slika 2.19. Primjer galvanske korozije [22] | 21 |
| Slika 2.20. Bubrenje čelika [23] | 23 |
| Slika 2.21. Listanje aluminija u avioindustriji [24] | 23 |
| Slika 2.22. Filiformna korozija na automobilu [26] | 24 |
| Slika 2.23. Korozija u procjepu ispod brtve na prirubnici od nehrđajućeg čelika [27] | 25 |
| Slika 2.24. Decinkacija mjedi [29] | 26 |
| Slika 2.25. Grafitezacija zavara ugljičnog čelika [30] | 27 |
| Slika 2.26. Primjer interkristalne korozije [32] | 28 |
| | |
| Slika 3.1. Konstrukcijsko-tehnološke mjere [9] | 32 |
| Slika 3.2. Konstrukcijsko-tehnološke mjere oblikovanja uz prisutnost strujanja fluida [9] | 32 |
| Slika 3.3. Podjela prevlaka | 33 |
| Slika 3.4. Primjer vrućeg prskanja [38] | 34 |

| | |
|--|----|
| Slika 3.5. Proces vrućeg uranjanja [39]..... | 35 |
| Slika 3.6. Proces elektrodepozicije cinka – galvanizacija [40] | 36 |
| Slika 3.7. Emajlirani otpornik [42]..... | 37 |
| Slika 3.8. Prikaz cementiranja cijevi [43] | 38 |
| Slika 3.9. Žrtvujuća anoda [45]..... | 39 |
| Slika 3.10. Primjer katodne zaštite broda narinutom strujom [44] | 40 |
| Slika 3.11. Mehanizam djelovanja hlapivog inhibitora [48] | 42 |
| | |
| Slika 4.1. Prikaz skice zavarenog spoja s elementima [49] | 44 |
| Slika 4.2. Prikaz korijenog i završnog / pokrovnog zavara [49] | 44 |
| Slika 4.3. Struktura zavarenog spoja [49] | 45 |
| Slika 4.4. Podzone u zoni utjecaja topline [49]..... | 45 |
| Slika 4.5. Tipovi sučeljnih spojeva [49]..... | 50 |
| Slika 4.6. Primjer preklopnih spojeva [49] | 50 |
| Slika 4.7. Primjeri kutnih spojeva [49] | 51 |
| Slika 4.8. Primjer križnog spoja [49] | 51 |
| Slika 4.9. Primjeri kutnog rubnog spoja [49]..... | 52 |
| Slika 4.10. Primjer prirubnog spoja [49]..... | 52 |
| Slika 4.11. Uzročnici korozije zavarenih spojeva | 53 |
| | |
| Slika 5.1. Tračna pila marke ADAL model CY135 | 60 |
| Slika 5.2. Pločica uzorka dimenzija 125 x 50 mm | 60 |
| Slika 5.3. Uređaj za zavarivanje Lincoln Electric V250-S | 61 |
| Slika 5.4. Zagreb Elektroda EZ – 50 B | 62 |
| Slika 5.5. Uzorak prilikom zavarivanja..... | 62 |
| Slika 5.6. Temeljna boja Iskra kemijska industrija d.o.o. Ferolin BS..... | 63 |
| Slika 5.7. Antikorozivni završni premaz Iskralux BS | 64 |
| Slika 5.8. Uzorak 1-1: a) lice zavara, b) korijen zavara, c) lice zavara izometrija, d) korijen zavara izometrija | 66 |
| Slika 5.9. Uzorak 1-2: a) lice zavara, b) korijen zavara, c) lice zavara izometrija, d) korijen zavara izometrija | 67 |
| Slika 5.10. Uzorak 1-3: a) lice zavara, b) korijen zavara, c) lice zavara izometrija, d) korijen zavara izometrija | 68 |

