

# Utjecaj vrste temeljnog sloja na učinkovitost zaštite sustava premaza

---

**Bajić, Matej Antonio**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:191322>

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

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

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Matej Antonio Bajić**

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentori:

izv. prof. dr. sc. Ivan Stojanović, dipl. ing.

Student:

Matej Antonio Bajić

Zagreb, 2024.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Prije svega zahvaljujem se svom mentoru, izv. prof. dr. sc. Ivanu Stojanoviću na ideji, pomoći i razumijevanju za vrijeme pisanja diplomskog rada.

Velika zahvala Ivanu Fatoviću mag. ing. nav. arch. na pomoći za vrijeme ispitivanja. Zahvaljujem se tvrtki Končar Energetski Transformatori na ideji i pomoći za diplomski te tvrtki Primabiro na pripremi uzoraka za ispitivanja.

Također veliko hvala svim prijateljima sa faksa i izvan njega koji su bili uz mene za vrijeme cijelog studiranja te dijelili sretne trenutke i one malo manje sretne poput učenja (Matematike, Nauke, Terme...). Neću ih sve nabrajati, znaju tko su i neizmjereno im hvala!

Ogromno hvala mojoj budućoj ženi Ružici koja mi je bila ogroman oslonac i motivacija da izguram ovo poglavlje do kraja te se veselim svim budućim zajedničkim trenutcima.

Naposljetku, ljudima bez kojih ništa ovo ne bi bilo moguće, mojim roditeljima Robertu i Jadranki, neizmjereno hvala na svim žrtvama koje su me dovele tu gdje sam sad. Bez vas ovo ne bi bilo moguće. Hvala i bratu Patriku, baki Nadi, djedu Anti i cijeloj rodbini koji su bili uz mene svaki korak ovog puta.

Matej Antonio Bajić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite  
Povjerenstvo za diplomске ispite studija strojarstva za smjerove:  
Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija

|                                     |        |
|-------------------------------------|--------|
| Sveučilište u Zagrebu               |        |
| Fakultet strojarstva i brodogradnje |        |
| Datum                               | Prilog |
| Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 1       |        |
| Ur.broj: 15 - 24 -                  |        |

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Matej Antonio Bajić** JMBAG: 0035217873

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj vrste temeljnog sloja na učinkovitost zaštite sustava premaza**

Naslov rada na engleskom jeziku: **The influence of the type of primer layer on the efficiency of the coating system protection**

Opis zadatka:

Zaštitni premazi najzastupljenija su metoda zaštite metalne opreme i konstrukcija u energetske industriji. Sprečavaju koroziju i kvarove, te osiguravaju nesmetan rad i pouzdanu opskrbu.

U radu je potrebno izučiti i obraditi industrijske premaze koji se koriste za zaštitu od korozije energetskih transformatora. Obraditi odabir zaštitnog sustava premaza ovisno o korozivnosti okoliša i trajnosti zaštite sukladno normi HRN EN ISO 12944. Posebno obraditi odobalne uvjete izlaganja i zahtjeve. Opisati i usporediti svojstva temeljnog premaza s visokim udjelom cinka i toplinski naštrecane prevlake cinka. Prikazati primjere primjene.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je ispitati tri vrste sustava premaza, s cinkom u temeljnom sloju i toplinski naštrecanim cinkom, koji se koriste za zaštitu energetskih konstrukcija u morskom okolišu. Ispitati postojanost sustava premaza u slanoj i vlažnoj komori. Pomoću elektrokemijske impedancijske spektroskopije potrebno je odrediti otpor premaza u 3,5% otopini NaCl. Ispitati prionjivost premaza prije i nakon ubrzanih ispitivanja. Kritički se osvrnuti na rezultate i dati preporuku za odabir odgovarajućeg sustava premaza.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

9. svibnja 2024.

11. srpnja 2024.

15. – 19. srpnja 2024.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Ivan Stojanović

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

## SADRŽAJ

|   |    |
|---|----|
| 1. UVOD.....  | 1  |
| 2. KOROZIJA.....  | 2  |
| 2.1. Općenito o koroziji.....                                     | 2  |
| 2.2. Podjela korozije prema geometriji korozijskog razaranja..... | 4  |
| 2.2.1. Opća korozija .....  | 4  |
| 2.2.2. Galvanska korozija.....                                    | 4  |
| 2.2.3. Korozija u procijepu .....                                 | 5  |
| 2.2.4. Rupičasta/piting korozija .....                            | 6  |
| 2.2.5. Interkristalna korozija .....                              | 6  |
| 2.2.6. Selektivna korozija.....                                   | 6  |
| 2.2.7. Erozijska korozija .....                                   | 7  |
| 2.2.8. Napetosna korozija.....                                    | 7  |
| 2.3. Metode zaštite od korozije .....                             | 7  |
| 2.4. Ekonomski značaj korozije .....                              | 8  |
| 3. ANTIKOROZIVNA ZAŠTITA .....                                    | 9  |
| 3.1. Organske prevlake.....                                       | 9  |
| 3.1.1. Vezivo .....   | 11 |
| 3.1.2. Otapala .....  | 13 |
| 3.1.3. Pigmenti .....   | 13 |
| 3.1.4. Punila .....   | 14 |
| 3.1.5. Aditivi .....  | 14 |
| 3.2. Višeslojni sustav premaza.....                               | 15 |
| 3.3. Klasifikacija premaza.....                                   | 16 |
| 3.4. Priprema podloge za prevlačenje .....                        | 16 |
| 3.4.1. Odmaščivanje.....  | 17 |
| 3.4.2. Mehaničko čišćenje.....                                    | 17 |
| 3.5. Zaštita metalnim prevlakama .....                            | 19 |
| 3.5.1. Galvanizacija.....   | 19 |
| 3.5.2. Vruće uranjanje .....                                      | 20 |
| 3.5.3. Metalizacija prskanjem .....                               | 22 |
| 3.6. Zaštita nemetalnim anorganskim prevlakama.....               | 23 |
| 3.7. Norma HRN EN ISO 12944 .....                                 | 25 |
| 4. PREMAZI BOGATI CINKOM .....                                    | 28 |
| 4.1. Organski premazi obogaćeni cinkom.....                       | 28 |
| 4.2. Anorganski premazi obogaćeni cinkom.....                     | 29 |
| 5. ENERGETSKI TRANSFORMATORI .....                                | 30 |
| 6. EKSPERIMENTALNI RAD.....                                       | 32 |
| 6.1. Priprema uzoraka .....                                       | 32 |
| 6.1.1. Test prašine .....   | 34 |
| 6.1.2. Bresle test.....   | 36 |
| 6.1.3. Projektiranje i nanošenje premaza .....                    | 37 |
| 6.2. Ispitivanje debljine .....                                   | 42 |
| 6.3. Ispitivanje tvrdoće.....                                     | 44 |
| 6.4. Ispitivanje prionjivosti .....                               | 45 |
| 6.4.1. Ispitivanja u slanoj komori.....                           | 46 |

---

|   |    |
|---|----|
| 6.4.2. Ispitivanja u vlažnoj komori .....                           | 53 |
| 6.5. Ispitivanje korozije oko zareza .....                          | 58 |
| 6.6. Elektrokemijska korozijska ispitivanja .....                   | 61 |
| 6.6.1. Određivanje potencijala otvorenog strujnog kruga (OCP) ..... | 61 |
| 6.6.2. Elektrokemijska impedancijska spektroskopija .....           | 65 |
| 7. ZAKLJUČAK.....   | 81 |
| LITERATURA.....   | 82 |

**POPIS SLIKA**

|   |    |
|---|----|
| Slika 1. Šteta uzrokovana korozijom cjevovoda [4] .....                               | 3  |
| Slika 2. Popis faktora koji utječu na koroziju .....                                  | 3  |
| Slika 3. Korozija na čepu za ispust [6].....  | 5  |
| Slika 4. Grafički prikaz metoda zaštite od korozije [7].....                          | 8  |
| Slika 5. Komponente premaza .....   | 10 |
| Slika 6. Višeslojni sustav premaza .....  | 15 |
| Slika 7. Čišćenje mokrim mlazom abraziva [12] .....                                   | 18 |
| Slika 8. Vruće cinčanje transformatorskog kotla [6].....                              | 21 |
| Slika 9. Metalizacija cinkom [15] .....   | 23 |
| Slika 10. 3D model velikog energetskog transformatora [20] .....                      | 30 |
| Slika 11. Transformatorski oštećen korozijom [21].....                                | 31 |
| Slika 12. Pripremljeni uzorci od ugljičnog čelika S235.....                           | 33 |
| Slika 13. Usporedba pripremljene površine uzorka sa komparatorom hrapavosti.....      | 33 |
| Slika 14. Određivanje stupnja pripreme površine uzorka .....                          | 34 |
| Slika 15. Korištenje ljepljive trake za test prašine .....                            | 34 |
| Slika 16. Rezultati testa prašine na 5 uzoraka .....                                  | 35 |
| Slika 17. Bresle test.....  | 36 |
| Slika 18. Rezultati Bresle testa.....   | 37 |
| Slika 19. Nanošenje temeljnog sloja premaza na uzorke P i PX.....                     | 41 |
| Slika 20. Nanošenje međupremaza na uzorke P i PX .....                                | 42 |
| Slika 21. Pripremljeni premazani uzorci .....   | 42 |
| Slika 22. Ispitivanje debljine premaza .....  | 43 |
| Slika 23. Uređaj PosiTector SHD za mjerenje tvrdoće .....                             | 44 |
| Slika 24. Mjerenje tvrdoće uzorka PX10 .....  | 45 |
| Slika 25. Uređaj za ispitivanje prionjivosti premaza "Elcometer 506" .....            | 46 |
| Slika 26. Slana komora Katedre za zaštitu materijala FSB-a.....                       | 47 |
| Slika 27. Uzorci nakon 720 h u slanoj komori (s lijeva na desno: PX, M i P).....      | 48 |
| Slika 28. Uzorci nakon 1440 sati u slanoj komori (s lijeva na desno M, PX, P) .....   | 48 |
| Slika 29. Vlažna komora Katedre za zaštitu materijala FSB-a .....                     | 54 |
| Slika 30. Uzorci nakon 480 h vlažne komore .....                                      | 54 |
| Slika 31. Uzorci nakon 960 sati u vlažnoj komori .....                                | 55 |
| Slika 32. Urezan zarez kod uzorka PX1 .....   | 58 |
| Slika 33. Zarez kod uzorka PX1 nakon 720 h u slanoj komori.....                       | 59 |
| Slika 34. Zarez kod uzorka PX1 nakon što je uklonjen premaz oko samog zarez.....      | 59 |
| Slika 35. Svi uzorci podvrgnuti slanoj i vlažnoj komori.....                          | 61 |
| Slika 36. Elektrokemijska ćelija.....   | 62 |
| Slika 37. Graf ovisnosti potencijala o vremenu ispitivanja za uzorak P3 .....         | 64 |
| Slika 38. Graf ovisnosti potencijala o vremenu ispitivanja za uzorak M1 .....         | 64 |
| Slika 39. Graf ovisnosti potencijala o vremenu ispitivanja za uzorak PX8 .....        | 65 |
| Slika 40. Randelsov električni krug .....   | 66 |
| Slika 41. Ekvivalentni električni krug za porozni premaz .....                        | 66 |
| Slika 42. Nyquist dijagram za uzorak P3 nakon 168 sati izloženosti elektrolitu .....  | 67 |
| Slika 43. Bodeov dijagram za uzorak P3 nakon 168 sati izloženosti elektrolitu .....   | 67 |
| Slika 44. Nyquist dijagram za uzorak P3 nakon 336 sati izloženosti elektrolitu .....  | 68 |
| Slika 45. Bodeov dijagram za uzorak P3 nakon 336 sati izloženosti elektrolitu .....   | 68 |
| Slika 46. Nyquist dijagram za uzorak P3 nakon 672 sata izloženosti elektrolitu .....  | 69 |
| Slika 47. Bodeov dijagram za uzorak P3 nakon 672 sata izloženosti elektrolitu.....    | 69 |
| Slika 48. Nyquist dijagram za uzorak P3 nakon 1440 sati izloženosti elektrolitu ..... | 70 |



---

|  |    |
|--|----|
| Slika 49. Bodeov dijagram za uzorak P3 nakon 1440 sati izloženosti elektrolitu .....   | 70 |
| Slika 50. Nyquist dijagram za uzorak M1 nakon 168 sati izloženosti elektrolitu.....    | 71 |
| Slika 51. Bodeov dijagram za uzorak M1 nakon 168 sati izloženosti elektrolitu.....     | 71 |
| Slika 52. Nyquist dijagram za uzorak M1 nakon 336 sati izloženosti elektrolitu.....    | 72 |
| Slika 53. Bodeov dijagram za uzorak M1 nakon 336 sati izloženosti elektrolitu.....     | 72 |
| Slika 54. Nyquist dijagram za uzorak M1 nakon 672 sata izloženosti elektrolitu .....   | 73 |
| Slika 55. Bodeov dijagram za uzorak M1 nakon 672 sata izloženosti elektrolitu .....    | 73 |
| Slika 56. Nyquist dijagram za uzorak M1 nakon 1440 sati izloženosti elektrolitu.....   | 74 |
| Slika 57. Bodeov dijagram za uzorak M1 nakon 1440 sati izloženosti elektrolitu .....   | 74 |
| Slika 58. Nyquist dijagram za uzorak PX8 nakon 168 sati izloženosti elektrolitu .....  | 75 |
| Slika 59. Bodeov dijagram za uzorak PX8 nakon 168 sati izloženosti elektrolitu .....   | 75 |
| Slika 60. Nyquist dijagram za uzorak PX8 nakon 336 sati izloženosti elektrolitu .....  | 76 |
| Slika 61. Bodeov dijagram za uzorak PX8 nakon 336 sati izloženosti elektrolitu .....   | 76 |
| Slika 62. Nyquist dijagram za uzorak PX8 nakon 672 sata izloženosti elektrolitu .....  | 77 |
| Slika 63. Bodeov dijagram za uzorak PX8 nakon 672 sata izloženosti elektrolitu.....    | 77 |
| Slika 64. Nyquist dijagram za uzorak PX8 nakon 1440 sati izloženosti elektrolitu ..... | 78 |
| Slika 65. Bodeov dijagram za uzorak PX8 nakon 1440 sati izloženosti elektrolitu .....  | 78 |
| Slika 66. Grafički prikaz mijenjanja vrijednosti otpora kod uzoraka .....              | 80 |

**POPIS TABLICA**

|   |    |
|---|----|
| Tablica 1. Veziva i njihova svojstva [11].....  | 12 |
| Tablica 2. Stupnjevi pripreme površine mlazom abraziva [2] .....  | 19 |
| Tablica 3. Postupci, metode i najvažnije karakteristike anorganskih prevlaka [3] .....                              | 24 |
| Tablica 4. Trajnost sustava premaza prema HRN EN ISO 12944-1 .....  | 25 |
| Tablica 5. Kategorije korozivnosti te opisi okoliša prema HRN EN ISO 12944-2 .....                                  | 26 |
| Tablica 6 Sustavi premaza za niskougljični čelik za stupnje korozivnosti okoliša od C2 do C5 [2] .....              | 27 |
| Tablica 7. Sustavi premaza za ugljični čelik namijenjen kategoriji korozivnosti C5 prema ISO 12944-5:2018.....      | 38 |
| Tablica 8. Sustavi premaza za metalizirane površine ISO 12944-5:2018.....   | 39 |
| Tablica 9. Parametri premaza na uzorcima P .....  | 39 |
| Tablica 10. Parametri premaza na uzorcima PX .....  | 40 |
| Tablica 11. Parametri premaza na uzorcima M.....  | 40 |
| Tablica 12. Izmjerene i izračunate vrijednosti vezane za debljine premaza .....                                     | 43 |
| Tablica 13. Izmjerene tvrdoće premaza .....   | 45 |
| Tablica 14. Parametri ispitivanja u slanoj komori prema normi HRN EN ISO 9227:2012.....                             | 47 |
| Tablica 15. Pull-off ispitivanje na uzorcima .....  | 49 |
| Tablica 16. Oznake uzoraka te trajanje ispitivanja u slanoj komori .....  | 50 |
| Tablica 17. Pull-off ispitivanje nakon 720 h u slanoj komori.....   | 50 |
| Tablica 18. Pull-off ispitivanje nakon 1440 h u slanoj komori.....  | 52 |
| Tablica 19. Oznake uzoraka te trajanje ispitivanja u vlažnoj komori .....   | 55 |
| Tablica 20. Pull-off ispitivanje nakon 480 h u vlažnoj komori.....  | 55 |
| Tablica 21. Pull-off ispitivanje nakon 960 h u vlažnoj komori.....  | 57 |
| Tablica 22. Dobiveni stupnjevi korozije po uzorcima .....   | 60 |
| Tablica 23. Tablica parametara za ispitivanje otvorenog strujnog kruga .....  | 63 |
| Tablica 24. Mjerenje električnog potencijala na uzorcima kroz vrijeme .....   | 63 |
| Tablica 25. Parametri EIS ispitivanja.....  | 66 |
| Tablica 26. Rezultati dobiveni elektrokemijskom impedancijskom spektroskopijom kroz više vremenskih intervala ..... | 79 |

**POPIS OZNAKA I KRATICA**

| Oznaka   | Jedinica                  | Opis   |
|----------|---------------------------|--|
|          | pH                        | Mjera kiselosti  |
| BDP      |                           | Bruto domaći proizvod  |
|          | °C                        | Celzijev stupanj   |
|          | V                         |  |
|          | kVA                       | Merna jedinica nazivnog kapaciteta, kilovolt amper   |
|          | $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ | Mjerna jedinica električne provodljivosti, mikro simens po centimetru kvadratnom                       |
|          | MPa                       | Megapaskal, mjerna jedinica za tlak  |
|          | mV                        | Milivolt, mjerna jedinica potencijala  |
| AK       |                           | Alkid  |
| AY       |                           | akril  |
| <i>c</i> | mm                        | Stupanj korozije   |
| $C_c$    | $\text{Fcm}^2$            | Kapacitet premaza, mjerna jedinica faradaj centimetar kvadratni  |
| $C_{dl}$ | $\text{Fcm}^2$            | Kapacitet električnog dvosloja između elektrolita i čelika, mjerna jedinica farad centimetar kvadratni |
| CMS      |                           | eng. Corrosion Management System, odnosno sustav upravljanja korozijom                                 |
| CR       |                           | Klorkaučuk   |
| DSF      | $\mu\text{m}$             | Debljina suhog filma, mikrometar   |
| EIS      |                           | Elektrokemijska impedancijska spektroskopija   |
| EP       |                           | Epoksi   |
| ESI      |                           | Etil silikat   |
| <i>f</i> | Hz                        | Frekvencija  |
| GSU      |                           | Generatorski step-up transformatori za povećanje napona  |
| <i>l</i> | $\mu\text{m}$             | Mikrometar, mjerna jedinica duljine  |
| <i>l</i> | mm                        | Milimetar, mjerna jedinica duljine   |
| Misc.    |                           | Ostali pigmenti  |
| NACE     |                           | Eng. National Association of Corrosion Engineers, odnosno Nacionalna udruga inženjera korozije         |
| OCP      |                           | Eng. open circuit potential, mjerenje potencijala otvorenog strujnog kruga                             |
| OH       |                           | Hidroksilna skupina  |
| PUR      |                           | Poliuretan   |
| PVC      |                           | Polivinilklorid  |
| <i>R</i> | $\Omega$                  | Otpor  |
| $R_c$    | $\Omega\text{cm}^2$       | Otpor premaza, mjerna jedinica ohm centimetar kvadratni  |

---

|           |                     |   |
|-----------|---------------------|---|
| $R_{ct}$  | $\Omega\text{cm}^2$ | Otpor prijenosu naboja između međufaze elektrolita i čelika, mjerna jedinica ohm centimetar kvadratni |
| $R_s$     | $\Omega\text{cm}^2$ | Otpor elektrolita, mjerna jedinica ohm centimetar kvadratni   |
| $t$       | h                   | Sati  |
| $t$       | h                   | Sat, mjerna jedinica za vrijeme   |
| $t$       | s                   | Sekunda, mjerna jedinica za vrijeme   |
| UV        |                     | Ultraljubičasto   |
| $v$       | m/s                 | Metar po sekundi, mjerna jedinica za brzinu   |
| $w$       | mm                  | Širina zareza   |
| $w_c$     | mm                  | Širina korozije   |
| $\bar{x}$ | $\mu\text{m}$       | Aritmetička sredina   |
| ZKE       |                     | Zasićena kalomelna elektroda  |
| Zn (R)    |                     | Pigment cinkov prah   |
| $\rho$    | kg/L                | Kilogram po litri, mjerna jedinica za gustoću   |
| $\sigma$  | $\mu\text{m}$       | Standardna devijacija   |

**SAŽETAK**

Zaštitni premazi su najčešće korištena metoda zaštite metala u energetske industriji. Primjenjuju se na različite komponente, uključujući cjevovode, spremnike, transformatore i druge ključne dijelove energetskih postrojenja. Sprječavaju koroziju i time osiguravaju dugotrajniji životni vijek konstrukcija i strojeva. Korištenje zaštitnih premaza također doprinosi smanjenju troškova održavanja i povećava sigurnost postrojenja.

U teoretskom dijelu rada obrađena je korozija te njeni najčešći tipovi, metode zaštite od korozije s naglaskom na zaštitu korištenjem prevlaka, objašnjena je norma HRN EN ISO 12944 prema kojoj se projektira sustav prevlaka te opisana ispitivanja koja se provode na premazima.

U eksperimentalnom dijelu rada provedena su ispitivanja u slanoj i vlažnoj komori, zatim ispitivanje debljine premaza, tvrdoće premaza, prionjivosti premaza, stupnja korozije te elektrokemijska impedancijska spektroskopija.

Ključne riječi: premazi, korozija, norma HRN EN ISO 12944, cink

---

**SUMMARY**

Protective coatings are the most commonly used method for protecting metals in the energy industry. They are applied to various components, including pipelines, tanks, transformers, and other key parts of energy facilities. These coatings prevent corrosion, thus ensuring a longer lifespan for structures and machinery. The use of protective coatings also contributes to reduced maintenance costs and increased plant safety.

The theoretical part of the thesis addresses corrosion and its most common types, methods of corrosion protection with an emphasis on coating protection, explains the HRN EN ISO 12944 standard according to which the coating system is designed, and describes the tests conducted on coatings.

In the experimental part of the thesis, tests were conducted to determine influence of humidity and salt spray chamber, coating thickness, coating hardness, coating adhesion, degree of corrosion, and electrochemical impedance spectroscopy.

Keywords: coatings, corrosion, HRN EN ISO 12944 standard, zinc

## **1. UVOD**

U današnje vrijeme na raspolaganju je široka paleta raznih konstrukcijskih materijala poput metala i legura, polimera, keramika, kompozita, drva i sličnih. Izbor odgovarajućeg materijala za traženu primjenu je odgovornost koju inženjeri raznih grana nose na svojim leđima. Nema jednostavnih pravila kojima se bira materijal za određenu primjenu, no sama logički donesena odluka uključuje razmatranje relevantnih svojstava, jednostavnost izrade, dostupnost, no u velikom broju slučajeva faktor koji presudi je cijena samog materijala. Idealna odluka bi bila kada bi se uzeo materijal koji ima najnižu moguću cijenu, a zadovoljava sve tražene uvjete [1]. Često se u stručnim knjigama, znanstvenim radovima pa čak i običnim razgovorima inženjeri strojarstva koriste stručnim izrazima koji ljudima izvan struke ne predstavljaju ništa značajno, no korozija je pojam sa kojim je upoznata velika količina ljudi izvan struke te oni koji nisu čuli za nju zasigurno su je vidjeli. Svjetski poznate atrakcije poput Eiffel-ovog tornja u Parizu, Golden Gate Bridge-a u San Franciscu te mnoge druge se redovno štite od korozije koja može uzrokovati oštećenje i smanjenje njihove strukturne stabilnosti. Za ovu svrhu, koriste se različite metode: redovito čišćenje i inspekcija te premazivanje zaštitnim premazima. Očuvanje tih atrakcija je ključno kako bi se osiguralo da budu dostupne za buduće generacije. No nisu samo znamenitosti izložene koroziji, već razne konstrukcije i strojevi što mnogim postrojenjima u industriji može izazivati velike probleme. Primjer takvih strojeva su energetske transformatori čija funkcija prenošenja električne energije na daleke udaljenosti te osiguravaju električnu energiju velikom broju kućanstava, ali i postrojenjima te bolnicama koje moraju imati konstantno dostupnu električnu energiju. Energetske transformatori često znaju biti izloženi visoko korozivnim uvjetima te da bi se osigurala njihova ispravnost potrebno je uz funkcionalan transformator napraviti temeljitu antikorozivnu zaštitu kako bi životni vijek energetskog transformatora bio što dulji.

---

## 2. KOROZIJA

### 2.1. Općenito o koroziji

Korozija je proces nepoželjnog trošenja konstrukcijskih materijala zbog kemijskog djelovanja okoline. Osim metala, korozija može zahvatiti i druge materijale, kao što su staklo, keramika, razni polimeri i betonski materijali.

Kada se govori o koroziji, obično se misli na koroziju metala, iako ostali materijali također mogu biti pogođeni. Izrazito je kompleksno proučavati koroziju nemetalnih materijala s obzirom da je velik broj drugih razornih pojava (mekšanje, truljenje, otvrdnjivanje, bubrenje, drobljenje) vezan na njih. Te pojave se skupno zovu degradacija, odnosno razgradnja nemetala [2].

Korozija je spontan proces te je posljedica težnje za povratkom metala u spojeve koji se mogu naći u prirodi (razne rude i minerali). Unosom energije u razne metalurške procese rude ili prirodni spojevi postaju metali. Ti metali drže u sebi visoku energiju. Prirodna tendencija tih metala je da imaju reakcije u kombinaciji s drugim tvarima. Time se oslobađa energija te metali sada imaju stanje niže energije. Smanjivanje te slobodne energije je pokretačka sila procesa korozije [2].

Posljedice korozije najčešće mogu biti [3]:

- Smanjenje mase i dimenzija (moguće, ali rijetko prividno povećanje mase i dimenzije zbog zadržavanja krutih produkata korozije na površini materijala)
- Veća hrapavost
- Manja opteretivost
- Dolazi do pojavljivanja pukotina i perforacija
- Pogoršanje estetike materijala
- Rast površinskog električnog otpora
- Onečišćenje fluida.



Na slici 1 je primjer korozije cjevovoda, procjena je da se 25% vode izgubi propuštanjem cijevi [4].



Slika 1. Šteta uzrokovana korozijom cjevovoda [4]

Slika 2 prikazuje faktore koji utječu na pojavu korozije.



Slika 2. Popis faktora koji utječu na koroziju

## 2.2. Podjela korozije prema geometriji korozijskog razaranja

Koroziju se često može klasificirati po geometriji razaranja korozijom, odnosno po svom obliku i raspodjeli po površini materijala. Osam osnovnih pojava oblika korozije su [2]:

- opća korozija
- galvanska korozija
- korozija u procijepu
- rupičasta korozija
- interkristalna korozija
- selektivna korozija
- erozijska korozija
- napetosna korozija.

### 2.2.1. Opća korozija

Opća korozija se manifestira po čitavoj površini izloženog metala. Ona može biti ravnomjerna i neravnomjerna. S obzirom da ni ravnomjerna opća korozija nema jednaku brzinu u svim dijelovima, često uzrokuje ohrapljavanje inače na dodir glatke metalne površine. Od svih oblika korozije, opću koroziju je najlakše pratiti i predvidjeti pa je ona najmanje opasna u praksi. Neravnomjerna opća korozija je svakako opasnija od ravnomjerne [5].

### 2.2.2. Galvanska korozija

Galvanska ili bimetalna korozija je tip korozije koji nastane kada u elektrolitu dođe do električnog kontakta dva ili više materijala koji imaju različite elektrodne potencijale, odnosno različite plemenitosti [5].

Često pri izradi složenih konstrukcija nije moguće koristiti identične metalne materijale, odnosno materijale istih korozijskih potencijala. Od dva materijala koji se dodiruju, metal koji ima niži električni potencijal će postati anoda, odnosno korodirati će. Sami intenzitet galvanske korozije ovisi o iznosu razlike potencijala između tih metala ili legura, o načinu na koji su ta dva materijala spojeni. U slučaju da se ta dva materijala nalaze u elektrolitu te ako su spojeni, ali dobro izolirani jedan od drugog, neće doći do korodiranja materijala sa nižim električnim potencijalom.

Galvanska korozija je složeni proces, no pojednostavljeno rečeno paralelno se događaju dvije kemijske reakcije; oksidacija i redukcija. Oksidacija predstavlja anodnu reakciju, a redukcija predstavlja katodnu reakciju. Kada se metal uroni u otopinu anodna reakcija je intenzivnija, odnosno oksidira manje plemenit metal. Oksidacija i redukcija traju sve dok brzina anodne i katodne reakcije nisu izjednačene te time postignu stanje dinamičke ravnoteže [5].

Često kod transformatora dolazi do kontakta dva različita metala, primjer toga je slika 3 gdje vidimo koroziju na čepu za ispust transformatora.



**Slika 3. Korozija na čepu za ispust [6]**

### **2.2.3. Korozija u procijepu**

Korozija se često javlja blizu pukotina, procijepa ili razmaka između površina, a uzrok tome može biti nakupljanje korozivnog medija u toj pukotini, iako može izgledati suho. U slučaju da je dio stroja čitavim volumenom u otopini, onda kao rezultat elektrokemijske reakcije dolazi do promjene uvjeta u unutarnjem dijelu procijepa, raste kiselost otopine (pada pH vrijednost) te raste koncentracija agresivnih čimbenika. Unutarnji dio procijepa je područje anode, dok se katodna reakcija događa na vanjskom dijelu procijepa.

Najčešći uzrok korozije u procijepu su loša konstrukcijsko-tehnološka rješenja. Može se pojaviti i ispod naslaga, prljavština, na mjestima gdje se agresivni medij predugo zadržao [5].

#### **2.2.4. Rupičasta/piting korozija**

Rupičasta korozija je usko lokaliziran tip korozije, naizgled kružnog oblika. Dubina prodiranja korozije je (nakon dovoljno dugog vremenskog perioda) više puta veća od vidljive širine korozije na površini metala. Lokaliziran tip korozije znači da se pojavljuje na samo nekim dijelovima površine metala.

Rupičasta korozija se javlja zbog:

- lokalnih mehaničkih ili kemijskih oštećenja zaštitnog pasivnog filma na površini materijala
- nehomogenosti u strukturi materijala
- napad mikroorganizama na površinu materijala.

Rupičasti tip korozije najčešće se pojavljuje na nehrđajućim čelicima kao posljedica zavarivanja. Prilikom unosa topline dolazi do pojave pobojenosti uz zavareni spoj. Ona u agresivnoj okolini pogoduje nastajanju korozije [2].

#### **2.2.5. Interkristalna korozija**

Jako opasan tip korozije je interkristalna korozija. Razvija se nevidljivo uzduž granica kristalnog zrna te dovodi do razaranja metalne veze između kristalita u metalu. Veliki je problem što interkristalna korozija jako dugo može proći nezapaženo, a iznenadno snižava vrijednosti čvrstoće te žilavosti materijala. Najčešće napada nehrđajuće čelike, legure na bazi aluminijske i nikla [5].

#### **2.2.6. Selektivna korozija**

Selektivna korozija je tip korozije koji uništava jednu fazu ili samo jednu komponentu višekomponentnog ili višefaznog materijala. Neki od primjera selektivne korozije su: grafitizacija sivoga lijeva u slanoj vodi, razrijeđenim kiselinama i određenim tipovima tla. Tu dolazi do selektivnog otapanja ferita i perlita, a grafit zaostaje. Selektivna korozija može biti opća ili lokalna. Selektivna korozija je opasan oblik korozije zbog toga što čvrst i žilav materijal pretvara u slab i krhak [5].

### **2.2.7. Erozijska korozija**

Erozijska korozija je paralelno djelovanje kemijskog oštećivanja materijala (korozije) i fizikalnog oštećenja materijala (erozije). Erozijska je progresivan gubitak materijala s površine jer dolazi do mehaničkog djelovanja površine i medija. Ako se to odvija u korozivnom mediju dolazi do erozijske korozije. To je česta pojava u sustavima za prijenos tekućina. Do oštećenja dolazi vrlo brzo čak i ako je korozivnost samog medija jako mala. Mehanički potpomognutim procesom trošenja materijala, odnosno erozijom, se skida površinski zaštitni sloj s površine materijala u obliku otopljenih iona ili dimenzijski stabilnih produkata korozije. Time se gubi zaštitno djelovanje. Zatim je površina izložena samom korozivnom mediju. S obzirom da korozija povećava hrapavost površine, korozijski produkti na površini metala ubrzavaju eroziju zbog svoje hrapavosti. Meki metali (bakar i bakrene legure) su jako podložni eroziji [5].

### **2.2.8. Napetosna korozija**

Do napetosne korozije dolazi uslijed djelovanja korozivnog medija te vlačnih napreznja na sam materijal. Do vlačnih napreznja najčešće dolazi zbog zaostalih napreznja uslijed hladnog deformiranja ili zavarivanja, no mogu biti i vanjska napreznja kao kod elemenata visećih mostova. Pukotine se šire okomito na smjer vlačnog opterećenja te se šire transkristalno ili interkristalno.

Da bi došlo do napetosne korozije moraju biti zadovoljena tri uvjeta:

- Materijal mora biti sklon napetosnoj koroziji (legure metala imaju veću tendenciju za napetosnu koroziju)
- Agresivni medij, u kombinaciji s materijalom pogoduje napetosnoj koroziji, posebice u visokim temperaturnim rasponima
- Napreznje.

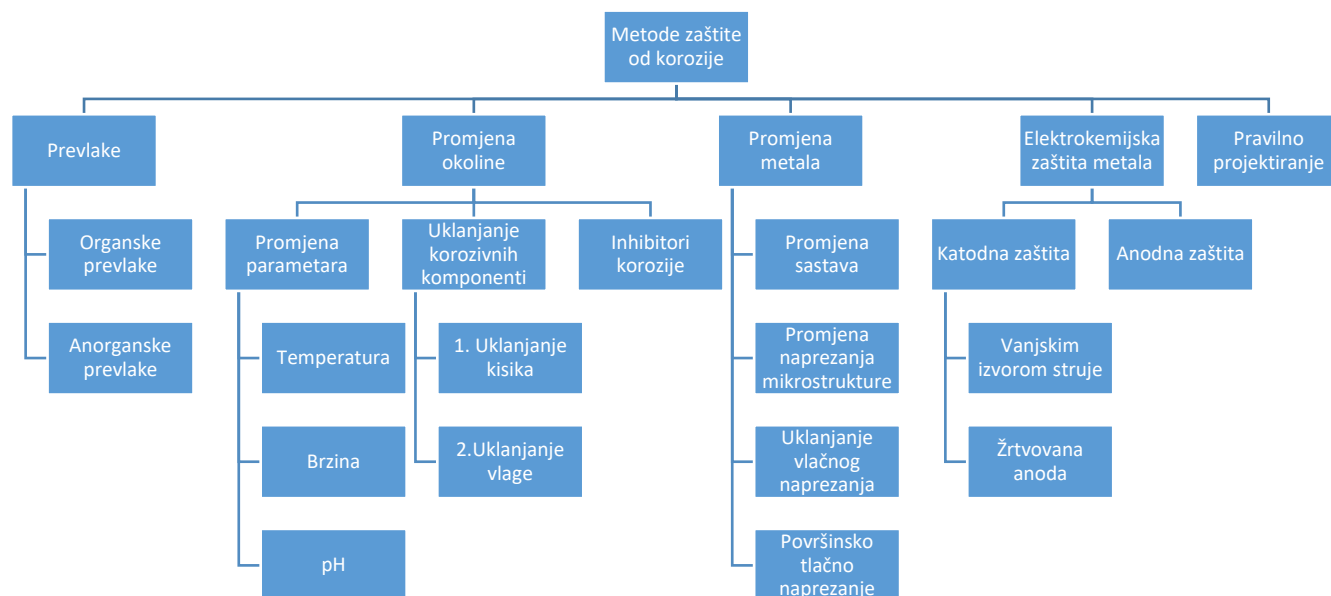
## **2.3. Metode zaštite od korozije**

S obzirom da korozija izaziva veliki trošak u industriji te može biti iznimno opasna, potrebno je bilo otkriti metode kojima će se usporiti ili potpuno spriječiti korodiranje materijala.

Glavne metode za zaštitu metala od korozije su [2]:

- konstrukcijsko-tehnološke mjere
- elektrokemijska zaštita
- zaštita prevlačenjem
- korištenje korozijski postojanih materijala
- zaštita inhibitorima korozije.

Slika 4 prikazuje metode zaštite od korozije [7].



Slika 4. Grafički prikaz metoda zaštite od korozije [7]

## 2.4. Ekonomski značaj korozije

Procijenjen globalni trošak korozije prema NACE-u (eng. National Association of Corrosion Engineers) procijenjen je na 2,5 trilijuna američkih dolara. Najčešće se procjena štete određuje prema direktnom gubitku, odnosno prema troškovima popravka, zamjena uništene opreme, nanošenje antikoroziivne zaštite te često troškovi korištenja skupljih materijala od prvotnih. Neizravni gubici potencijalno mogu biti značajno veći jer korozija može biti uzrok nesreća, zastoja u pogonima, gubitak proizvoda, smanjene efikasnosti te onečišćenja okoliša. Taj iznos je ekvivalentan 3,4% globalnog BDP-a (2013.). Korištenjem dostupnih procedura za kontrolu korozije procjenjuje se da bi se mogla ostvariti ušteda između 15% i 35% troškova korozije, odnosno između 375 i 875 milijardi američkih dolara svake godine na globalnoj razini. U ove navedene troškove najčešće nije uključena sigurnost pojedinca ili posljedice za okoliš. Kroz mnoge situacije u kojima je skoro došlo do nesreće, incidente, nesreće, prisilna gašenja i slično, nekoliko je različitih industrija došlo do zaključka da je nedostatak upravljanja korozijom potencijalno veoma skupo te da se kroz pravilno upravljanje korozijom mogu postići ogromne uštede. Kako bi se postigao pun potencijal ovih ušteda, upravljanje korozijom i integracija u samu organizaciju potrebno je implementirati sustav upravljanja korozijom (CMS, eng. Corrosion Management System) [2] [8].

### 3. ANTIKOROZIVNA ZAŠTITA

U slučaju da željeni konstrukcijski materijal sam po sebi nije dovoljno postojan u eksploatacijskim uvjetima koji su propisani potrebno je promijeniti uvjete ili na isti nanijeti zaštitnu prevlaku. Korištenje prevlaka je najkorištenija metoda antikorozivne zaštite pa čak i zaštite od nekih drugih načina na koji se materijali oštećuju, primjerice trošenje trenjem. Izrazito je bitno da je osigurana dovoljna postojanost prevlake jer u suprotnom se ne postiže trajnost i pouzdanost proizvoda na kojem je prevlaka [3].

#### 3.1. Organske prevlake

Organska prevlaka je vrsta prevlake formirana od polimernih lanaca na bazi ugljika koji potječu iz prirodnih (biljnih ili životinjskih) ili sintetskih materijala [9].

Zaštita korištenjem organskim prevlakama je jedan od najčešće korištenih postupaka u zaštiti od korozije. 75 % sveukupnih metalnih površina zaštićeno je organskim prevlakama [2].

Premaz se odnosi na široku kategoriju jednog ili više međusobno povezanih slojeva nanesenih na površinu, što rezultira stvaranjem "suhog" filma. Nasuprot tome, izraz boja obično opisuje pigmentirane materijale različite od prozirnih filmova poznatih kao lakovi. Najčešća primjena premaza je za zaštitu podloga od korozije te za postizanje određenih estetskih svojstava. Dekorativni premazi također moraju imati zaštitna svojstva kako bi ta estetska svojstva trajala dulje. Zaštita podloge izrazito ovisi o debljini i poroznosti premaza. Ta dva svojstva su često obrnuto proporcionalna. Kada pada debljina premaza uslijed trošenja njegova zaštitna svojstva se smanjuju zbog povećane poroznosti. Usporedbe radi povećanom debljinom pada poroznost i propusnost sloja. Potpuno ravnomjernu debljinu premaza na svim dijelovima konstrukcije je nemoguće ostvariti, pogotovo kada su prisutne pukotine, rupe, izbočine i slično. Također je jako bitno svojstvo prionjivosti prevlake. To je svojstvo koje omogućuje da se premaz ili prevlaka prilijepe na metalnu površinu ili premaz koji je već na njoj. Ona može biti kemijska i mehanička. Premazi fizički odvajaju metalnu podlogu od okoline, no sam mehanizam zaštite nije toliko jednostavan. Premazi imaju 3 glavna načela kojom postižu zaštitu kroz dodavanja pigmenta [2]:

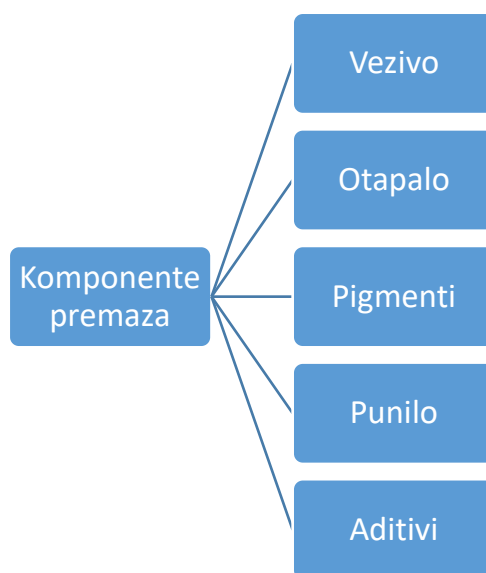
- učinak barijere
- učinak inhibitora
- galvanski učinak.

Učinak barijere se postigne korištenjem debljih sustava premaza čije su debljine od 250 do 500  $\mu\text{m}$  te imaju nisku propusnost na vodu. Dolazi do stvaranja barijere u kojoj se zadržavaju električno nabijeni ioni te se usporava propusnost vode i kisika prema površini. Upravo zbog te nepropusnosti za čelike koji su konstantno uronjeni u tekućinu efekt barijere je često prvi i jedini odabir po pitanju mehanizma zaštite od korozije [2].

Učinak inhibitora se ostvaruje korištenjem temeljnih premaza s inhibitorskim pigmentima koji pasiviziranjem površine, stvaranjem netopivih korozijskih produkata i neutralizacijom kiselih tvari zaustavljaju ionizaciju metala.

Galvanski učinak se postiže kugličastim pigmentom praškastog cinka koji se nalazi u temeljnom premazu. U tom novonastalom članku cink je neplemenitiji metal te je izložen koroziji, dok je površina metala zaštićena.

Svaki premaz uključuje vezivo, koje je u biti opna same prevlake i otapalo/razrjeđivač, zaduženo za otapanje veziva i kontrolira njegovu viskoznost. Premazi također mogu imati u sebi netopive praškove, punila i pigmente, koji daju boju premazima te ih prave neprozirnim. Također je moguće dodati razne dodatke/aditive. Na slici 5 je vizualni prikaz komponenti premaza [2].



**Slika 5. Komponente premaza**



### 3.1.1. Vezivo

Vezivo je organska tvar koja se nalazi u tekućem ili praškastom stanju te povezuje sve komponente premaza, a nakon aplikacije stvara tvrdi zaštitni sloj. Kako bi se postigla željena svojstva premaza, moguće je kombinirati više različitih veziva. Najbitnija veziva se baziraju na sušivim masnim uljima, poliplastima, prirodnim smolama, derivatima celuloze, sintetičkom ili prirodnom kaučuku i bitumoznim tvarima [2] [3].

Sušiva ulja pripadaju esterima masnih/karboksilnih kiselina te glicerola. Od karboksilnih kiselina najviše prevladavaju kiseline koje između atoma ugljika imaju dvostruke veze. Ulja se dobivaju prirodnim putem, na primjer iz sjemenki lana i raznog tropskog drveća. Sušenje se odvija oksidativnom polimerizacijom, odnosno djelovanjem kisika iz zraka. Prednost sušivih ulja je žilavost i postojanost na atmosferu pri naglim promjenama temperature i vlage. Nedostaci su mala tvrdoća, neotpornost na visoke temperature te nepostojanost u velikom broju kapljevina (najviše u lužinama i organskim otapalima) kod trajnih uranjanja. Uljni premazi se koriste za drvo i metale [3].

Epoksidne smole su polieteri viševalentnih fenola i alkohola. Napravljeni su od etiloksidnih prstenova i slobodnih OH - skupina. Od epoksidnih smola se proizvode jednokomponentna i dvokomponentna premazna sredstva. Prednosti epoksidnih premaza su:

- postojanost na visokim temperaturama (do 120 °C ), u atmosferi, vodi, lužinama, kiselinama, tlu i organskim otapalima
- vrlo dobra prionjivost na svim podlogama
- čvrstoća
- mala hrapavost.

Također je moguće povećati žilavost dodatkom katrana. Nažalost izloženost sunčevoj svjetlosti im uzrokuje kredanje (ultraljubičaste zrake uzrokuju raspadanje veziva te se raspadanje manifestira kao pojava prašine na površini). Kredanje uništava izgled prevlake i smanjuje otpornost na trenje [3].