| | |
|--|----|
| Slika 5.11. Uzorak 1-4: a) lice zavara, b) korijen zavara, c) lice zavara izometrija, d) korijen zavara izometrija | 69 |
| Slika 5.12. Uzorak 2-1: a) lice zavara, b) korijen zavara, c) lice zavara izometrija, d) korijen zavara izometrija | 70 |
| Slika 5.13. Uzorak 2-2: a) lice zavara, b) korijen zavara, c) lice zavara izometrija, d) korijen zavara izometrija | 71 |
| Slika 5.14. Uzorak 2-3: a) lice zavara, b) korijen zavara, c) lice zavara izometrija, d) korijen zavara izometrija | 72 |
| Slika 5.15. Uzorak 2-4: a) lice zavara, b) korijen zavara, c) lice zavara izometrija, d) korijen zavara izometrija | 73 |
| Slika 5.16. Sprejevi za testiranje penetrantima s lijeva na desno, čistač, penetrant i razvijatelj | 74 |
| Slika 5.17. Prikaz procesa ispitivanja penetrantima [61] | 75 |
| Slika 5.18. Nanošenje penetranta | 75 |
| Slika 5.19. Razvijanje indikacija | 76 |
| Slika 5.20. Slana komora Ascott CC1000ip | 77 |
| Slika 5.21. Pripremljena komora s uzorcima | 79 |
| Slika 5.22. Destilirana voda količine 50 litara | 80 |
| Slika 5.23. Corro-Salt specijalizirana sol za Ascott slanu komoru | 81 |
| Slika 5.24. ISO 9227-2017(E) tablica za praćenje podataka [61] | 81 |
| Slika 5.25. Raspored uzoraka u slanoj komori | 82 |
| Slika 5.26. Lokacija uzoraka u slanoj komori prije pokretanja | 83 |
| Slika 5.27. Temperatura NaCl otopine na početku testiranja | 83 |
| Slika 5.28. Očitavanje gustoće i pH otopine | 84 |
| Slika 5.29. Količina prikupljene maglice u menzurama nakon 72 sata | 85 |
| Slika 5.30. Uzorci nakon 72 sata: a) uzorak 1-1, lice zavara, b) uzorak 1-1, korijen zavara, c) uzorak 1-2, lice zavara, d) uzorak 1-2, korijen zavara | 86 |
| Slika 5.31. Uzorci nakon 72 sata: a) uzorak 1-3, lice zavara, b) uzorak 1-3, korijen zavara, c) uzorak 1-4, lice zavara, d) uzorak 1-4, korijen zavara | 87 |
| Slika 5.32. Uzorci nakon 72 sata: a) uzorak 2-1, lice zavara, b) uzorak 2-1, korijen zavara, c) uzorak 2-2, lice zavara, d) uzorak 2-2, korijen zavara | 88 |
| Slika 5.33. Uzorci nakon 72 sata: a) uzorak 2-3, lice zavara, b) uzorak 2-3, korijen zavara, c) uzorak 2-4, lice zavara, d) uzorak 2-4, korijen zavara | 89 |
| Slika 5.34. Razmještaj uzoraka u slanoj komori | 90 |
| Slika 5.35. Lokacija uzoraka u slanoj komori nakon razmještaja | 90 |
| Slika 5.36. Otvaranje komore nakon 168 sati | 91 |