Poliuretani (skraćeno PUR) su smole koje se primjenjuju sa sušivim uljima i alkidima. Premazi na osnovi poliuretana mogu biti jednokomponentni ili najčešće dvokomponentni. Svojstva poliuretanskih prevlaka mogu značajno varirati ovisno o sastavu, tako da te prevlake mogu biti

male tvrdoće i elastične, srednje tvrdoće i povrativo taljive pri zagrijavanjima te visoke tvrdoće i netaljive nakon katalitičkog ili temperaturnog otvrdnjavanja. Nešto što je zajedničko svim poliuretanskim prevlakama je postojanost u: atmosferi, vodi, kiselim i lužnatim vodenim otopinama te u organskim otapalima. U usporedbi s epoksidnim smolama poliuretanske prevlake imaju bolja mehanička svojstva, imaju malo slabiju postojanost u lužinama, no bolju postojanost u kiselinama i prema oksidansima. Dodatkom katranskih smola poliuretanske smole imaju manju postojanost u otapalima. Poliuretanske prevlake se koriste za zaštitu metala i nemetala [3].

Silikonska veziva (poliorganosiloksani) su napravljeni od lanaca izmjenično povezanih atoma silicija i kisika gdje su slobodne valencije silicija popunjene organskim radikalima, odnosno atomima kisika koji omogućavaju umrežavanje. Ta veza se naziva siloksan ili polisiloksan. Silikoni na zraku i Sunčevom svjetlu ne mijenjaju svoj izgled. Također imaju vrlo dobru prionjivost na građevinske materijale i metale. Hidrofobni su, što znači da imaju sposobnost odbijanja vode. To je osobito pogodno za beton i opeku. Silikoni imaju dobru postojanost u korozivnim otopinama. Silikoni koji imaju visok udio slobodnih radikala tvore elastomerne premaze, a silikoni s više silicija i kisika tvore duromerne veće tvrdoće, ali manje žilavosti. Silikoni su temperaturno vrlo otporni, neki mogu izdržati temperature i do 600 °C [3] [10]. Svojstva veziva su prikazana u tablici 1.

**Tablica 1. Veziva i njihova svojstva [11]**

| Vezivo            | Trošak sustava       | Tolerancija na loše pripremljenu površinu | Kemijska otpornost | Otpornost na otapala | Otpornost na vodu | Ponovno nanošenje nakon vremena    | Kratki opis   |
|-------------------|----------------------|---|--------------------|----------------------|-------------------|------------------------------------|---|
| Katranski premazi | Nizak                | Dobra                                     | Srednja            | Niska                | Dobra             | Vrlo dobro sa premazima istog tipa | Samo tamne i crne boje. Može omekšati pri visokim temperaturama |
| Alkidne smole     | Nizak prema srednjem | Srednja                                   | Niska              | Niska prema srednjem | Srednja           | Dobro                              | Dobra estetska svojstva. Visoka razina otapala.                 |

|                                       |                       |            |            |       |            |         |  |
|---------------------------------------|-----------------------|------------|------------|-------|------------|---------|--|
| Akrilatna veziva                      | Srednji prema visokim | Niska      | Dobra      | Niska | Dobra      | Dobro   | Premazi niske tvrdoće te ljepljivi.              |
| Epoksidi za loše pripremljene podloge | Srednje prema visokim | Dobra      | Dobra      | Dobra | Dobra      | Dobro   | Visok raspon površina                            |
| Epoksidi sa vrhunskim svojstvima      | Srednje prema visokim | Vrlo niska | Vrlo dobra | Dobra | Vrlo dobra | Loše    | Pojava kredanja uslijed UV zračenja              |
| Uretani i poliuretani                 | Visoki                | Vrlo niska | Vrlo dobra | Dobra | Vrlo dobra | Loše    | Potencijalno bolja estetska svojstva od epoksida |
| Silikati                              | Visoki                | Vrlo niska | Srednja    | Dobra | Dobra      | srednje | Potrebna dodatna priprema površine               |

### 3.1.2. Otapala

Otapala pripadaju hlapivim organskim spojevima. U njima dolazi do otapanja veziva, bez da dođe do ikakvih kemijskih promjena. Njihova uloga je da se postigne određena viskoznost zaštitnog premaza kako bi se isti mogao bez poteškoća nanijeti na površinu samog materijala. Često se radi o lako hlapivim i niskoviskoznim smjesama čija su osnova alkoholi, esteri, ketoni, aromatski, alifatski i klorirani ugljikovodici. Navedene kapljevine se nerijetko koriste kao razrjeđivači za smanjenje viskoznosti samih premaza te kao otapala veziva. Otapalo se dodaje u boju u proizvodnji, a razrjeđivač se, ako je potrebno, dodaje malo prije nanošenja samog premaza [2].

### 3.1.3. Pigmenti

Pigmenti su netopljive čestice, organskog ili anorganskog porijekla te mogu biti obojene ili neobojene. Pigmenti su praškasti, u pasti ili kao vlakna. Funkcija pigmenata je da se postigne neprozirnost i određeno obojenje, a dodatna svojstva koja se postižu uporabom pigmenata su:

dodatno zaštitno djelovanje premaza, manja osjetljivost na svjetlo i temperaturu te poboljšana mehanička svojstva. Pigmenti mogu biti dekorativni, antikorozivni te mogu imati obje karakteristike. Pigmente s obzirom na mehanizam zaštitnog djelovanja dijelimo na dvije skupine. Prva skupina su aktivni zaštitni pigmenti koji se nalaze u temeljnim premazima, a druga skupina su inertni zaštitni pigmenti koji se nalaze u svim premazima [2].

#### **3.1.4. Punila**

Punila su anorganske tvari koje se ne tope u primijenjenu mediju. Obično su bijele boje ili slabije boje. Primarna im je funkcija poboljšavanje mehaničkih svojstava, svojstava tečenja, mazivosti, podizanje i spuštavanje razine sjaja te poboljšanje barijernih svojstava filma, odnosno dodatna otpornost na agresivne plinove te na difuziju vode. Punila se mogu dobiti iz minerala pronađenih u prirodi ili u vodenim otopinama sintetskim taloženjem. Po kemijskom sastavu punila se dijele u sulfate, okside, karbonate te silikate [2].

#### **3.1.5. Aditivi**

Aditivi su tvari čija je uloga u premazu sprječavanje mnogih nedostataka ili da im se omogući nekakvo specifično svojstvo koje se teško postiže. Nedostaci koji se pokušavaju spriječiti su sedimentacija, pjena te loše razlijevanje, a nestandardna svojstva koja se dodaju mogu biti klizavost, svjetlostabilnost te vatrousparenje. Aditivi se inače dodaju u jako malim količinama u sami premaz, ali je njihov efekt značajan. Međutim treba biti iznimno oprezan prilikom doziranja aditiva jer ako je koncentracija prevelika može doći do brojnih nepoželjnih nuspojava. Aditivi se dijele prema nedostatku na koji djeluju [2]:

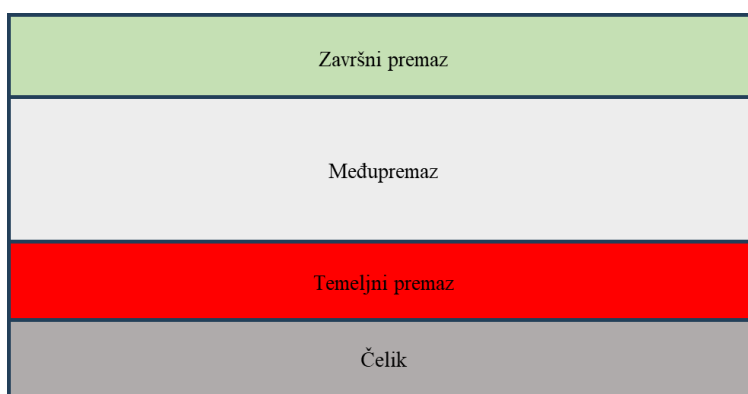
- reološki aditivi
- aditivi protiv pjenjenja
- disperzanti i okvašivači
- aditivi za poboljšanje izgleda površine materijala
- sušila i katalizatori
- konzervansi
- korozijski inhibitori
- svjetlosni stabilizatori.

### 3.2. Višeslojni sustav premaza

Kada postoji više slojeva u sustavu premaza, prema namjeni se dijele na [2]:

- Temeljne premaze
- Međupremaze
- Završne premaze.

Na slici 6 je vizualno prikazan višeslojni sustav premaza.



**Slika 6. Višeslojni sustav premaza**

Glavna uloga temeljnih premaza je osiguranje dobre adhezije na podlogu te zaštita od korozije. Oni se nanose direktno na površinu metala. Glavne značajke temeljnog premaza su:

- prionjivost - mora se dobro vezati na podlogu
- inertnost - visoka otpornost koroziji i na kemikalije
- kohezija - visoka čvrstoća sloja
- povezanost s međupremazom
- elastičnost - mora pratiti pomake podloge.

Međupremazi mogu imati jedan ili više slojeva, te je poveznica temeljnog i završnog premaza. Mora prijanjati na temeljni sloj, a biti dobra podloga za prijanjanje završnog premaza. Listićavim pigmentima ostvaruju se zaštitna svojstva. Oni se slažu paralelno s podlogom te sprječavaju prodor kisika i vlage do površine materijala. Neke od glavnih zadaća međupremaza su osigurati: traženu debljinu premaza, visoku otpornost na kemikalije, otpornost na vlagu, električni otpor, visok stupanj kohezije te jaku vezu između temeljnog i završnog sloja.

Završni premaz je onaj koji dolazi na kraju te daje svojstva premaza poput nijansa boja, stupnja sjaja, izgled te otpornost na vanjske utjecaje. Ima malu debljinu, ali zbog velikog udjela veziva ima visoku gustoću te čvrstoću. Neke od glavnih zadaća završnog premaza su: osigurati UV otpornost, spriječiti utjecaj okoline te imati otpornost na kemikalije, vodu i atmosferske uvjete, otpornost na trošenje i osigurati tražena estetska svojstva [2].

### 3.3. Klasifikacija premaza

Premazi se najčešće dijele prema [2]:

- sastavu, što najčešće predstavlja podjelu po različitim vezivima, no nekad može i po vrsti pigmenta
- osnovnoj primjeni
- izgledu
- površinama na koje se stavljaju
- broju komponenti koje se kombiniraju prije nanošenja premaza
- ulozi u komponentnom sustavu (temeljni sloj, međusloj, pokrivni sloj...)
- mehanizmu sušenja.

### 3.4. Priprema podloge za prevlačenje

Kako bi se prevlaka što čvršće prihvatila na površinu materijala potrebno je napraviti pripremu podloge. Pripremom podloge za prevlačenje postiže se čišćenje i kondicioniranje površine samog materijala. Čišćenjem se sa podloge materijala uklanjaju sva usitnjena i labava onečišćenja. Neka od njih su: masne tvari, većinski dio korozivskih produkata, oštećene prevlake, čađa, prašina, koks i pepeo. Kondicioniranjem se osigurava tražena kakvoća površine, odnosno dobivamo traženu hrapavost površine [3].

Priprema površine je iznimno bitna za što dulji vijek trajanja proizvoda jer nanošenjem premaza na nepripremljenu površinu ne zadovoljavaju se kriteriji zaštite. Prema nekim procjenama u 85 % slučajeva gdje je sustav zaštite prijevremeno propao je bila loše pripremljena površina. Priprema površine se obično sastoji od: operacija odmašćivanja, mehaničkih te kemijskih operacija [2].

### **3.4.1. Odmaščivanje**

Odmaščivanje je dio pripreme površine koji obuhvaća odstranjivanje mineralnih i bioloških masnih tvari koje se nalaze na površini metala, kako bi se prevlaka bolje uhvatila za sam materijal. Odmaščivanje anorganskih nemetala i metala se provodi fizikalnim otapanjem u u hlapivim organskim otapalima koje naknadno ispare s odmašćenih podloga. Za to se najčešće primjenjuju lančani ugljikovodici (tipa benzin i petrolej) te halogenirani alifatski ugljikovodici (trifluortrikloretan i trikloretilen). Najveći problem kod njih su laka zapaljivost, štetne pare koje idu u okoliš te loša sposobnost miješanja s vodom (ako je uopće moguća) što uzrokuje problem kod odmaščivanja masnih i mokrih podloga [2].

Za odmaščivanje se također koriste razrjeđivači. Smjese su to hlapivih organskih kapljevina, najčešće razni ugljikovodici, esteri, alkoholi i ketoni. Razrjeđivači su također zapaljivi te se ne miješaju s vodom. Uz navedene postupke odmaščivanja koriste se još i tretiranje lužnatim otopinama, parno odmaščivanje, ultrazvučno odmaščivanje, odmaščivanje mlazom vodene pare, spaljivanjem (temperature preko 180 °C).

### **3.4.2. Mehaničko čišćenje**

Kod mehaničkog čišćenja postoji ručno i strojno čišćenje te čišćenje vodenim mlazom i mlazom abraziva.

Ručno čišćenje se provodi samo kod uklanjanja boja, hrđe te kamenca koji se samo labavo drže za podlogu. Zbog sporosti samog postupka se ne preporuča za veće površine. Koriste se razni ručni alati poput strugala, četki, dljeteta, čekići i slično.

Strojno mehaničko čišćenje se provodi raznim električnim ili pneumatskim alatima na koje su montirani mehanički alati. Znatno je veća produktivnost nego kod ručnih tehnika. Najčešće se koriste rotacijske četke i to za manja oštećenja te kad je potrebno ukloniti rahlu koroziju, trosku, koroziju i slično te aktivirati zaštitni premaz za nanošenje pokrivenog.

Brušenje služi za dizanje kvalitete površine, uklanja se korozija, metalne kapi nakon zavarivanja, zaobljuju se rubovi te čiste druge nepravilnosti. To se izvodi abrazivnim zrnima u rotacijskim diskovima koji se nalaze na brusilicama. Što su manja zrna abraziva to je brušenje finije te se primjenom najfinijih zrnaca postiže visok sjaj metalne površine.

Čišćenje vodenim mlazom se bazira na energiji udara vode od površinu materijala bez ikakvih abraziva, čime je ova tehnika jedna od ekološki najprihvatljivijih. Uklanjaju se rahli produkti korozije, masnoće, soli, stare boje, okujina i razne druge nečistoće. Postupak se redovito koristi za popravke starijih premaznih sustava jer pomoću regulacije vodenog tlaka mogu se ukloniti samo oštećeni slabiji premazi. Veliki nedostatak postupka je nemogućnost postizanja većeg stupnja hrapavosti površine potrebnog za nanošenje samog premaza. Drugi nedostatak je površinska korozija koja nastane s obzirom da je ugljični čelik neotporan na vodu. Iz tog razloga se premaz nanosi odmah nakon čišćenja ili se u vodu kojom se čisti površina dodaje inhibitor korozije. Na slici 7 vidi se čišćenje mokrim mlazom abraziva.



Slika 7. Čišćenje mokrim mlazom abraziva [12]

Čišćenje površine se također se može izvršiti suhim ili mokrim mlazom abraziva. Koliko je mlaz efektivan ovisi o tvrdoći abrazivnih čestica, brzini mlaza, upadnom kutu, veličini i obliku čestica. Problem je što tvrde čestice su krhke te se brže troše, a mekše apsorbiraju previše energije. Velike čestice čiste dublje, ali sporije od manjih, no manje neće postići sidrenje. Korištenjem okruglih abrazivnih čestica postiže se površina bez oštrih vrhova, što je poželjno za nanošenje premaza.

Priprema površine mlazom se određuje prema normi HRN EN ISO 8501-1. Po toj normi su definirana 4 stanja površine prije pripreme (A, B, C i D) i 4 stupnja pripreme površine (Sa 1, Sa 2, Sa 2,5 i Sa 3).

U tablici 2 su prikazani stupnjevi pripreme površina mlazom abraziva [2].



**Tablica 2. Stupnjevi pripreme površine mlazom abraziva [2]**

|        |   |
|--------|---|
| Sa 1   | Lagano čišćenje abrazivnim mlazom           |
| Sa 2   | Temeljito čišćenje abrazivnim mlazom        |
| Sa 2,5 | Vrlo temeljito čišćenje abrazivnim mlazom   |
| Sa 3   | Čišćenje abrazivnim mlazom do čistog čelika |

### 3.5. Zaštita metalnim prevlakama

Metalizacija je postupak nanošenja metalne prevlake na površinu materijala u svrhu zaštite od korozije te drugih načina trošenja materijala. Također se koristi za obnavljanje istrošenih dijelova, postizanje bolje električne i/ili toplinske vodljivosti te postizanja određenih estetskih svojstava. U metalizaciji postoje fizikalni postupci i kemijski postupci. U fizikalne postupke ubrajamo prskanje, platiranje, navarivanje, vruće uranjanje, nataljivanje, lemljenje te lijepljenje. U kemijske postupke ubrajamo galvanizaciju, redukcija u otopini i ionska izmjena. Također postoje difuzijska metalizacija i metalizacija napanjanjem koji pripadaju i fizikalnim i kemijskim postupcima [13].

#### 3.5.1. Galvanizacija

Galvanizacija (elektroplatiranje) je najčešći postupak nanošenja metalne prevlake na metale i nemetale pomoću elektrolize ionskih otopina. Katoda je materijal izložen elektrolitu, a anoda je čisti metal od kojeg je prevlaka. Katoda se spaja na negativni pol izvora istosmjernje električne energije iznosa od 4 V do 10 V. Galvanska prevlaka se formira redukcijom iona metala u elektrolitu elektronima koji su na samom materijalu. Debljina nanosene prevlake može biti od 0,1  $\mu\text{m}$  do 1 mm. Najčešći su materijali prevlake nikal, bakar, cink, krom, kadmij, srebro, olovo, rodij, zlato i platina. Prednosti galvanizacije su: sposobnost spajanja metala koji imaju različita mehanička svojstva, ekonomičnost, jednostavnost regulacije procesa, dobro spajanje osnovnog materijala s prevlakom, visoka razina čistoće prevlake te niska temperatura obrade. Neki od nedostataka galvanizacije: neravnomjerna debljina prevlake na različitim profilima, mehaničke napetosti, loša mikroraspodjela i galvanski piting [2].

### 3.5.2. Vruće uranjanje

Proces vrućeg uranjanja se odvija spuštanjem metala koji se treba prevući u rastaljeni metal koji ima nisko talište. Prevlaka nastaje vađenjem metala iz taline koja se skruti na obratku zbog procesa kvašenja. Glavni preduvjet da bi vruće uranjanje bilo moguće je da je talište taline znatno niže od tališta materijala kojemu je potrebna prevlaka. Podloge od ugljičnog čelika, bakra i bakrenih legura, sivog lijeva su optimalne za prevlake od cinka, kositra, olova, aluminijske, PbSn i AlZn legura. Drugi preduvjet je mogućnost međusobnog legiranja podloge i prevlake tijekom uranjanja. Time nastaju kristali mješanci te se osigurava vrhunska prionjivost prevlake na podlogu. Prevlake dobivene vrućim uranjanjem su deblje od onih dobivenih galvanizacijom.

Jedan od najkorištenijih postupaka vrućeg uranjanja je pocinčavanje. Koristi se za zaštitu raznih čelika od atmosferske korozije i korozije u neutralnom tlu. Prevlaka sa cinkom može trajati i preko 50 godina u atmosferi koja ni izrazito agresivna. Plinovi poput  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SO}_3$  te  $\text{Cl}^-$  ioni znatno ubrzavaju koroziju [2].

Proces vrućeg cinčanja se sastoji od 4 dijela. Prvi je korak priprema površine od svih nečistoća te se naknadno vodom i kiselinom ispiru zaostale hrđe, ljuske te ostale organske komponente. Nakon toga uklanjaju oksidi. Oksidi se stvaraju na površini tijekom čišćenja ili čak samo do stajanja na zraku. Zatim slijedi uranjanje u talinu cinka čija je temperatura oko 450 °C. Najčešće proces traje između 30 i 120 s, odnosno sve dok se ne stvori legirni sloj cinka i metala s površine. Zadnji korak je sušenje te ako je potrebno; obrada površine.

Neke od prednosti vrućeg cinčanja su:

- vrhunska trajnost metalnog sloja u atmosferama pH između 5 i 10
- vrhunska zaštita kompleksnih geometrijskih dijelova koje je teško zaštititi drugim metodama
- brzina postupka
- dobra zaštitna i mehanička svojstva
- mogućnost zaštite vanjskih i unutarnjih ploha
- zaštićeni dio je odmah nakon pripreme spreman za eksploataciju.

Glavni nedostaci vrućeg cinčanja su [2]:

- dimenzije proizvoda koji se cinčaju su ograničeni sa dimenzijama kade za cinčanje
- izvan pH raspona od 5 do 10 potrebno je dodatno zaštititi površine premazima
- gubitak rastaljenog metala
- postoji šansa za deformaciju predmeta zbog visokih temperatura
- potrebno je zatvoriti sve poroznosti na površini inače će stavljanjem premaza preko cinčanog sloja doći do pojave bubrenja i mjehurića
- vruće cinčanje nije pogodno za dijelove koji se uranjaju.

Na slici 8 prikazano je vruće cinčanje transformatorskog kotla.



**Slika 8. Vruće cinčanje transformatorskog kotla [6]**

#### 3.5.2.1. Dupleks sustav zaštite

Može se dogoditi da površine koje su pocinčane nemaju zadovoljenu antikorozivnu zaštitu ili neki drugi zahtjev. Tada se na njih stavlja dodatan premaz. Tu kombinaciju vrućeg cinčanja i premaza nazivamo dupleks sustav zaštite površina. Dupleks sustavom zaštite dobivaju se svojstva koja sama po sebi ne pruža ni zaštita premazima ni zaštita vrućim cinčanjem. Kod dupleks sustava cinkova prevlaka ima barijernu ulogu te te katodno štiti podlogu, dok premaz usporava koroziju cinka te također služi kao barijera. To je sinergijski efekt. Time se postiže 1,5 do 2,3 puta dulji životni vijek konstrukcije u usporedbi od konstrukcija zaštićenih cinkom ili premazom. Dupleks sustav zaštite od korozije se koristi za radio tornjeve, dalekovode,

cestovne znakove, mostove, razne čelične konstrukcije, transformatorske kotlove te automobilske industriji.

Prednosti dupleks sustava zaštite površina su:

- bolja antikorozivna zaštita
- ekonomičnost
- efekt sinergije
- dobra estetska svojstva
- pojednostavljeno naknadno bojanje
- označavanje korištenjem boja, primjerice za maskiranje
- dulji vijek trajanja pocinčanog proizvoda
- popravak u nedostacima pocinčanog sloja.

Glavni nedostatak dupleks sustava zaštite površina je priprema same površine. U slučaju da površina nije dovoljno dobro pripremljena, sa velikom sigurnošću se može reći kako će doći do problema s adhezijom premaza i pocinčanog sloja. Zbog specifičnog vremena pasivizacije cinka treba biti oprezan kada stavljati premaz. Naime, odmah nakon pocinčavanja dolazi do stvaranja cinkovih oksida na površini. Zatim unutar par sati ti oksidi prelaze u cinkove hidrokside. Par tjedana kasnije (ili čak mjeseci) se stvara gusti sloj cink karbonata koji zatim prelaze u cinkovu patinu. U slučaju da se premaz stavi unutar prvih 24 do 48 h (dok su na površini cinkovi oksidi) ili nakon stvaranja cinkove patine, u tom slučaju priprema površine nije problem. Laganim brušenjem se uklanjaju sve nečistoće, ulja i masti. Kritično vrijeme za nanošenje premaza je 48 sati nakon pocinčavanja i prije stvaranja cinkove patine (što može biti i godinu dana). U tom slučaju potrebno je potpuno ukloniti okside i hidrokside s površine radi dobre adhezije. Tada se izvodi brušenje, pjeskarenje i korištenje blage kiseline za čišćenje [2] [14].

### **3.5.3. Metalizacija prskanjem**

Vruće prskanje je postupak kojim se štrcanjem rastaljenog metala stvara metalna prevlaka na površini. Stvori se mlaz kapljica, bilo zrakom ili nekim drugim plinom, koji brzinama između 50 i 850 m/s udara od podlogu materijala. Kapljice se brzo hlade te kreiraju prevlaku. Za razliku od vrućeg uranjanja, prskanjem se mogu nanijeti skoro svi metali i legure poput cinka, aluminija, olova, bakra, nehrđajućih čelika, kositra, molibdena te mnogih drugih. Moguće je

koristiti i nemetale poput raznih smjesa karbida, borida, silikata i nitrida. Valja naglasiti da se ovim postupkom podloge zagriju na svega 50 do 200 °C, tako da se mogu metalizirati i podloge s niskim talištem.

Neke od prednosti metalizacije prskanjem su: mogućnost zaštite većih konstrukcija, relativna jednostavnost, mogućnost korištenja postupka na terenu te regulacija debljine prevlake.

Neki od nedostataka metalizacije prskanjem su: veliki gubitak materijala, opasni radni uvjeti, visoka poroznost prevlake kod tanjih slojeva te niska čvrstoća spajanja prevlake na površinu predmeta [2].

Na slici 9 je prikazan postupak metalizacije cinkom.



Slika 9. Metalizacija cinkom [15]

### 3.6. Zaštita nemetalnim anorganskim prevlakama

Nemetalne anorganske prevlake se mogu nanijeti fizikalnim te kemijskim postupcima. Jedan od bitnijih postupaka fizikalnog nanošenja je emajliranje, odnosno stvaranje sloja alkalnog borosilikatnog stakla na samu metalnu površinu. Nemetalne anorganske prevlake, primjerice oksidi, se nanose i u rastaljenom stanju prskanjem. Fizikalnim postupcima se nerijetko nanose cement i beton, te se to izvodi prskanjem, oblaganjem ili premazivanjem. Kemijskim postupcima osnovni metal sudjeluje u nastanku prevlake pa je osigurano dobro prijanjanje prevlake. Tim kemijskim postupcima gdje sudjeluje podloga metala nastaju različite fosfatne,

oksidne, kromatne i mnoge druge prevlake koje daju bolja antikorozivna svojstva. U tablici 3 prikazani su postupci, metode te svojstva prevlaka [16].

**Tablica 3. Postupci, metode i najvažnije karakteristike anorganskih prevlaka [3]**

| Postupak     | Prevlaka/Podloga  | Metoda prevlačenja  | Karakteristika postupka i glavna svojstva prevlaka  |
|--------------|---|---|---|
| Emajliranje  | Borosilikatno staklo na niskougljičnim čelicima   | Često dvoslojno<br>Mokro: uranjanjem u vodoglinenu kašu, prelijevanjem te prskanjem, sušenje i pečenje<br>Suho: puderom na zagrijan sivi ljev | Visoka cijena opreme, estetske, glatke, krhke i korozijski otporne prevlake   |
| Anodizacija  | $Al_2O_3$ na aluminij i njegove legure  | Anodna oksidacija pri elektrolizi u kiselinama; poslije dolazi začepljivanje pora   | Visoka cijena opreme, regulacija debljine slojeva prevlake, tvrda, krhka i ravnomjerna prevlaka                                     |
| Bruniranje   | Željezni oksidi na ugljičnim čelicima   | Izlaganje zagrijanom lužnatom otopini s oksidansima, zagrijanom zraku, oksidativnim talinama i dr.  | Prevlaka crne ili tamnosmeđe boje, debljine do 2 $\mu m$ , upija svjetlo, porozna, primjereno za optičke uređaje i vojnu industriju |
| Fosfatiranje | Netopivi metalni fosfati na ugljične čelike, cink i aluminij  | Prskanjem ili uranjanjem sa fosfatno-kiselom otopinom topljivih $Zn^{2+}$ , $Mn^{2+}$ i Fe-fosfata, pretvorba u netopive                      | Nestabilne otopine, čvrsta prionjivost prevlaka   |
| Kromatiranje | Kromati cink, kadmij, krom i magnezij na prevlakama cinka i kadmija te na legurama magnezija                                      | Uranjanjem u kiselu otopinu kromata, magnezijeve legure i elektrolizom  | Cink i kadmij bezbojni, žuti i zeleni filmovi, zaštita od atmosferske korozije  |
| Patiniranje  | Smjese hidroksida teških metala s karbonatima, sulfatima i drugima, metalni sulfidi na bakru, njegovim legurama, srebru i drugima | Obrada trljanjem ili uranjanjem različitim vodenim otopinama  | Zaštitno-dekorativni efekt, dobiju se smeđi, sivi i zeleni slojevi  |

### 3.7. Norma HRN EN ISO 12944

Zaštita čeličnih konstrukcija od korozije korištenjem premaza je regulirano normom HRN EN ISO 12944, dijelovi od 1 do 9, "Zaštita od korozije čeličnih konstrukcija zaštitnim sustavom boja". Kako bi se odabrao optimalan sustav premaza treba uzeti u obzir velik broj faktora, samo tako će se osigurati ekonomski i tehnički tehnološko najbolje rješenje. Dva ključna parametra su korozivnost okoliša i trajnost zaštite.

Trajnost sustava je vremenski period koji se odabere te predstavlja period između prvog nanošenja pa do prvog održavanja premaza. Trajnost se po normi HRN EN ISO 12944-1 definira po tablici 4.

**Tablica 4. Trajnost sustava premaza prema HRN EN ISO 12944-1**

| Kategorija  | Oznaka | Projektirani vijek trajanja premaza [godina] |
|-------------|--------|--|
| NISKA       | L      | Do 7   |
| SREDNJA     | M      | 7 do 15                                      |
| VISOKA      | H      | 15 do 25                                     |
| VRLO VISOKA | VH     | Više od 25                                   |

Korozivnost okoliša definira se normom HRN EN ISO 12944-2 te se nalazi u tablici 5.

**Tablica 5. Kategorije korozivnosti te opisi okoliša prema HRN EN ISO 12944-2**

| Kategorija korozivnosti | Primjeri tipičnog okruženja   |   |
|-------------------------|---|---|
|                         | Vanjsko   | Unutarnje   |
| C1 : jako niska         | -   | Grijane građevine sa neutralnom atmosferom. Uredi, trgovine, škole, hoteli.   |
| C2 : niska              | Okruženje sa malim zagađenjem. Ruralna područja.  | Negrijane građevine. Garaže, spremišta, sportske dvorane.   |
| C3 : srednja            | Gradska i industrijska okruženja, srednje zagađenje sumporovim dioksidom. Priobalna područja niskog saliniteta.                                     | Proizvodni objekti s visokom vlažnošću i određenim stupnjem onečišćenja zraka, npr. tvornice hrane, praonice, pivovare, mljekare. |
| C4 : visoka             | Industrijska i priobalna područja srednjeg saliniteta.  | Kemijske tvornice, bazeni, brodogradilišta.   |
| C5 : jako visoka        | Industrijska područja s vrlo visokom vlažnosti i agresivnom atmosferom te priobalna područja s visokom razinom saliniteta.                          | Objekti i površine s gotovo konstantnom kondenzacijom i visokom razinom onečišćenja.  |
| CX : ekstremna          | Pučina s visokom razinom saliniteta, industrijska područja s ekstremno visokom vlažnosti i agresivnom atmosferom te suptropska i tropska atmosfera. | Industrijska postrojenja s ekstremno visokom vlažnosti i agresivnom atmosferom.   |

U tablici 6 prikazani su sustavi premaza po korozivnostima okoliša. Tablica je napravljena po starom izdanju norme gdje nema C5 i CX stupnja, nego je C5-I i C5-M gdje C5-I predstavlja jako visoku kategoriju korozivnosti u industriji, a C5-M u moru. C5-I bi bio stupanj koji odgovara zahtjevima C5 [2].



**Tablica 6 Sustavi premaza za niskouglični čelik za stupnje korozivnosti okoliša od C2 do C5 [2]**

| Temeljni premazi |         |              |           | Pokrivni premazi | Sustav premaza |           | C2 |   |   | C3 |   |   | C4 |   |   | C5-I |   |   | C5-M |   |   |  |
|------------------|---------|--------------|-----------|------------------|----------------|-----------|----|---|---|----|---|---|----|---|---|------|---|---|------|---|---|--|
| Vezivo           | Pigment | Broj slojeva | DSF, (µm) | Vezivo           | Broj slojeva   | DSF, (µm) | L  | M | H | L  | M | H | L  | M | H | L    | M | H | L    | M | H |  |
| AK, AY           | Misc.   | 1-2          | 100       | -                | 1-2            | 100       |    |   |   |    |   |   |    |   |   |      |   |   |      |   |   |  |
| AK               | Misc.   | 1-2          | 80        | AK               | 2-4            | 160       |    |   |   |    |   |   |    |   |   |      |   |   |      |   |   |  |
| EP               | Misc.   | 1            | 160       | AY               | 2              | 200       |    |   |   |    |   |   |    |   |   |      |   |   |      |   |   |  |
| EP, PUR, ESI     | Zn (R)  | 1            | 60        | AY, CR, PVC      | 2-3            | 160       |    |   |   |    |   |   |    |   |   |      |   |   |      |   |   |  |
| AK, AY, CR, PVC  | Misc.   | 1-2          | 80        | AY, CR, PVC      | 3-5            | 200       |    |   |   |    |   |   |    |   |   |      |   |   |      |   |   |  |
| EP, PUR          | Misc.   | 1-2          | 120       | AY, CR, PVC      | 3-4            | 200       |    |   |   |    |   |   |    |   |   |      |   |   |      |   |   |  |
| EP, PUR, ESI     | Zn (R)  | 1            | 60        | AY, CR, PVC      | 2-4            | 200       |    |   |   |    |   |   |    |   |   |      |   |   |      |   |   |  |
| EP, PUR, ESI     | Zn (R)  | 1            | 60        | AY, CR, PVC      | 4-5            | 320       |    |   |   |    |   |   |    |   |   |      |   |   |      |   |   |  |
| EP               | Misc.   | 1-2          | 80        | EP, PUR          | 2-3            | 120       |    |   |   |    |   |   |    |   |   |      |   |   |      |   |   |  |
| EP               | Misc.   | 1-2          | 80        | EP, PUR          | 3-5            | 200       |    |   |   |    |   |   |    |   |   |      |   |   |      |   |   |  |
| EP, PUR, ESI     | Zn (R)  | 1            | 60        | EP, PUR          | 3-4            | 200       |    |   |   |    |   |   |    |   |   |      |   |   |      |   |   |  |
| EP, PUR, ESI     | Zn (R)  | 1            | 60        | EP, PUR          | 3-4            | 240       |    |   |   |    |   |   |    |   |   |      |   |   |      |   |   |  |
| EP               | Misc.   | 1-2          | 80        | EP, PUR          | 3-5            | 280       |    |   |   |    |   |   |    |   |   |      |   |   |      |   |   |  |
| EP, PUR, ESI     | Zn (R)  | 1            | 60        | EP, PUR          | 3-4            | 320       |    |   |   |    |   |   |    |   |   |      |   |   |      |   |   |  |
| EP, PUR          | Misc.   | 1-2          | 80        | EP, PUR          | 3-4            | 320       |    |   |   |    |   |   |    |   |   |      |   |   |      |   |   |  |

## 4. PREMAZI BOGATI CINKOM

Premazi bogati cinkom su posebna vrsta premaza koji pružaju galvansku zaštitu željeznom supstratu. Kao što samo ime kaže, vezivo je visoko zasićeno cinkovim praškom. Cink je u ovom slučaju pigment. Nakon što se premaz nanese na temeljito očišćenu podlogu, vezivo drži čestice cinka u kontaktu s čelikom i obrnuto. Time je ostvaren metalni kontakt između dva različita metala te dolazi do stvaranja galvanskog članka. U toj kombinaciji cink postaje anoda te se žrtvuje kako bi se zaštitio temeljni katodni čelik. Jedna od glavnih prednosti korištenja premaza bogatih cinkom je potpuna eliminacija rupičaste i potpovršinske korozije, čak i u prisustvu raznih rupica, ogrebotina, praznina ili rezultata abrazije u samom sustavu premaza. Niti jedan drugi premaz nema to svojstvo i upravo zbog toga je korištenje premaza obogaćenih cinkom veoma rasprostranjeno. Naravno postoje i nedostaci korištenja premaza obogaćenih cinkom. Čelična površina mora biti očišćena od svih ostataka stare boje, hrđe ili bilo kojih drugih nečistoća koje mogu omesti kontakt metala s metalom. Posljedično, priprema površine mora biti izrazito temeljita. Premazi obogaćeni cinkom zbog izrazite reaktivnosti cinkovog praha nisu optimalni izbor za prostore gdje je pH izvan raspona od 5 do 10. Kisele i lužnate otopine napadaju pigment cinkov prašak čak i u slučaju kada se koristi završni premaz te će kemikalije proći kroz sve rupe, ogrebotine i bilo kakve diskontinuitete na samom premazu i doći do cinka. Osim toga prilikom nanošenja premaza potrebno je konstantno miješati cinkov prah kako bi se spriječilo njegovo taloženje. Također crijevo ne smije biti predugačko jer se crijevo može začepiti zbog visoke koncentracije cinka u premazu, što uzrokuje gustoću od 2,2 do 3 kg/L. Premazi bogati cinkom prema vrsti veziva se dijele na organske i anorganske premaze obogaćene cinkom. Zanimljivo je naglasiti kako se organski premazi obogaćeni cinkom koriste češće u Europi i Aziji, dok se anorganski premazi obogaćeni cinkom više koriste u Sjedinjenim Američkim Državama i Kanadi [17].

### 4.1. Organski premazi obogaćeni cinkom

Organski premazi obogaćeni cinkom se koriste kod mostova, kemijskih i petrokemijskih postrojenja, kanalizacija, svim dijelovima izloženim slanim ili vlažnim uvjetima te u automobilskoj industriji za zaštitu praga automobila (donjeg dijela karoserije) te brojnih drugih unutarnjih čeličnih dijelova automobila koji su skloni koroziji. Organski premazi obogaćeni cinkom najčešće imaju epoksi poliamide, uretane i vinile kao veziva. Za proizvodnju kvalitetnog organskog premaza obogaćenog cinkom nije preporučljivo zamijeniti cinkov prašak

sa uobičajenim pigmentima. Potrebno je izrazito pripaziti omjere i sastav kako bi se ostvarila tražena galvanska zaštita i postigla željena svojstva premaza [17].

#### **4.2. Anorganski premazi obogaćeni cinkom**

Anorganski premazi obogaćeni cinkom dijele se u tri veće grupe:

- samosušivi alkalni silikati na bazi vode
- samosušivi etil silikati na bazi otapala
- naknadno sušivi alkalni silikati na bazi vode.

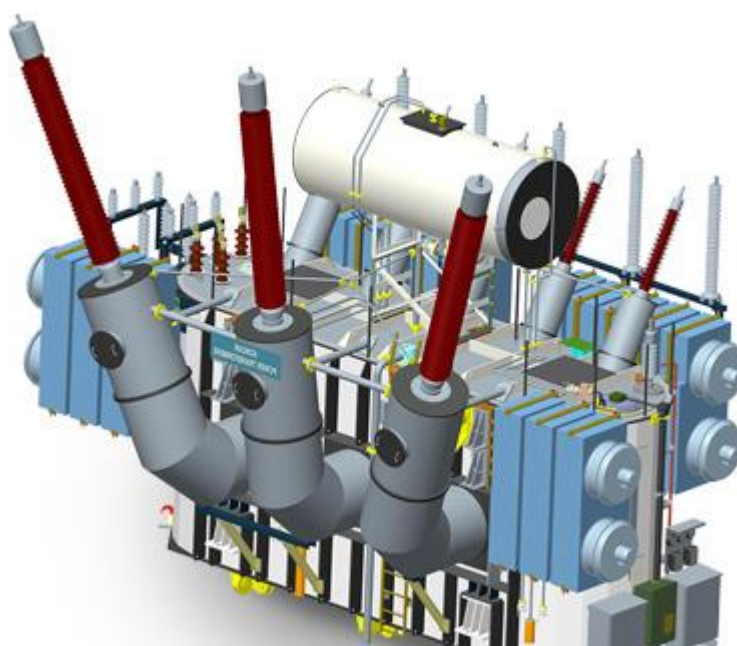
Iako je vezivo u sva tri slučaja anorganski silikat, što je u stvari isti materijal poput stakla i pijeska, sušenje veziva je različito u sva tri slučaja [17].

## 5. ENERGETSKI TRANSFORMATORI

Transformator je statički električni uređaj, bez kontinuirano pokretnih dijelova, koji se koristi u električnim sustavima za prijenos snage između 2 električna kruga pomoću elektromagnetske indukcije. Pojam energetski transformator odnosi se na one transformatore koji se koriste između generatora i distribucijskih krugova, a obično su nazivnog kapaciteta 500 kVA i više. Njegova glavna zadaća je povezati dva električna strujna kruga izmjenične struje te izmjeničnu struju zadanog napona pretvara u izmjeničnu struju višeg ili nižeg napona. Glavni dijelovi transformatora su: magnetska jezgra i bar dva međusobno odvojena namota s izolacijom. Ti namoti se nazivaju primar i sekundar. Kod jednofaznih transformatora primar i sekundar se sastoje od jednog namota, a kod trofaznih transformatora od tri namota.

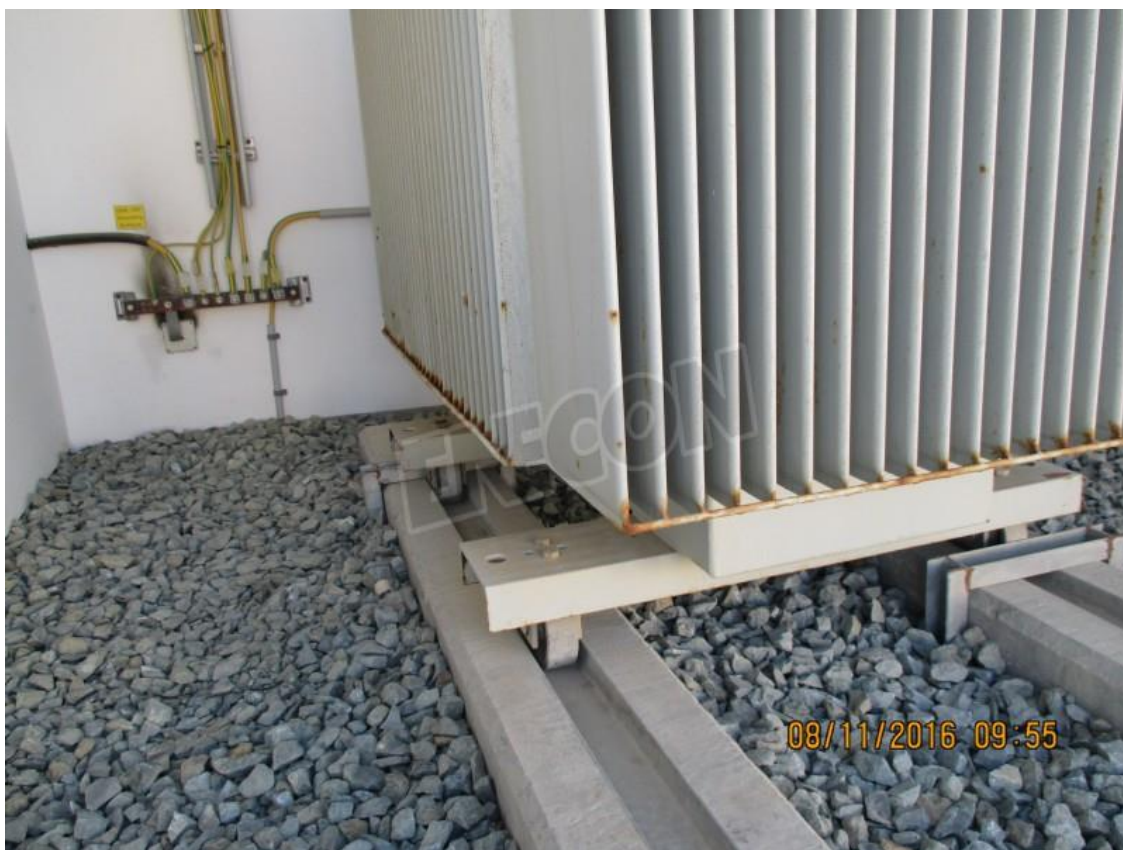
Energetski transformatori se odabiru prema primjeni, s naglaskom na prilagođeni dizajn koji je očigledniji što je jedinica veća. Energetski transformatori dostupni su za povećanje napona, primarno korišteni kod generatora i poznati kao generatorni transformatori za povećanje napona (GSU), te za smanjenje napona, uglavnom korišteni za napajanje distribucijskih krugova. Izgradnja transformatora ovisi o primjeni. Transformatori namijenjeni za unutarnju upotrebu su primarno suhog tipa, ali mogu biti i uronjeni u tekućinu. Za vanjsku upotrebu, transformatori su obično uronjeni u tekućinu [18] [19].

Slika 10 prikazuje 3D CAD model velikog energetskog transformatora.