| | |
|---|-----|
| Slika 5.37. Prikaz završetka rada slane komore nakon 168 sati na upravljačkoj ploči slane komore..... | 91 |
| Slika 5.38. Količina prikupljene maglice nakon 96 sati..... | 92 |
| Slika 5.39. Ukupno prikupljena maglica nakon 168 sati rada slane komore | 93 |
| Slika 5.40. pH vrijednost prikupljene maglice nakon 168 sati rada slane komore | 94 |
| Slika 5.41. Gustoća i pH vrijednost otopine NaCl nakon 168 sati..... | 95 |
| Slika 5.42. Uzorci nakon 168 sati: a) uzorak 1-1, lice zavara, b) uzorak 1-1, korijen zavara, c) uzorak 1-2, lice zavara, d) uzorak 1-2, korijen zavara | 96 |
| Slika 5.43. Uzorci nakon 168 sati: a) uzorak 1-3, lice zavara, b) uzorak 1-3, korijen zavara, c) uzorak 1-4, lice zavara, d) uzorak 1-4, korijen zavara | 97 |
| Slika 5.44. Uzorci nakon 168 sati: a) uzorak 2-1, lice zavara, b) uzorak 2-1, korijen zavara, c) uzorak 2-2, lice zavara, d) uzorak 2-2, korijen zavara | 98 |
| Slika 5.45. Uzorci nakon 168 sati: a) uzorak 2-3, lice zavara, b) uzorak 2-3, korijen zavara, c) uzorak 2-4, lice zavara, d) uzorak 2-4, korijen zavara | 99 |
| Slika 5.46. Uzorak 1-1: a) ispitivanje penetrantom, b) početak ispitivanja, c) nakon 72 sata, d) nakon 168 sati..... | 102 |
| Slika 5.47. Uzorak 1-2: a) ispitivanje penetrantom, b) početak ispitivanja, c) nakon 72 sata, d) nakon 168 sati..... | 103 |
| Slika 5.48. Uzorak 1-3: a) ispitivanje penetrantom, b) početak ispitivanja, c) nakon 72 sata, d) nakon 168 sati..... | 104 |
| Slika 5.49. Uzorak 1-4: a) ispitivanje penetrantom, b) početak ispitivanja, c) nakon 72 sata, d) nakon 168 sati..... | 105 |
| Slika 5.50. Uzorak 2-1: a) ispitivanje penetrantom, b) početak ispitivanja, c) nakon 72 sata, d) nakon 168 sati..... | 106 |
| Slika 5.51. Uzorak 2-2: a) ispitivanje penetrantom, b) početak ispitivanja, c) nakon 72 sata, d) nakon 168 sati..... | 107 |
| Slika 5.52. Uzorak 2-3: a) ispitivanje penetrantom, b) početak ispitivanja, c) nakon 72 sata, d) nakon 168 sati..... | 108 |
| Slika 5.53. Uzorak 2-4: a) ispitivanje penetrantom, b) početak ispitivanja, c) nakon 72 sata, d) nakon 168 sati..... | 109 |
| Slika 5.54. Skala za ocjenjivanje prionjivosti (HRN EN ISO 2409) | 110 |
| Slika 5.55. Dino-Lite AM7515MT8A..... | 113 |

SAŽETAK

Zavarivanje je neizbježan način spajanja materijala u strojarstvu, izvedbi građevinskih elemenata te kod postrojenja kemijske naftne i petrokemijske industrije. Cilj ovog diplomskog rada bio je ispitati korozijsku otpornost različitih uzorka zavarenih spojeva konstrukcijskog čelika S355 ovisno o načinu pripreme, mehaničkoj obradi i pripremi površine te njihovoj zaštiti. U svrhu analize korozijske otpornosti zavarenih spojeva u eksperimentalnom dijelu rada provedeno je 168-satno ispitivanje u slanoj komori prema standardu cikličkog ispitivanja korozije CCT-1. Nadalje, provedena su ispitivanja penetrantima zbog boljeg razumijevanja nastanka korozije i određivanja potencijalnih mjesta izbijanja korozije te metoda ispitivanja urezivanjem mrežice. Rezultati utjecaja slane atmosfere u slanoj komori ukazuju da nema razlike između uzoraka očišćenih i neočišćenih površina, ako nisu zaštićeni premazima. Uzorci s temeljnim i završnim premazom ukazuju na visoku otpornost u slanoj atmosferi s boljom otpornosti uzoraka koji sadrže i temeljni i završni premaz. Slana komora nije ostavila veliki utjecaj prilikom urezivanja mrežice te svi premazi prikazuju vrlo visoku prionjivost na metalnu površinu.

KLJUČNE RIJEČI

Korozija, zavareni spojevi, slana komora, konstrukcijski čelik, površinska zaštita i premazi

SUMMARY

Welding is an inevitable way of joining materials in mechanical engineering, the execution of construction elements, and in chemical, petroleum and petrochemical industry plants. The aim of this thesis was to examine the corrosion resistance of various samples of welded joints of structural steel S355 depending on the method of preparation, mechanical processing and surface preparation and their protection. In order to analyze the corrosion resistance of the welded joints in the experimental part of the work, a 168-hour test was carried out in a salt chamber according to the CCT-1 cyclic corrosion test standard. Furthermore, penetrant tests were carried out for a better understanding of the occurrence of corrosion and the determination of potential corrosion outbreak sites, as well as the Cross-Cut method. The results after subjecting the experiment to the influence of the salty atmosphere in the salt chamber indicate that there is no difference between samples of cleaned and uncleaned surfaces, if they are not protected by coatings. Samples with a primer and a topcoat show high resistance in a salty atmosphere with better adhesion of samples containing both a primer and a topcoat. The salt chamber did not have a big impact on Cross-Cut test, and all coatings show very high adhesion to the metal surface.

KEYWORDS

Corrosion, welded joints, salt spray chamber, structural steel, surface protection and layers