Slika 10. 3D model velikog energetskog transformatora [20]

Jako bitan dio transformatora je kotao u kojem se nalaze svi dijelovi transformatora uključujući jezgru s namotima. Njegova glavna zadaća je da drži ulje i provodi toplinu iz unutrašnjosti transformatora u okolinu. Zbog toga se rashladna površina kotla povećava korištenjem rebrastih limova ili jednostavno dodavanjem rashladnih uređaja. Iznimno je bitna zaštita kotla transformatora od korozije zbog toga što se transformatori većih dimenzija pretežno drže u vanjskim prostorima, najviše zbog opasnosti od požara. Upravo zbog toga je kotao često izložen atmosferskim uvjetima koji znaju biti visoko korozivni. Na slici 11 vidljiv je transformator oštećen korozijom.



**Slika 11. Transformatorski oštećen korozijom [21]**

## 6. EKSPERIMENTALNI RAD

U eksperimentalnom dijelu rada pripremljena su i ispitana tri sustava antikorozivnih premaza koji se primjenjuju za zaštitu transformatorskog kotla. Na uzorcima su provedena sljedeća ispitivanja:

- mjerenje debljine premaza
- mjerenje tvrdoće uzoraka
- ocjena stupnja korozije oko ureza
- pull-off test prije i nakon vlažne i slane komore
- elektrokemijska ispitivanja s izmjeničnom strujom.

Prema normi ISO 8501-1 minimalna priprema površine je Sa 2,5, a prema normi ISO 8503-1 minimalno srednji stupanj hrapavosti zahtijeva se za sustave premaza sa temeljnim premazom obogaćenim cinkom. Za metalizirane je također minimalna priprema površine Sa 2,5.

Većina vanjskih izloženih dijelova transformatora se projektira prema stupnju korozivnosti C4 i C5. Stupanj pripreme površine treba biti Sa 2,5 ili Sa 3,0 [22].

Za potrebe ovih ispitivanja koristio se stupanj korozivnosti C5, stupanj pripreme površine Sa 2,5 te visoka trajnost od 15 do 25 godina.

### 6.1. Priprema uzoraka

Pripremljeno je 30 uzoraka, odnosno metalnih pločica od ugljičnog čelika S235. Dimenzije pločica su 150 x 100 mm, 5 mm debljine. Na slici 12 nalaze se uzorci pripremljeni za nanošenje zaštitnih premaza.



**Slika 12. Pripremljeni uzorci od ugljičnog čelika S235**

Površina je pripremljena vrlo temeljito mlazom abraziva (sačmarenjem), postignut je stupanj pripreme površine Sa 2,5. Na slici 13 može se vidjeti usporedba komparatora hrapavosti sa pripremljenom površinom.



**Slika 13. Usporedba pripremljene površine uzorka sa komparatorom hrapavosti**

Prema ISO 8503-1 pripremljena površina je između segmenta 2 i segmenta 3 što znači da ima hrapavost između 60 i 100  $\mu\text{m}$  što predstavlja srednju hrapavost.

Korišten je katalog sa pripremljenim površinama kako bi se utvrdio stupanj čistoće pripreme površine. Slika 14 prikazuje usporedbu slike te pripremljenog uzorka.



**Slika 14. Određivanje stupnja pripreme površine uzorka**

Usporedbom iz kataloga sa slikama pripremljenih površina vidljivo je da je stupanj pripreme površine uzorka Sa 2,5 što znači da je uzorak vrlo temeljito pripremljen mlazom abraziva.

#### **6.1.1. Test prašine**

Norma HRN EN ISO 8502-3 propisuje čistoću pripremljene površine. Ljepljiva traka se zalijepi na ispitni uzorak, odlijepi te zalijepi na bijelu površinu, u ovom slučaju papir. Slika 15 pokazuje proceduru testa prašine.



**Slika 15. Korištenje ljepljive trake za test prašine**

Usporedbom slikama po normi određuje se količina prašine na površini. Slika 16 prikazuje rezultate testa prašine.



**Elcometer 142 Dust Assessment**  
 in Accordance with ISO 8502-3

Evaluation de la quantité de poussière en Accordance avec ISO 8502-3  
 Prüfung der Staubmenge in Übereinstimmung mit ISO 8502-3

Name: **MATEJ ANTONIO BAJIĆ** Date: **Feb. 2024** Time: **9:30**  
 Firma: **KPT ZAGREB** Location: **PRIMATEO ČAKOVEC**

Dust quantity rating (Mean):  Dust particle size: (See table)

Quantité de poussière (moyenne) Taille des particules de poussière (voir tableau)  
 Staubmengenberechnung (Durchschnitt) Staupartikelgröße (Vgl. Tabelle)

Test 1  
 Test 2  
 Test 3  
 Test 4  
 Test 5

Dust Quantity Rating Quantité de poussière - Staubmengenberechnung

|   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|

Surface identification: **TEST PLATE**  
 Identification surface - Identifizierung der Oberfläche

Substrate backing used:  Elcometer 142 (T14219454)  Other  
 Description substrat de base utilisé: Autre - Andere  
 Verwendetes Trägermaterial unter Klebeband

Nature of surface tested: **GLASS**  
 Nature de la surface testée - Beschaffenheit der getesteten Oberfläche

Adhesive tape used:  Elcometer 142 (T9999358)  Other  
 Adhésif utilisé: Autre - Andere  
 Verwendetes Klebeband

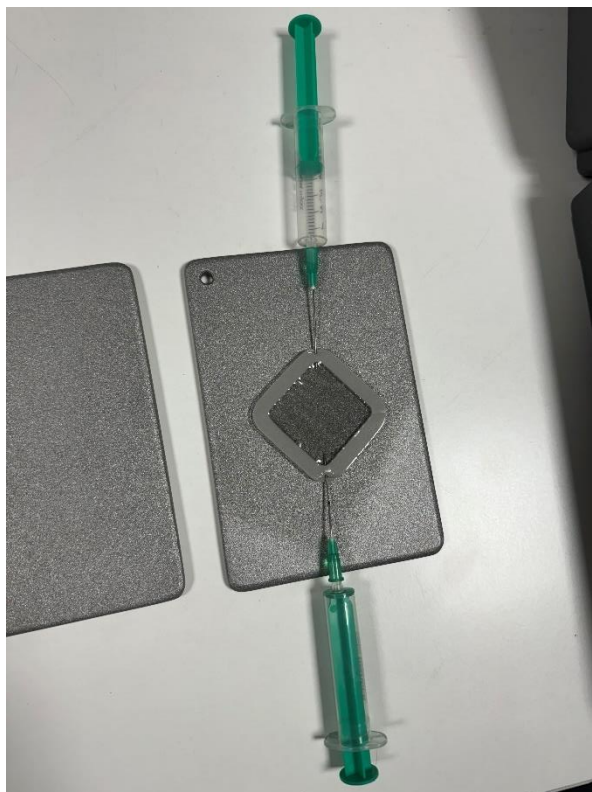
© Elcometer Limited 2009

**Slika 16. Rezultati testa prašine na 5 uzoraka**

Određena kategorija prašine na površini je 1 te je veličina čestica prašine također 1.

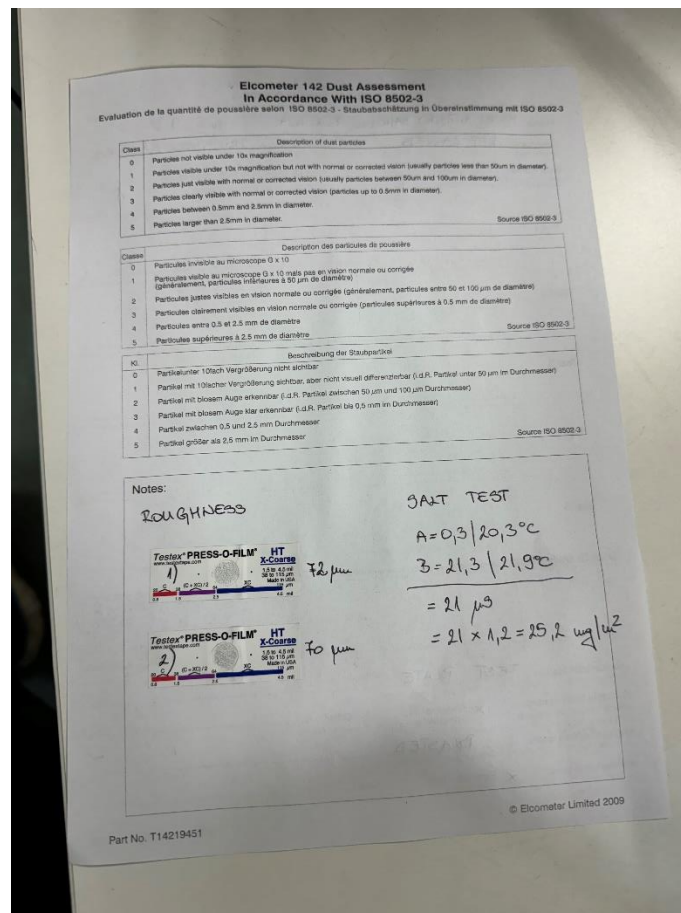
### 6.1.2. Bresle test

Normom HRN EN ISO 8502-9 testira se prisutnost soli na površini. Na površinu uzorka zalijepi se Bresle jastučić koji se korištenjem medicinske igle napuni destiliranom vodom izmjerene provodljivosti  $0,3 \mu\text{S}/\text{cm}^2$ . Koriste se dvije medicinske igle za unošenje tekućine kako bi se destilirana voda ravnomjerno raspodijelila, odnosno da nema zračnih mjehurića. Na slici 17 prikazan je postupak Bresle testa.



Slika 17. Bresle test

Jastučić se lagano pritišće 30 do 60 sekundi te se nakon toga izvlači destilirana voda te ponovno mjeri njena provodljivost. Ona u ovom slučaju iznosi  $21,3 \mu\text{S}/\text{cm}^2$ . Oduzimanjem konačne od početne vrijednosti dobivamo  $21 \mu\text{S}/\text{cm}^2$ . Na slici 18 su rezultati Bresle testa.



Slika 18. Rezultati Bresle testa

### 6.1.3. Projektiranje i nanošenje premaza

Sustavi premaza se projektiraju prema međunarodnom standardu ISO 12944-5:2018. U tablici 7 su prikazani podaci bitni za odabir sustava premaza na osnovu zahtjeva stupnja korozivnosti okoliša te trajnost sustava.

**Tablica 7. Sustavi premaza za ugljični čelik namijenjen kategoriji korozivnosti C5 prema ISO 12944-5:2018**

| Broj sustava | Temeljni premaz |         |              |           | Pokrivni premaz | Sustav premaza |                     | Trajnost sustava |   |   |   |
|--------------|-----------------|---------|--------------|-----------|-----------------|----------------|---------------------|------------------|---|---|---|
|              | Tip veziva      | Pigment | Broj slojeva | NDFT (µm) |                 | Tip veziva     | Ukupni broj premaza | NDFT (µm)        | L | M | H |
| C5.01        | EP, PUR, ESI    | Misc.   | 1            | 80 - 160  | EP, PUR, AY     | 2              | 180                 | x                |   |   |   |
| C5.02        | EP, PUR, ESI    | Misc.   | 1            | 80 - 160  | EP, PUR, AY     | 2 - 3          | 240                 | x                | x |   |   |
| C5.03        | EP, PUR, ESI    | Misc.   | 1            | 80 - 240  | EP, PUR, AY     | 2 - 4          | 300                 | x                | x | x |   |
| C5.04        | EP, PUR, ESI    | Misc.   | 1            | 80 - 200  | EP, PUR, AY     | 3 - 4          | 360                 | x                | x | x | x |
| C5.05        | EP, PUR, ESI    | Zn (R)  | 1            | 60 - 80   | EP, PUR, AY     | 2              | 160                 | x                |   |   |   |
| C5.06        | EP, PUR, ESI    | Zn (R)  | 1            | 60 - 80   | EP, PUR, AY     | 2 - 3          | 200                 | x                | x |   |   |
| C5.07        | EP, PUR, ESI    | Zn (R)  | 1            | 60 - 80   | EP, PUR, AY     | 3 - 4          | 260                 | x                | x | x |   |
| C5.08        | EP, PUR, ESI    | Zn (R)  | 1            | 60 - 80   | EP, PUR, AY     | 3 - 4          | 320                 | x                | x | x | x |

Za kategoriju korozivnosti C5 te visoku trajnost zaštite (H) se po tablici mogu uzeti u obzir sustavi C5.03, C5.04, C5.07, C5.08. S obzirom da se sustav dizajnira sa temeljnim premazom obogaćenim cinkom u obzir se uzimaju C5.07 i C5.08, a C5.08 obuhvaća i vrlo visoku trajnost sustava, odabran je sustav C5.07 sa temeljnim premazom obogaćenim cinkom te u dodatnim premazima smiju biti prisutni epoksidna, poliuretanska i akrilna veziva. Ukupna debljina je 260 µm.

U tablici 8 je prikaz kriterija za odabir sustava premaza s metaliziranom površinom.

**Tablica 8. Sustavi premaza za metalizirane površine ISO 12944-5:2018**

| Broj sustava | Stupanj korozivnosti | Temeljni premaz |              |                        | Dodatni premazi | Sustav premaza |              | Trajnost premaza       |   |
|--------------|----------------------|-----------------|--------------|------------------------|-----------------|----------------|--------------|------------------------|---|
|              |                      | Tip veziva      | Broj slojeva | NDFT ( $\mu\text{m}$ ) |                 | Tip veziva     | Broj premaza | NDFT ( $\mu\text{m}$ ) | H |
| TSM 4.01     | C4                   | EP, PUR         | 1            | NA                     | EP, PUR         | 2              | 160          | X                      |   |
| TSM 4.02     |                      | EP, PUR         | 1            | NA                     | EP, PUR         | 2              | 200          | X                      | X |
| TSM 5.01     | C5                   | EP, PUR         | 1            | NA                     | EP, PUR         | 2              | 200          | X                      |   |
| TSM 5.02     |                      | EP, PUR         | 1            | NA                     | EP, PUR         | 2              | 240          | X                      | X |

Po ovoj tablici se za stupanj korozivnosti C5 i trajnost premaza H uzima sustav TSM 5.01 u kojem svi slojevi mogu imati epoksidno ili poliuretansko vezivo, ukupan broj premaza u sustavu je 3 te ukupna debljina je 200  $\mu\text{m}$ .

Prema normi ISO 12944-5:2018 za ispitivanje u ovom radu odabrani su premazi specificirani u tablicama 9, 10 i 11. U tablici se uz karakteristike sustava premaza nalazi i tražena debljina po sloju.

**Tablica 9. Parametri premaza na uzorcima P**

| Premaz   | Oznaka sustava premaza | Preporučena debljina filma [ $\mu\text{m}$ ] | Volumen suhe tvari [%] | Tražena debljina filma [ $\mu\text{m}$ ] |
|--|------------------------|--|------------------------|--|
| Temeljni premaz:<br>Hempadur<br>Avantguard 860<br>(Zn (R)) | P                      | 40 - 100                                     | $66 \pm 2\%$           | 50                                       |
| Međupremaz:<br>Hempaprime Multi<br>500 (epoksi)            | P                      | 100 - 250                                    | $85 \pm 2\%$           | 150                                      |
| Završni premaz:<br>Hempathane HS<br>55610 (PUR)            | P                      | 50 - 130                                     | $67 \pm 2\%$           | 60                                       |

Uzorci oznake P imaju temeljni sloj obogaćen cinkom te epoksi međusloj i završni sloj premaza je poliuretan.

**Tablica 10. Parametri premaza na uzorcima PX**

| Premaz  | Oznaka sustava premaza | Preporučena debljina filma [ $\mu\text{m}$ ] | Volumen suhe tvari [%] | Tražena debljina filma [ $\mu\text{m}$ ] |
|---|------------------------|--|------------------------|--|
| Temeljni premaz:<br>Hempadur<br>Avantguard 860<br>(Zn-rich)   | PX                     | 40 - 100                                     | $66 \pm 2\%$           | 50                                       |
| Međupremaz:<br>Hempaprime Multi<br>500 (epoksi)               | PX                     | 100 - 250                                    | $85 \pm 2\%$           | 150                                      |
| Završni premaz:<br>Hempaxane Light<br>55030<br>(Polisiloksan) | PX                     | 50 - 100                                     | $83 \pm 2\%$           | 60                                       |

Uzorci oznake PX imaju temeljni sloj obogaćen cinkom, međusloj je epoksi, a završni premaz je polisiloksan.

**Tablica 11. Parametri premaza na uzorcima M**

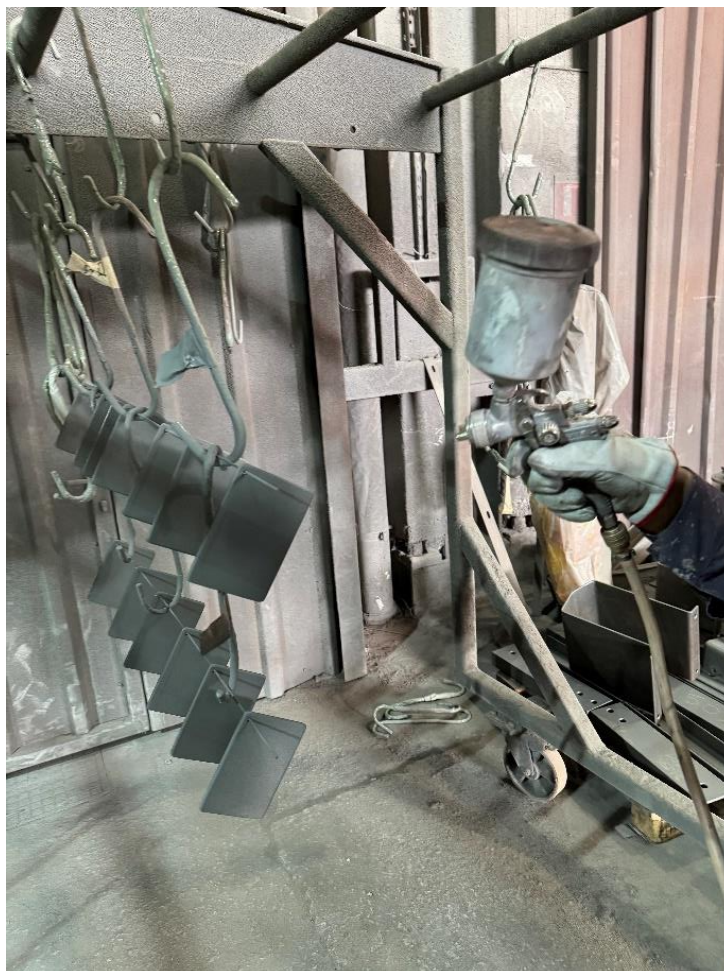
| Premaz   | Oznaka sustava premaza | Preporučena debljina filma ( $\mu\text{m}$ ) | Volumen suhe tvari [%] | Tražena debljina filma ( $\mu\text{m}$ ) |
|--|------------------------|--|------------------------|--|
| Metalizacija                                     | M                      | -  | -                      | 100                                      |
| Temeljni premaz:<br>Hempadur 15570<br>(epoksi)   | M                      | 50 - 125                                     | $54 \pm 2\%$           | 40                                       |
| Međupremaz:<br>Hempadur Mastic<br>4588W (epoksi) | M                      | 100 - 200                                    | $80 \pm 2\%$           | 140                                      |
| Završni premaz:<br>Hempathane HS<br>55610 (PUR)  | M                      | 50 - 130                                     | $67 \pm 2\%$           | 60                                       |

Uzorci oznake M imaju metaliziranu prevlaku cinka te su temeljni i međupremaz epoksi, dok je završni premaz poliuretan.

Uzorci sa temeljnim premazom obogaćenim cinkom imaju traženu minimalnu ukupnu debljinu 260  $\mu\text{m}$ , a maksimalnu 520  $\mu\text{m}$  dok metalizirani uzorci imaju traženu debljinu premaza 200, odnosno 300  $\mu\text{m}$  sa metalizacijom. Njihova maksimalna debljina sustava premaza je 600  $\mu\text{m}$ .

Uzorci M su prije nanošenja metalizirani korištenjem cink-aluminij žice. Temeljni premazi kod nemetaliziranih uzoraka su dobiveni miješanjem s utvrđivačem u omjeru 8,5:1,5, dok je temeljni premaz metaliziranog uzorka dobiven miješanjem u omjeru 3:1.

Na slici 19 prikazano je nanošenje temeljnog premaza obogaćenog cinkom na uzorke.



**Slika 19. Nanošenje temeljnog sloja premaza na uzorke P i PX**

Na slici 20 je prikazano nanošenje međupremaza na uzorke P i PX.



Slika 20. Nanošenje međupremaza na uzorke P i PX

Na slici 21 prikazani su gotovi uzorci spremni za ispitivanja.



Slika 21. Pripremljeni premazani uzorci

## 6.2. Ispitivanje debljine

U tablici ispod navedeni su svi uzorci te pomoću uređaja za mjerenje debljine sloja zaštite sa 10 mjerenja po uzorku dobivene su vrijednosti minimalne i maksimalne debljine premaza,



prosječna vrijednost debljine premaza te standardna devijacija. Na slici 22 se vidi postupak mjerenja debljine uređajem Elcometer 456.



Slika 22. Ispitivanje debljine premaza

U tablici 12 prikazane su izmjerene i izračunate vrijednosti vezane za debljine premaza.

Tablica 12. Izmjerene i izračunate vrijednosti vezane za debljine premaza

| Uzorak | Min ( $\mu\text{m}$ ) | Max ( $\mu\text{m}$ ) | $\bar{x}$ ( $\mu\text{m}$ ) | $\sigma$ ( $\mu\text{m}$ ) |
|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------|----------------------------|
| P1     | 128                   | 232                   | 190.9                       | 35.5                       |
| P2     | 186                   | 230                   | 204.2                       | 14.6                       |
| P3     | 200                   | 291                   | 231.5                       | 28.8                       |
| P4     | 200                   | 267                   | 228.5                       | 23.8                       |
| P5     | 230                   | 299                   | 266.7                       | 26.2                       |
| P6     | 195                   | 227                   | 217.5                       | 9.86                       |
| P7     | 207                   | 297                   | 257.1                       | 27.4                       |
| P8     | 160                   | 240                   | 209.3                       | 27.5                       |
| P9     | 220                   | 327                   | 261.3                       | 28.2                       |
| M1     | 322                   | 407                   | 361.7                       | 27.3                       |
| M2     | 323                   | 483                   | 386.2                       | 50.1                       |
| M3     | 363                   | 486                   | 414.6                       | 38.3                       |
| M4     | 328                   | 514                   | 412.21                      | 68.7                       |
| M5     | 251                   | 343                   | 343                         | 70.4                       |
| M6     | 283                   | 393                   | 335.3                       | 36.2                       |
| M7     | 242                   | 478                   | 355                         | 75.2                       |
| M8     | 412                   | 532                   | 475.2                       | 37.7                       |
| M9     | 222                   | 478                   | 335.1                       | 67.8                       |
| PX1    | 278                   | 420                   | 360.1                       | 47.6                       |

|     |     |     |       |      |
|-----|-----|-----|-------|------|
| PX2 | 316 | 410 | 382.6 | 28.1 |
| PX3 | 260 | 324 | 292.4 | 22.3 |
| PX4 | 313 | 404 | 355.9 | 28.2 |
| PX5 | 296 | 371 | 333.3 | 23.9 |
| PX6 | 309 | 374 | 340.8 | 22.1 |
| PX7 | 296 | 372 | 333.6 | 22.8 |
| PX8 | 365 | 458 | 409   | 33.6 |
| PX9 | 265 | 347 | 312.2 | 26.8 |

### 6.3. Ispitivanje tvrdoće

Tvrdoća se mjerila Shore D metodom pomoću uređaja PosiTector SHD. Uređaj je prikazan na slici 23.



Slika 23. Uređaj PosiTector SHD za mjerenje tvrdoće

Postupak mjerenja tvrdoće se odvija tako da se igla uređaja pritisne vertikalno na površinu uzorka te se iščita vrijednost tvrdoće. Mjerenja se ponavljaju tri puta po uzorku. Na slici 24 je prikazan proces mjerenja tvrdoće.



Slika 24. Mjerenje tvrdoće uzorka PX10

Tvrdoća je mjerena na 3 uzorka, dobiveni rezultati su prikazani u tablici 13.

Tablica 13. Izmjerene tvrdoće premaza

| Uzorak | Mjerenje 1 | Mjerenje 2 | Mjerenje 3 | Srednja vrijednost, [HS] |
|--------|------------|------------|------------|--------------------------|
| M10    | 86         | 83         | 84         | 84,33                    |
| P10    | 84         | 85         | 84         | 84,33                    |
| PX10   | 82         | 83         | 82         | 82,33                    |

Valja naglasiti kako izmjerene tvrdoće promatranih uzoraka imaju približno iste srednje vrijednosti tvrdoće.

#### 6.4. Ispitivanje prionjivosti

Ispitivanje vlačne čvrstoće svih premaza u radu napravljeno je "Pull-off" postupkom provedenog prema normi HRN EN ISO 4624. Ispitivanje je napravljeno sa uređajem Elcometer 506. Sonda koja se lijepi na samu podlogu treba biti čista i bez ikakvih oštećenja. Površina premaza se malo izbrusi sa finim brusnim papirom kako ne bi bilo velikih izbočenja koja bi sprječavala ravnomjerno lijepljenje sonde. Na površinu same sonde nanosi se tanak sloj ljepila

te se sonda zalijepi na premaz. Ljepilo se ostavlja dok se ne osuši. Nakon što se ljepilo osušilo, svrdlom se skine višak ljepila te dio premaza oko sonde. Zatim se uređaj prikvači za sondu preko potisnog klina. Zakretanjem ručice samog uređaja povećava se tlak koji pokušava odvojiti sondu od uzorka. Proces je gotov kada se sonda odvoji od površine. Nakon toga se očita vlačna čvrstoća. Na slici 25 prikazan je uređaj Elcometer 506 za ispitivanje prionjivosti premaza.



**Slika 25. Uređaj za ispitivanje prionjivosti premaza "Elcometer 506"**

#### **6.4.1. Ispitivanja u slanoj komori**

Zaštitni premazi su često izloženi morskim atmosferskim uvjetima. Kako bi se simulirali morski uvjeti provode se ispitivanja u slanoj komori. U njoj se razrijeđena otopina natrijevog klorida u obliku vodene maglice prska po uzorcima. Norma po kojoj je propisano ispitivanje u slanoj komori je HRN EN ISO 9227:2012. Tablica 14 prikazuje uvjete ispitivanja [2].

**Tablica 14. Parametri ispitivanja u slanoj komori prema normi HRN EN ISO 9227:2012**

| Parametri ispitivanja                                      | Norma HRN EN ISO<br>9227:2012 |
|--|-------------------------------|
| Trajanje ispitivanja [h]                                   | 1440 h                        |
| Temperatura ispitnog prostora [°C]                         | 35 ± 2                        |
| Obujam ispitnog prostora [l]                               | -                             |
| Temperatura ovlaživača komprimiranog zraka [°C]            | 45 - 50                       |
| Tlak komprimiranog zraka [bar]                             | 0,7 - 1,4                     |
| Otopina  | NaCl                          |
| Koncentracija NaCl otopine [%]                             | 5                             |
| Količina sakupljenoga kondenzata [ml/80cm <sup>2</sup> /h] | 1,5 ± 0,5                     |
| pH vrijednost kondenzata pri 25 ± 2 °C                     | 6,5 - 7,2                     |
| Elektroprovodljivost destilirane vode [μS/cm] pri 25 ± 2°C | Maksimalno 20                 |

Na slici 26 prikazana je slana komora Katedre za zaštitu materijala Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu u kojoj se odvijalo ispitivanje.

**Slika 26. Slana komora Katedre za zaštitu materijala FSB-a**

Slika 27 prikazuje uzorke nakon 720 h u slanoj komori.



Slika 27. Uzorci nakon 720 h u slanoj komori (s lijeva na desno: PX, M i P)

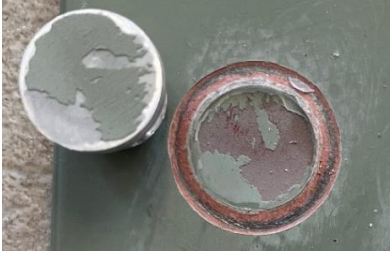


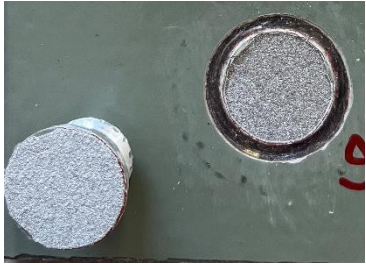
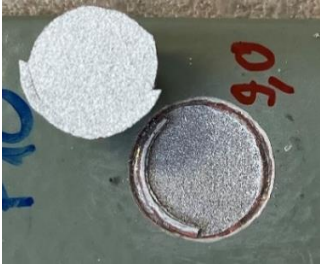


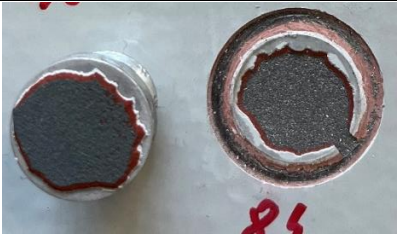

Slika 28 prikazuje uzorke nakon 1440 sati u slanoj komori.



Slika 28. Uzorci nakon 1440 sati u slanoj komori (s lijeva na desno M, PX, P)

Na uzorcima M10, P10 i PX10 je izvedeno Pull-off ispitivanje i rezultati su vidljivi u tablici 15.

**Tablica 15. Pull-off ispitivanje na uzorcima**

| Uzorak P10  |  |   |
|---|--|---|
|    |     |    |
| 11,6 MPa  | 10,8 MPa   | 12,5 MPa  |
| Uzorak M10  |  |   |
|   |    |   |
| 9,8 MPa   | 9,0 MPa  | 6,5 MPa   |
| Uzorak PX10   |  |   |
|  |  |  |
| 8,8 MPa   | 8,4 MPa  | 4,5 MPa   |

Prosječna dobivena vrijednost Pull-off testa prionjivosti je:

- P - 11,63 MPa
- M - 8,43 MPa
- PX - 7,23 MPa.

Na uzorcima M10 i P10 je došlo do potpunog odvajanja premaza od podloge, dok je kod uzorka P10 se odvojio završni i međusloj.



U tablici 16 nalaze se oznake uzoraka te vrijeme provedeno u slanoj komori.

**Tablica 16. Oznake uzoraka te trajanje ispitivanja u slanoj komori**


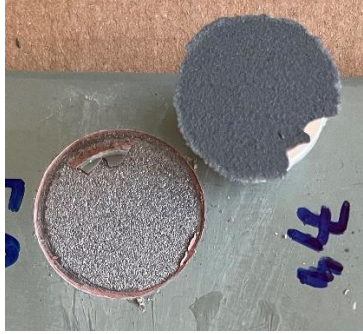





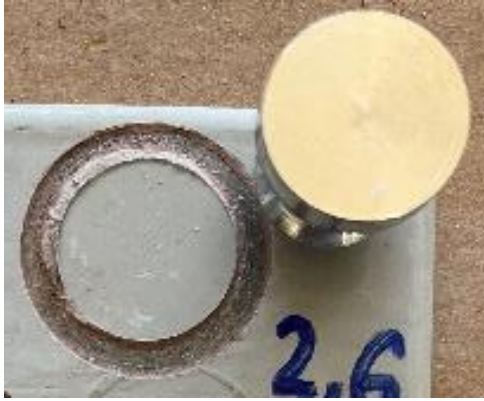
| Uzorak | Trajanje ispitivanja (h) |
|--------|--------------------------|
| P3     | 720                      |
| P4     | 720                      |
| P5     | 1440                     |
| M1     | 720                      |
| M2     | 720                      |
| M5     | 1440                     |
| PX1    | 720                      |
| PX5    | 720                      |
| PX4    | 1440                     |

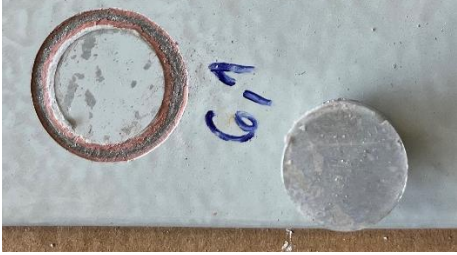

Tablica 17 prikazuje rezultate Pull off ispitivanja nakon 720 h u slanoj komori.

**Tablica 17. Pull-off ispitivanje nakon 720 h u slanoj komori**

| Nakon 720 h slane komore  |  |
|---|--|
| Uzorak P3   |  |
|  |  |
| 11,8 MPa  | 7,0 MPa  |
| Uzorak P4   |  |



|   |  |
|---|--|
|    |    |
| <p>8,8 MPa</p>  | <p>5,0 MPa</p>   |
| <p>Uzorak M1</p>  |  |
|    |    |
| <p>12,2 MPa</p>   | <p>3,2 MPa</p>   |
| <p>Uzorak M2</p>  |  |
|  |  |
| <p>13,5 MPa</p>   | <p>9,9 MPa</p>   |
| <p>Uzorak PX5</p>   |  |
|  |  |
| <p>3,8 MPa</p>  | <p>2,6 MPa</p>   |
| <p>Uzorak PX1</p>   |  |




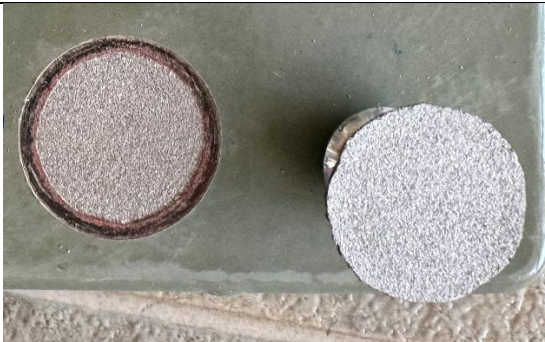
|   |  |
|---|--|
|  |  |
| 6,1 MPa   | 4,2 MPa  |



Nakon 720 sati u slanoj komori prosječna dobivena vrijednost Pull-off testa prionjivosti je:

- P - 8,15 MPa
- M - 9,7 MPa
- PX - 4,175 MPa

Tablica 18 prikazuje rezultate Pull off ispitivanja nakon 1440 h u slanoj komori.

**Tablica 18. Pull-off ispitivanje nakon 1440 h u slanoj komori**

|   |  |
|---|--|
| Nakon 1440 h slane komore   |  |
| Uzorak P5   |  |
|  |  |
| 5,8 MPa   | 6,1 MPa  |
| Uzorak M5   |  |
|  |  |
| 9,2 MPa   | 7,6 MPa  |

| Uzorak PX4  |  |
|---|--|
|  |  |
| 11,0 MPa  | 8,2 MPa  |

Prosječna dobivena vrijednost Pull-off testa prionjivosti je:

- P - 5,95 MPa
- M - 8,4 MPa
- PX - 9,6 MPa.

Prema normi HRN EN ISO 4624 izmjerena vrijednost Pull-off testa ne smije biti manja od 2,5 MPa. U dobivenim mjerenjima ni jedna vrijednost nije bila manja od 2,5 MPa što znači da su svi uzorci zadovoljili uvjete ispitivanja. Valja naglasiti da je kod PX5 jedna izmjerena vrijednost bila 2,6 MPa.

#### 6.4.2. Ispitivanja u vlažnoj komori

Kao i slana komora, u vlažnoj komori se također simuliraju stvarni uvjeti u eksploataciji. U vlažnoj se simulira ponašanje promatranog materijala u toploj i vlažnoj atmosferi uz kondenzaciju vode. U vlažnoj komori se na donjem tijelu nalazi tava u kojoj se nalazi voda. Njenim se zagrijavanjem temperira prostor u kojem se nalaze uzorci. Temperatura samog prostora je  $40 \pm 3^\circ\text{C}$ . Relativna vlažnost je oko 100% s orošavanjem samog uzorka. Ispitivanja se provode prema normi HRN EN ISO 6270-2:2007 [2].

Na slici 29 prikazana je vlažna komora Katedre za zaštitu materijala Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu u kojoj se provelo ispitivanje.



**Slika 29. Vlažna komora Katedre za zaštitu materijala FSB-a**

Na slici 30 su uzorci nakon 480 h unutar vlažne komore.



**Slika 30. Uzorci nakon 480 h vlažne komore**

Slika 31 prikazuje uzorke nakon 960 sati u vlažnoj komori.



Slika 31. Uzorci nakon 960 sati u vlažnoj komori

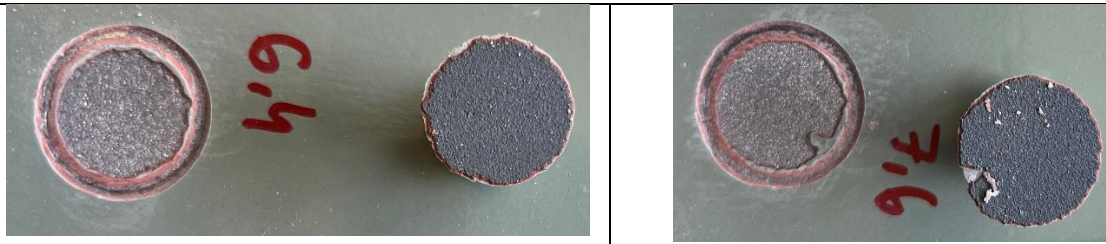
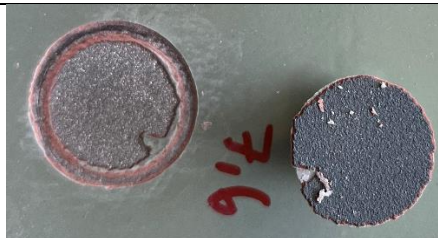
U tablici 19 se nalaze oznake uzoraka te trajanje ispitivanja u vlažnoj komori.









Tablica 19. Oznake uzoraka te trajanje ispitivanja u vlažnoj komori



| Uzorak | Vrijeme ispitivanja (h) |
|--------|-------------------------|
| P6     | 480                     |
| P7     | 480                     |
| P9     | 960                     |
| M6     | 480                     |
| M9     | 480                     |
| M7     | 960                     |
| PX6    | 480                     |
| PX7    | 480                     |
| PX9    | 960                     |

Tablica 20 prikazuje rezultate Pull off ispitivanja nakon 480 h u vlažnoj komori.

Tablica 20. Pull-off ispitivanje nakon 480 h u vlažnoj komori

| Nakon 480 h vlažne komore   |  |
|---|--|
| Uzorak P6   |  |
|  |  |
| 6,4 MPa   | 7,6 MPa  |
| Uzorak P7   |  |

|   |  |
|---|--|
|    |    |
| 7,6 MPa   | 8,2 MPa  |
| Uzorak M6   |  |
|    |    |
| 9,1 MPa   | 9,4 MPa  |
| Uzorak M9   |  |
|   |   |
| 7,4 MPa   | 6,4 MPa  |
| Uzorak PX6  |  |
|  |  |
| 7,5 MPa   | 7,6 MPa  |
| Uzorak PX7  |  |





|   |  |
|---|--|
|  |  |
| 9,4 MPa   | 5,8 MPa  |

Nakon 480 sati u slanoj komori prosječna dobivena vrijednost Pull-off testa prionjivosti je:

- P - 7,45 MPa
- M - 8.075 MPa
- PX - 7,575 MPa.

Tablica 21 prikazuje rezultate Pull off ispitivanja nakon 960 h u vlažnoj komori.

**Tablica 21. Pull-off ispitivanje nakon 960 h u vlažnoj komori**

| Nakon 960 h vlažne komore   |  |
|---|--|
| Uzorak P9   |  |
|  |  |
| 5,8 MPa   | 3,4 MPa  |
| Uzorak M7   |  |
|  |  |
| 7,2 MPa   | 8,8 MPa  |
| Uzorak PX9  |  |

|   |  |
|---|--|
|  |  |
| 11,0 MPa  | 8,0 MPa  |

Prosječna dobivena vrijednost Pull-off testa prionjivosti je:

- P - 4,6 MPa
- M - 8,0 MPa
- PX - 9,0 MPa.

### 6.5. Ispitivanje korozije oko zareza

Kod uzoraka koji su bili namijenjeni za slanu komoru sa nožem je napravljen zarez širine 2 mm te duljine 50 mm. Svrha toga postupka je ocijeniti stupanj širenja korozije ispod premaza nakon slane komore. Na slici 32 prikazan je zarez na uzorku PX1.



Slika 32. Urezan zarez kod uzorka PX1

Nakon što je uzorak PX1 bio u slanoj komori 720 h vidljivo je prisustvo korozije na urezu. Na slici 33 se vidi korozija na zarezu.





**Slika 33. Zarez kod uzorka PX1 nakon 720 h u slanoj komori**

Sa svrdlom je pod malim utjecajem ručne sile uklonjen dio premaza kako bi se moglo napraviti ispitivanje. Na slici 34 vidljiv je zarez kod uzorka PX1 nakon što je uklonjen premaz oko samog zareza.



**Slika 34. Zarez kod uzorka PX1 nakon što je uklonjen premaz oko samog zareza**

Stupanj korozije se ocjenjuje prema normi HRN EN ISO 4628-8. Na urezu se svakih 5 mm mjeri širina korozije. Sveukupno je 9 mjerenja po uzorku te se računa njihova aritmetička vrijednost. Stupanj korozije se računa prema formuli:

$$C = \frac{w_c - w}{2}$$

- c - stupanj korozije [mm]
- $w_c$  - širina korozije [mm]
- w - širina zareza, u ovom slučaju 2 [mm].

U tablici 22 prikazani su stupnjevi korozije pojedinih uzoraka.

**Tablica 22. Dobiveni stupnjevi korozije po uzorcima**

| Uzorak | M1 | P3   | PX5   | P4     | M2 | PX1   | PX4   | M5 | P5    |
|--------|----|------|-------|--------|----|-------|-------|----|-------|
| C [mm] | 0  | 0,05 | 0,094 | 0,0544 | 0  | 0,244 | 1,306 | 0  | 0,122 |

Po normi HRN EN ISO 12944-6 stupanj širenja korozije ispod ne smije biti viši od 1,5 mm. U tablici 14 vidi se da ni jedan uzorak nije imao stupanj korozije viši od 1,5 mm. Svi uzorci zadovoljavaju prema normi za ispitivanje stupnja korozije. Uzorak PX4 ima viši stupanj korozije nego drugi uzorci. Bitno je naglasiti da je taj uzorak proveo 1440 h u slanoj komori. Metalizirani uzorci nisu pokazivali nikakve znakove korozije.

Bitno je naglasiti kako niti jedan uzorak prema normi ISO 4628 nije pokazao znakove hrđanja, pucanja, mjehuranja ljuštenja što znači da su svi sustavi premaza izrazito otporni na koroziju i postojani.

Na slici 35 su prikazani svi uzorci podvrgnuti slanoj i vlažnoj komori.



Slika 35. Svi uzorci podvrgnuti slanoj i vlažnoj komori

## 6.6. Elektrokemijska korozivna ispitivanja

### 6.6.1. Određivanje potencijala otvorenog strujnog kruga (OCP)

Prilikom ispitivanja u kojima se koristi istosmjerna struja koriste se polarizacijske metode. To su galvanostatska i potenciostatska polarizacija. Kod potenciostatske polarizacije se na mjernoj elektrodi uspostavi određeni potencijal te se mjeri struja odziva sustava. Uređaj koji se koristi se zove potenciostat. Kod galvanostatske polarizacije se na mjernoj elektrodi uspostavi određena struja te se mjeri napon odziva sustava. Uređaj koji se koristi se zove galvanostat. Glavna karakteristika ovih mjerenja je da se na sustav djeluje signalom izvana i prati se odziv sustava. Rezultat ovih mjerenja je krivulja polarizacije struja - napon. Na temelju te krivulje mogu se odrediti ponašanja određenog materijala u određenom mediju.

Elektrokemijska korozivna ispitivanja se izvode u elektrokemijskoj ćeliji koja se sastoji od 3 elektrode, a to su radna, referentna i pomoćna. Radna elektroda je ispitni uzorak, odnosno metal, referentna je  $\text{Hg}/\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ ,  $\text{Ag}/\text{AgCl}$ ,  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$  i druge te je pomoćna najčešće grafit.

Kako bi započelo polarizacijsko mjerenje, sustav mora biti stabilan. Nakon uranjanja u elektrolit električni se krug između radne elektrode i protuelektrode pušta otvorenim. Razlika potencijala radne i referentne elektrode se prikazuje kao graf potencijala u ovisnosti o vremenu.

Nakon nekog vremena uspostavilo se približno stacionarno stanje oko neke vrijednosti potencijala. Taj potencijal jednak je potencijalu otvorenoga strujnog kruga ili korozijskom potencijalu. Dobivene vrijednosti mjerenja daju sljedeće podatke [2]:

- negativne vrijednosti korozijskog potencijala pokazuju nestabilnost, odnosno koroziju
- pozitivne vrijednosti pokazuju stabilnost elektrode
- ako vrijednosti prelaze iz pozitivnog u negativno, znači da je došlo do spontane pasivizacije.

Ispitivanje se izvršilo na uređaju VersaSTAT. Za analizu dobivenih podataka korišten je program VersaStudio. Na slici 31 vidljiva je elektrokemijska ćelija kod koje je radna elektroda uzorak, odnosno pločica od ugljičnog čelika sa antikorozivnim premazom, referentna elektroda je zasićena kalomelna elektroda (ZKE) te grafit kao protuelektroda. Na slici 36 prikazana je pripremljena elektrokemijska ćelija za ispitivanja strujom.



**Slika 36. Elektrokemijska ćelija**

Korišten je po jedan uzorak od sve tri skupine uzoraka premaza. Uzorci su bili izloženi 3,5%-tnoj otopini NaCl. Ispitivanja su se odvijala u više vremenskih perioda: odmah te nakon 7, 14, 21, 28, 42, 49 te 60 dana. Ispitivanja su se odvijala pri sobnoj temperaturi prema parametrima

u tablici 17. Svi parametri su uneseni u program VersaStudio prije pokretanja uređaja. Tablica 23 prikazuje parametre OCP ispitivanja.

**Tablica 23. Tablica parametara za ispitivanje otvorenog strujnog kruga**

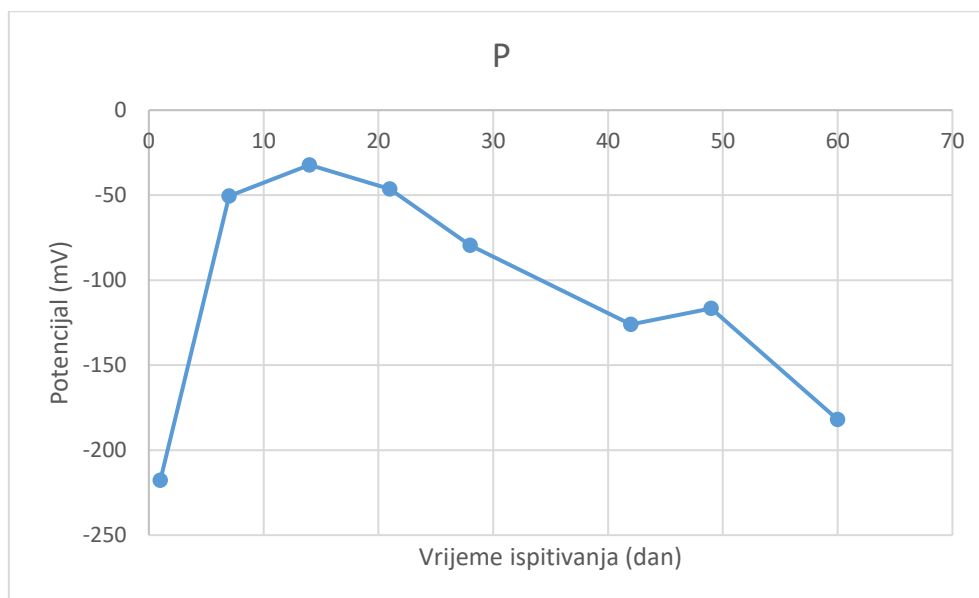
|                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| Medij                             | 3,5% NaCl                               |
| Trajanje                          | 1000 s                                  |
| Referentna elektroda              | Zasićena kalomel elektroda, 0,242 V SCE |
| Radna površina [cm <sup>2</sup> ] | 19,625                                  |
| Gustoća materijala [g/ml]         | 7,86                                    |
| Ekvivalentna masa [g]             | 27,92                                   |

Mjerenje potencijala otvorenog strujnog kruga je napravljeno za analizu sklonosti koroziji u otopini 3,5% NaCl. Nakon 60 dana ispitivanja dobivene su iduće vrijednosti električnih potencijala [V] i njegova promjena kroz vrijeme u tablici 24.

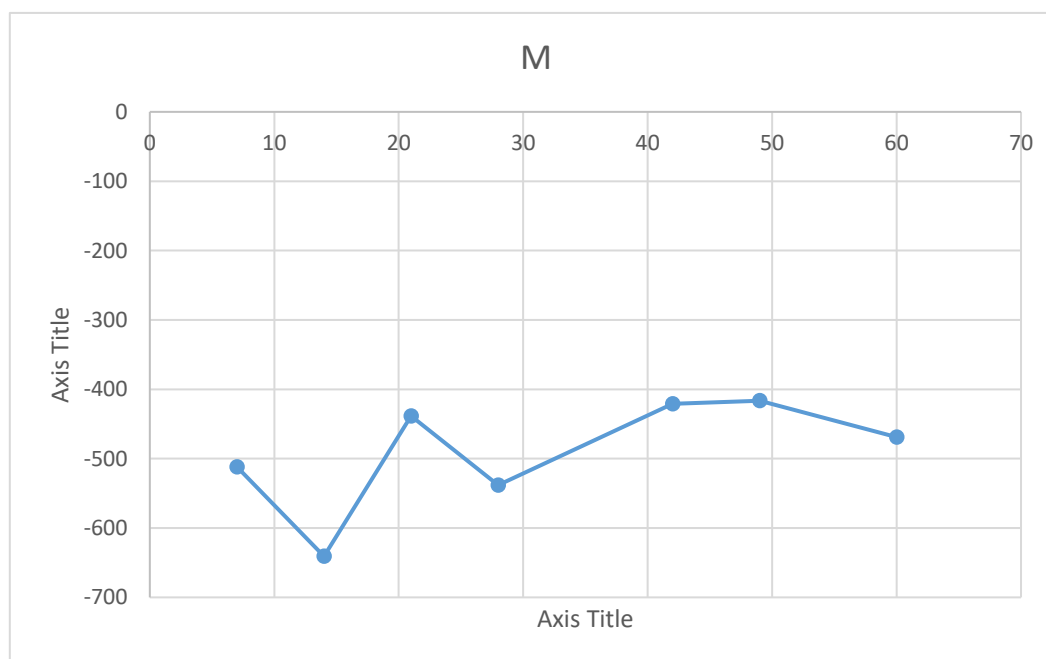
**Tablica 24. Mjerenje električnog potencijala na uzorcima kroz vrijeme**

| Trajanje ispitivanja<br>(dan) | Vrijednosti potencijala po uzorcima (mV) |          |          |
|-------------------------------|--|----------|----------|
|                               | P3                                       | M1       | PX8      |
| 1                             | -217,761                                 |          | -406,079 |
| 7                             | -50,607                                  | -511,893 | 100,599  |
| 14                            | -32,204                                  | -640,71  | 231,256  |
| 21                            | -46,313                                  | -438,59  | -72,996  |
| 28                            | -79,437                                  | -537,963 | -191,691 |
| 42                            | -126,056                                 | -421,108 | -192,305 |
| 49                            | -116,548                                 | -416,507 | -148,446 |
| 60                            | -181,877                                 | -468,954 | -232,483 |

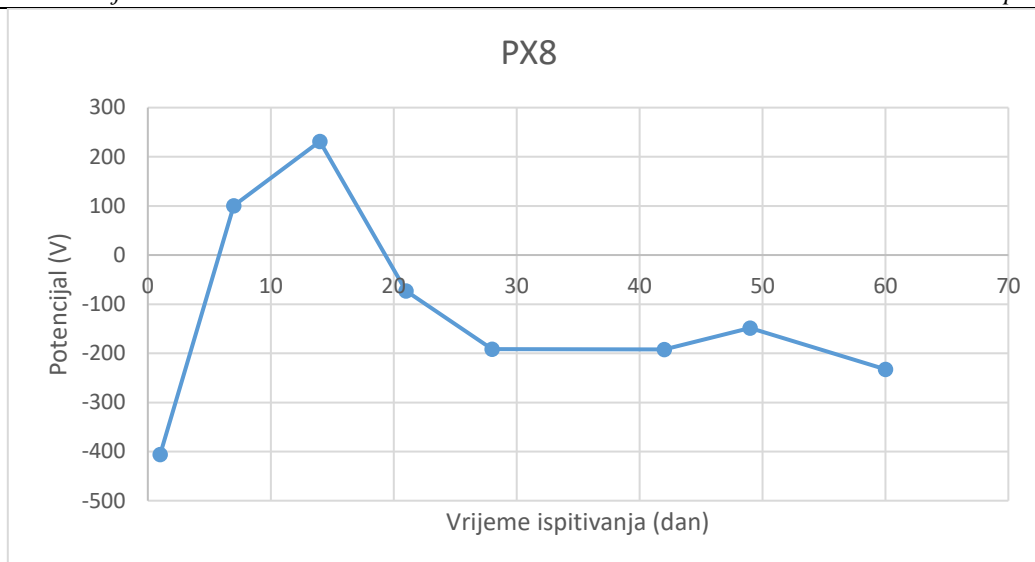
Slike 37, 38 i 39 prikazuju vrijednosti dobivene u tablici 24.



Slika 37. Graf ovisnosti potencijala o vremenu ispitivanja za uzorak P3



Slika 38. Graf ovisnosti potencijala o vremenu ispitivanja za uzorak M1



**Slika 39. Graf ovisnosti potencijala o vremenu ispitivanja za uzorak PX8**

Vrijednosti dobivene mjerenjem potencijala otvorenog kruga upućuju na dobra zaštitna svojstva premaza. Kod uzoraka sa temeljnim premazom obogaćenim cinkom se vidi slično ponašanje, porast potencijala na početku ukazuje na pasivirajuće djelovanje pigmenta u premazima. Nakon toga kod uzorka PX dolazi do pada te stabilizacije. Uzorak P ima težnju pada potencijala kod duljeg izlaganja. Kod uzorka P nije došlo do negativiziranja potencijala u odnosu na početno izmjereni potencijal. Uzorak M ima blage oscilacije, no kroz vrijeme se stabilizira oko određene vrijednosti potencijala.

### 6.6.2. *Elektrokemijska impedancijska spektroskopija*

Uz istosmjernu struju, moguće je koristiti i izmjeničnu struju za određivanje polarizacijskog otpora elektrokemijskim mjerenjima. Metoda se naziva elektrokemijska impedancijska spektroskopija (EIS). Za razliku od elektrokemijskih polarizacijskih metoda koje se baziraju na istosmjernoj struji, u elektrokemijskim metodama s izmjeničnom strujom ne dolazi do narušavanja sustava. EIS je metoda gdje se na elektrodu dovede izmjenično promjenjiv električni potencijal sa malom amplitudom i velikim rasponom frekvencija. Kao odziv se prati amplituda i fazni pomak. Korozijski procesi su nelinearni, a izmjenična struja je razvijena za linearne sustave, amplituda sinusoidalnog signala  $\Delta E$  treba biti iznimno mala kako bi odziv sustava bio linearan. Podaci dobiveni elektrokemijskom impedancijskom spektroskopijom se prikazuju Nyquistovim i Bodeovim dijagramima [2].

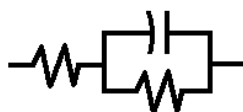
U tablici 25 nalaze se parametri ispitivanja elektrokemijskom impedancijskom spektroskopijom.

Tablica 25. Parametri EIS ispitivanja

|                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| Frekvencija (Start)               | 100000 Hz                               |
| Frekvencija (End)                 | 0,1 Hz                                  |
| Amplituda                         | 200 mV RMS                              |
| Medij                             | 3,5% NaCl                               |
| Referentna elektroda              | Zasićena kalomel elektroda, 0,242 V SCE |
| Radna površina [cm <sup>2</sup> ] | 19,625                                  |
| Gustoća materijala [g/ml]         | 7,86                                    |
| Ekvivalentna masa [g]             | 27,92                                   |

Da bi podaci bili reprezentativni, potrebno je odabrati odgovarajući ekvivalentni električni krug.

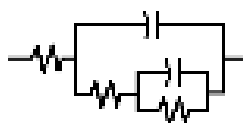
Odabran ekvivalentni strujni krug nakon prvih 7 dana izlaganja elektrolitu je Randlesov ekvivalentni električni krug. Randlesov strujni krug je primjenjiv za jednostavnu električnu ćeliju u kojoj nije došlo do korozije, odnosno za periode u kojima premazi još uvijek prikazuju izvrsna zaštitna svojstva. Randlesov krug prikazan je na slici 40.



Slika 40. Randlesov električni krug

Komponente Randlesovog ekvivalentnog električnog kruga su otpor elektrolita, kapacitet dvosloja te otpor polarizacijski otpor [2].

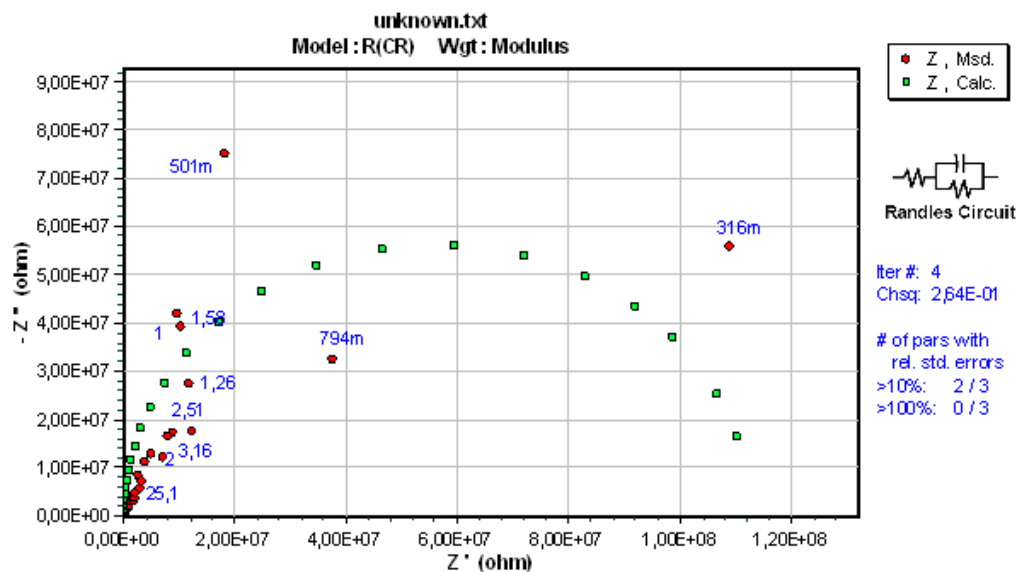
Za ostale vremenske periode ispitivanja izabran je električni krug za porozni premaz. Glavni kriterij odabira ekvivalentnog električnog kruga je prionjivost premaza, a nakon nekog vremena dolazi do prodiranja vode u premaz te se stvara novi dvosloj ispod premaza na granici metala i premaza. Upravo zbog toga se koristi električni krug za porozni premaz. Uz komponente koje se nalaze u Randlesovom krugu u krugu za porozni premaz još imamo komponente otpora pora te kapacitet sloja. Shema ekvivalentnog električnog kruga za porozne premaze nalazi se na slici 41.



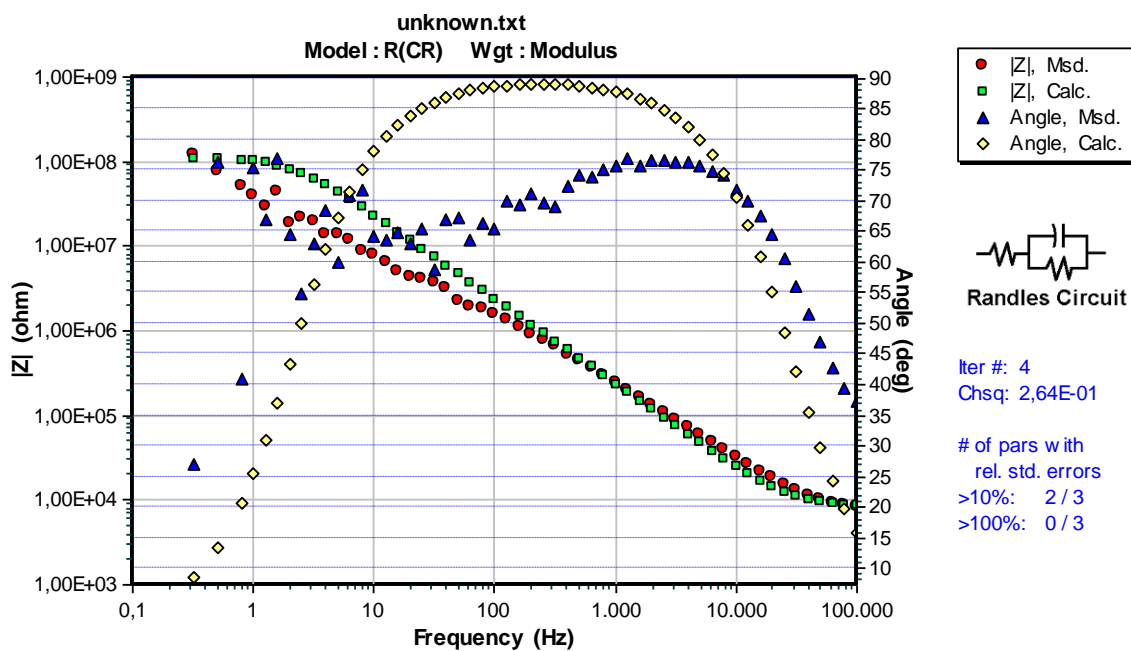
Slika 41. Ekvivalentni električni krug za porozni premaz



Na slikama 42 i 43 prikazani su Nyquist, odnosno Bodeov dijagram za uzorak P3 za vrijeme izloženosti elektrolitu od 168 h.

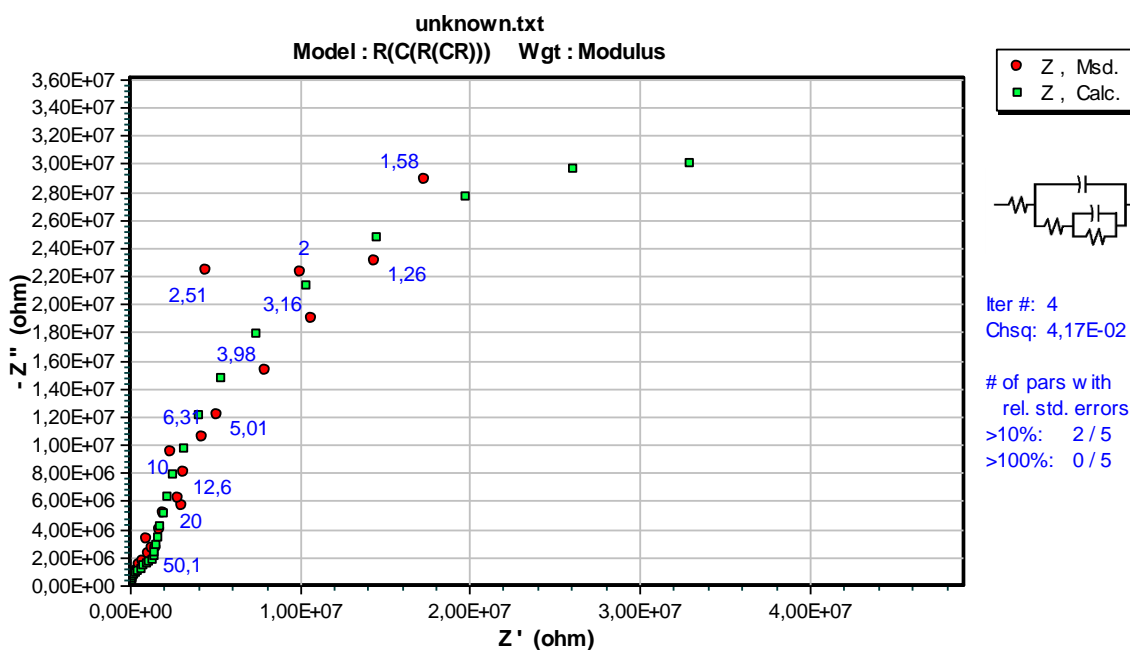


Slika 42. Nyquist dijagram za uzorak P3 nakon 168 sati izloženosti elektrolitu

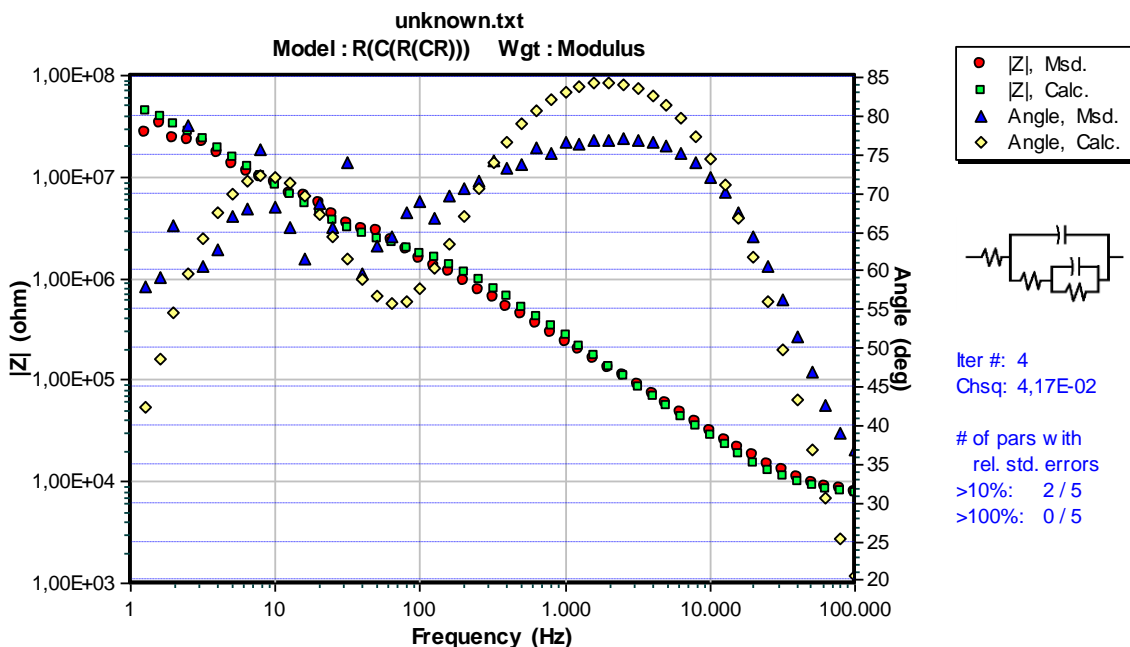


Slika 43. Bodeov dijagram za uzorak P3 nakon 168 sati izloženosti elektrolitu

Na slikama 44 i 45 prikazani su Nyquist, odnosno Bodeov dijagram za uzorak P3 za vrijeme izloženosti elektrolitu od 336 h.

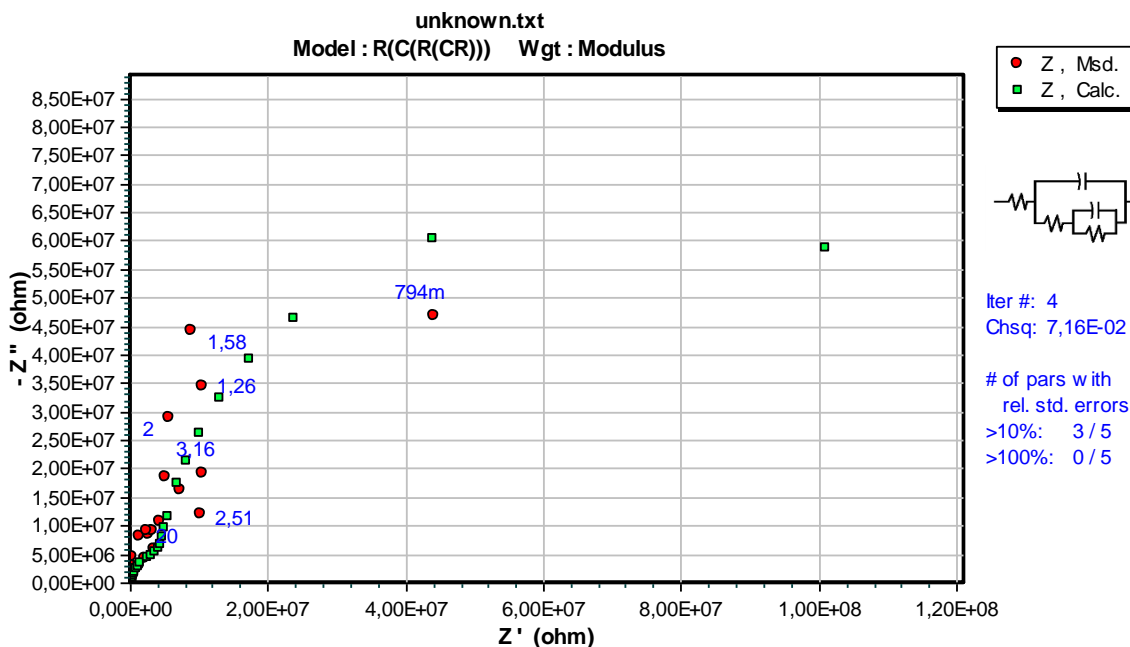


Slika 44. Nyquist dijagram za uzorak P3 nakon 336 sati izloženosti elektrolitu

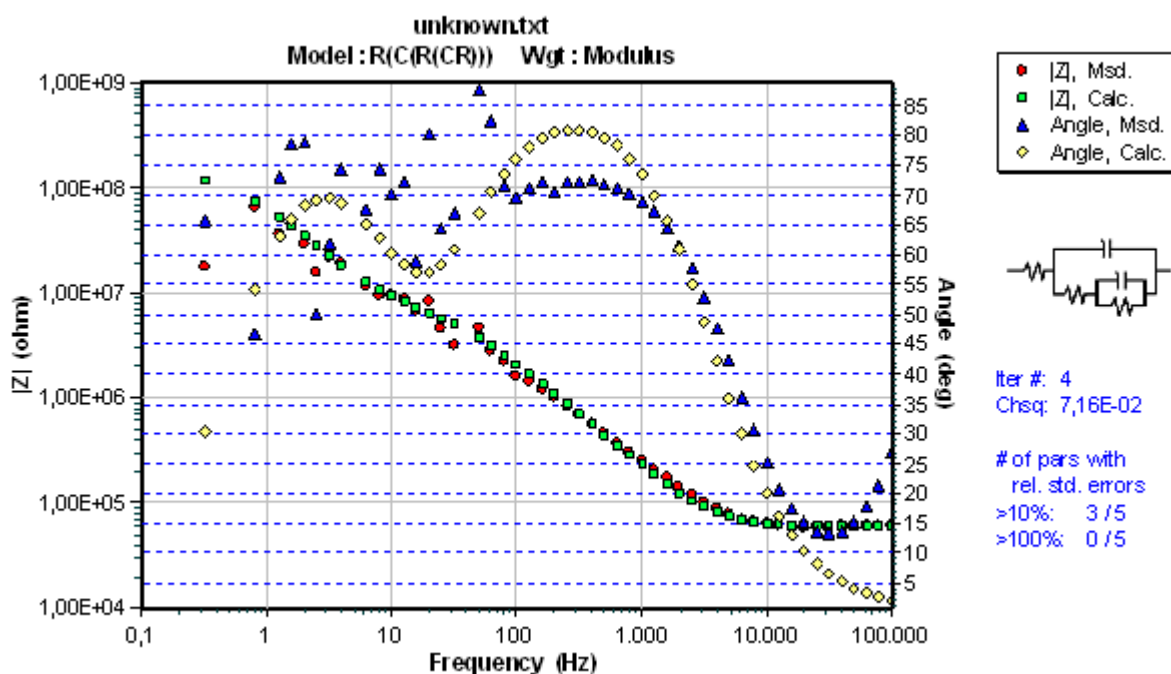


Slika 45. Bodeov dijagram za uzorak P3 nakon 336 sati izloženosti elektrolitu

Na slikama 46 i 47 prikazani su Nyquist, odnosno Bodeov dijagram za uzorak P3 za vrijeme izloženosti elektrolitu od 672 h.

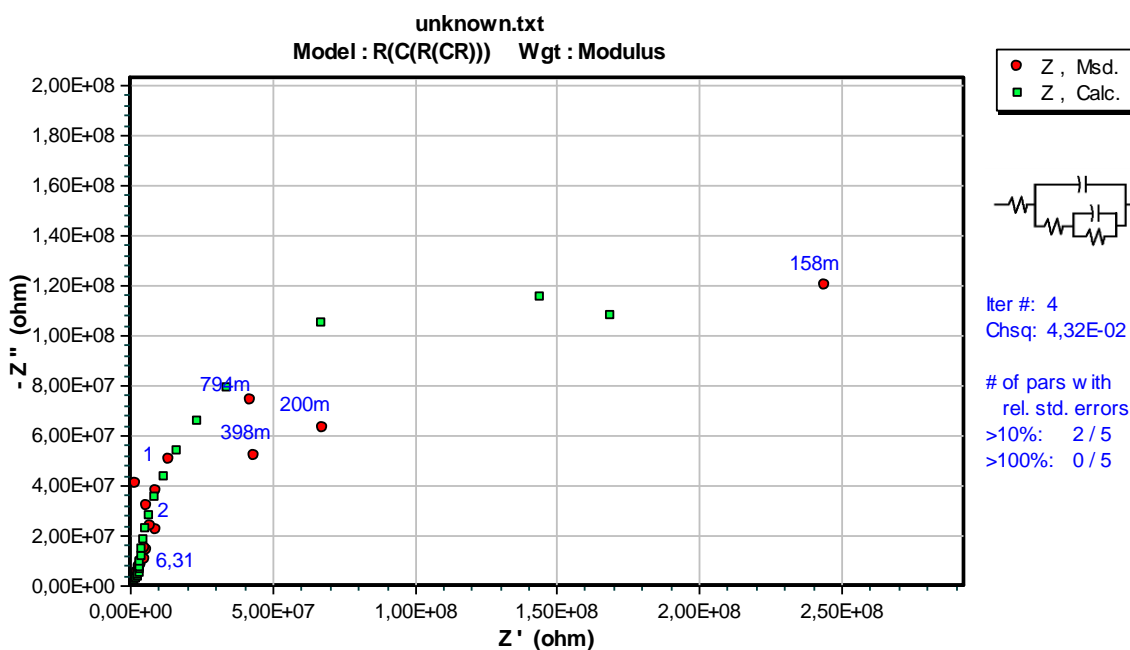


Slika 46. Nyquist dijagram za uzorak P3 nakon 672 sata izloženosti elektrolitu

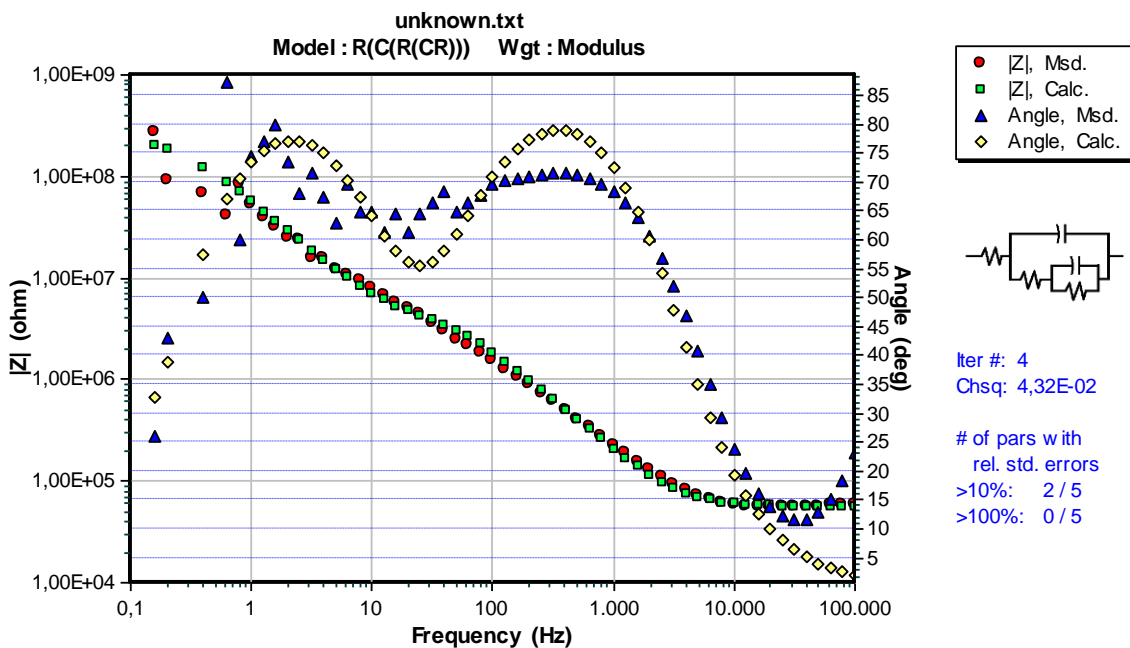


Slika 47. Bodeov dijagram za uzorak P3 nakon 672 sata izloženosti elektrolitu

Na slikama 48 i 49 prikazani su Nyquist, odnosno Bodeov dijagram za uzorak P3 za vrijeme izloženosti elektrolitu od 1440 h.

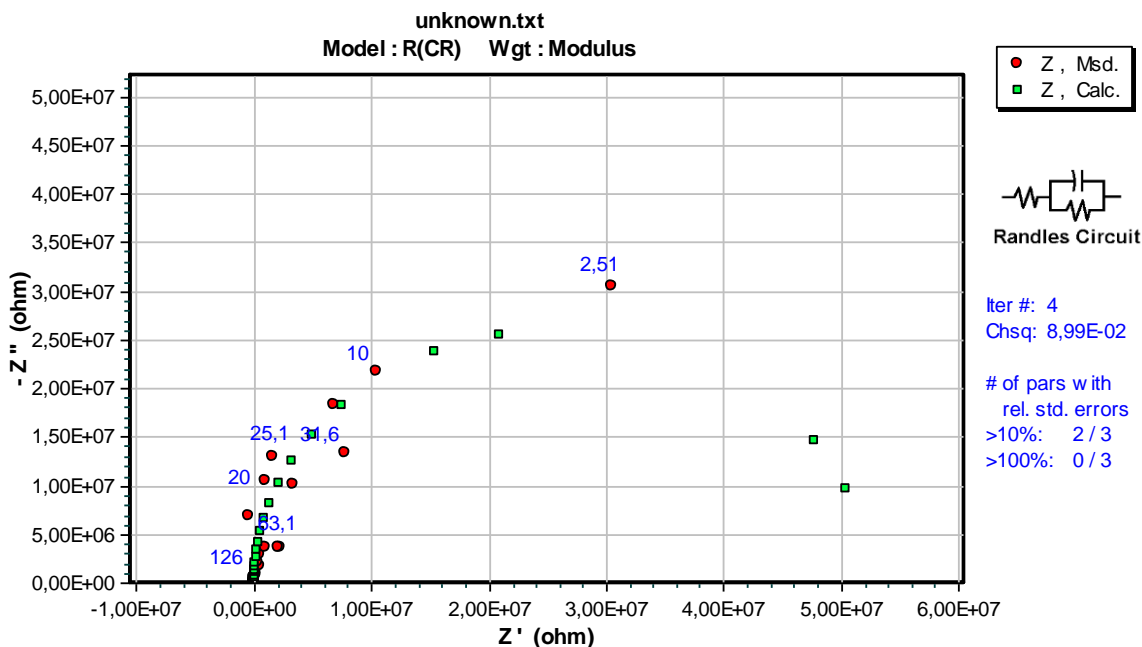


Slika 48. Nyquist dijagram za uzorak P3 nakon 1440 sati izloženosti elektrolitu

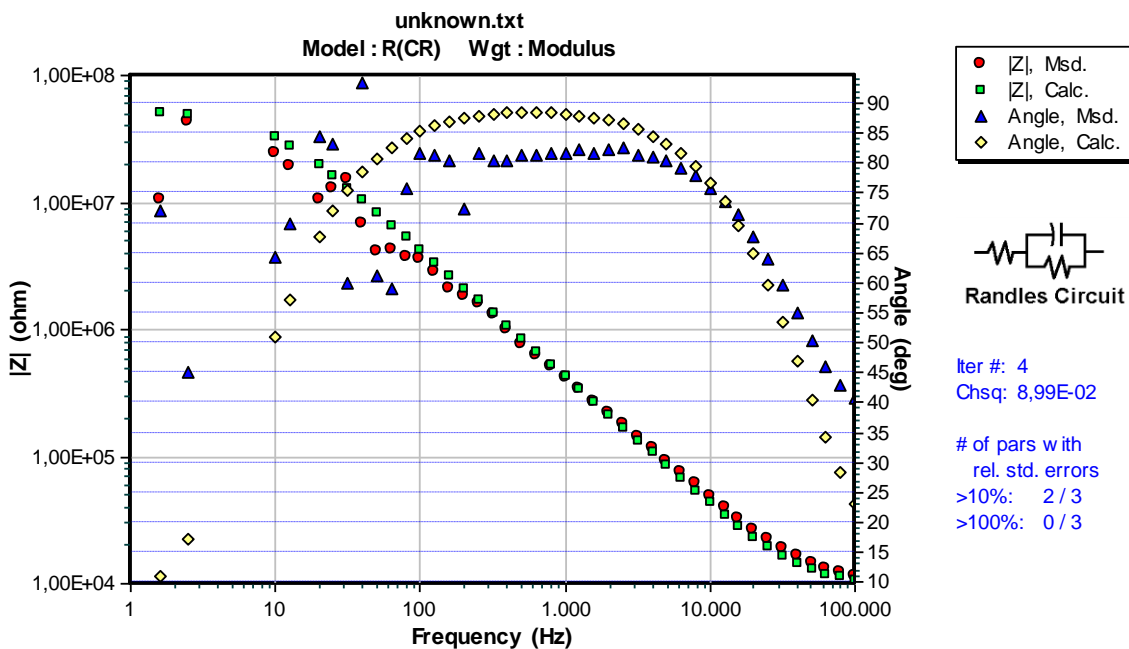


Slika 49. Bodeov dijagram za uzorak P3 nakon 1440 sati izloženosti elektrolitu

Na slikama 50 i 51 prikazani su Nyquist, odnosno Bodeov dijagram za uzorak M1 za vrijeme izloženosti elektrolitu od 168 h.

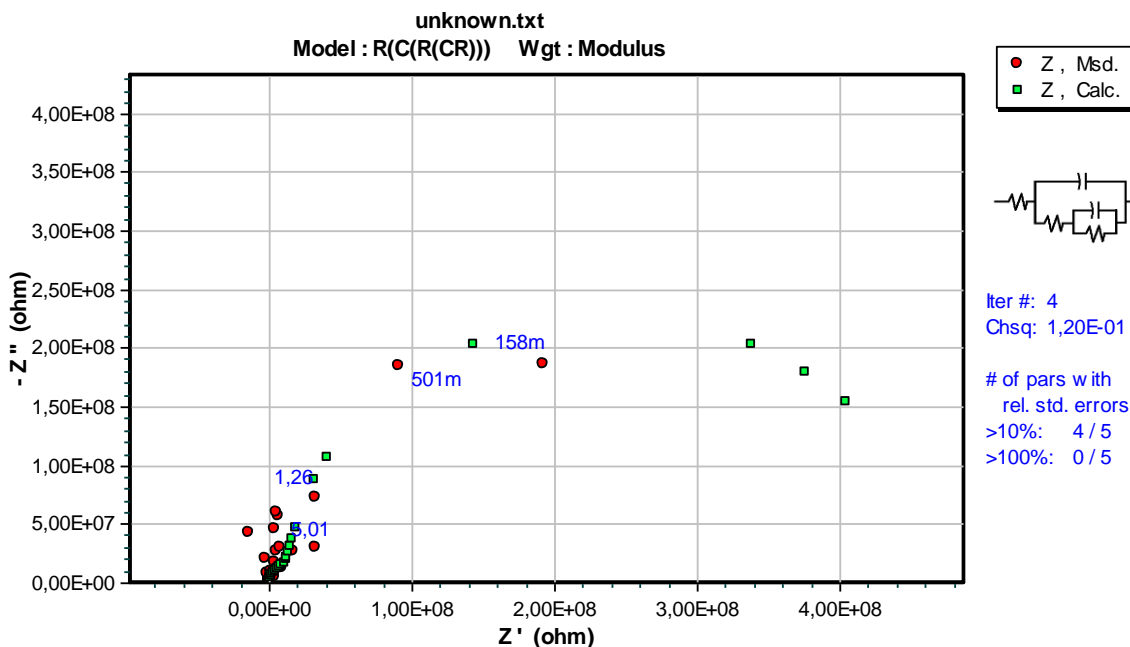


Slika 50. Nyquist dijagram za uzorak M1 nakon 168 sati izloženosti elektrolitu

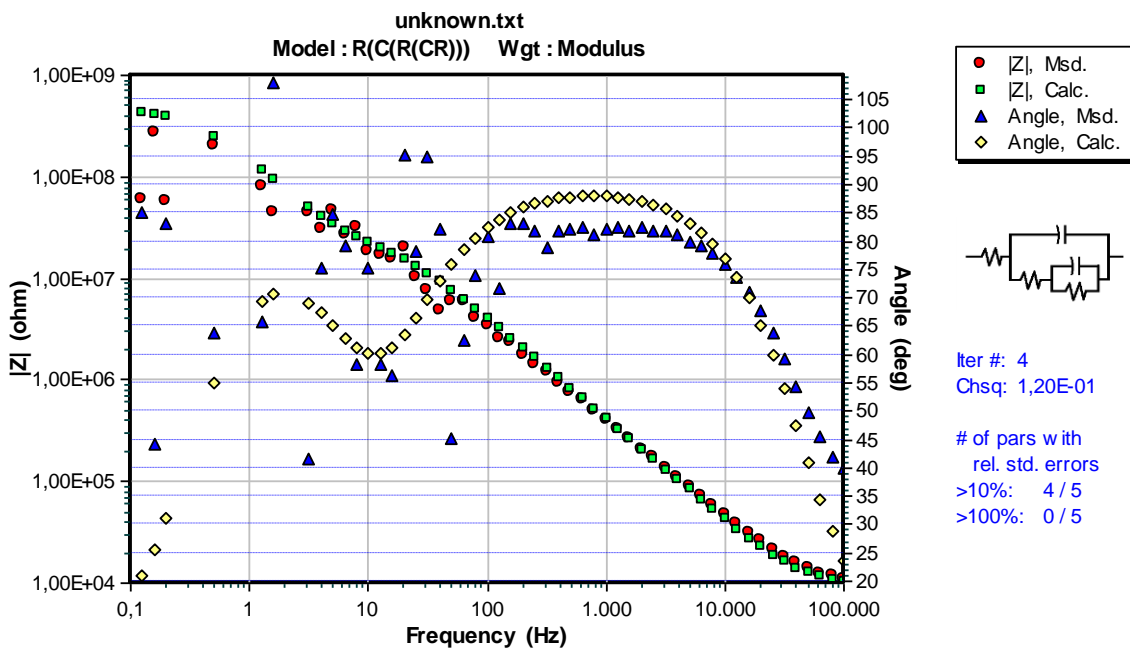


Slika 51. Bodeov dijagram za uzorak M1 nakon 168 sati izloženosti elektrolitu

Na slikama 52 i 53 prikazani su Nyquist, odnosno Bodeov dijagram za uzorak P3 za vrijeme izloženosti elektrolitu od 336 h.

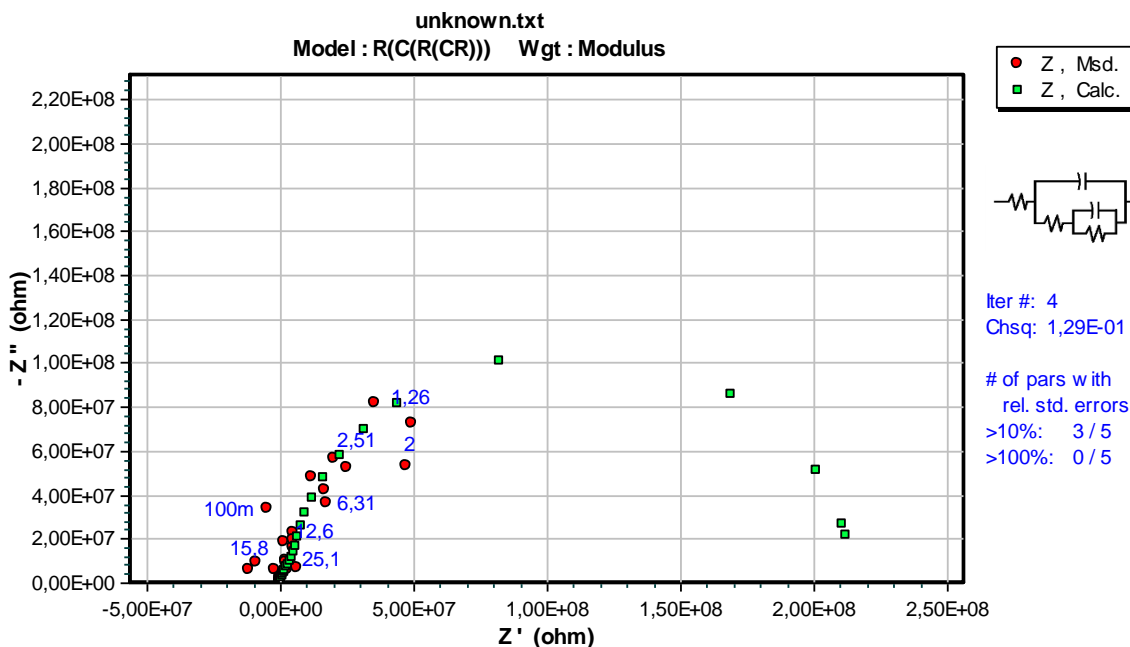


Slika 52. Nyquist dijagram za uzorak M1 nakon 336 sati izloženosti elektrolitu

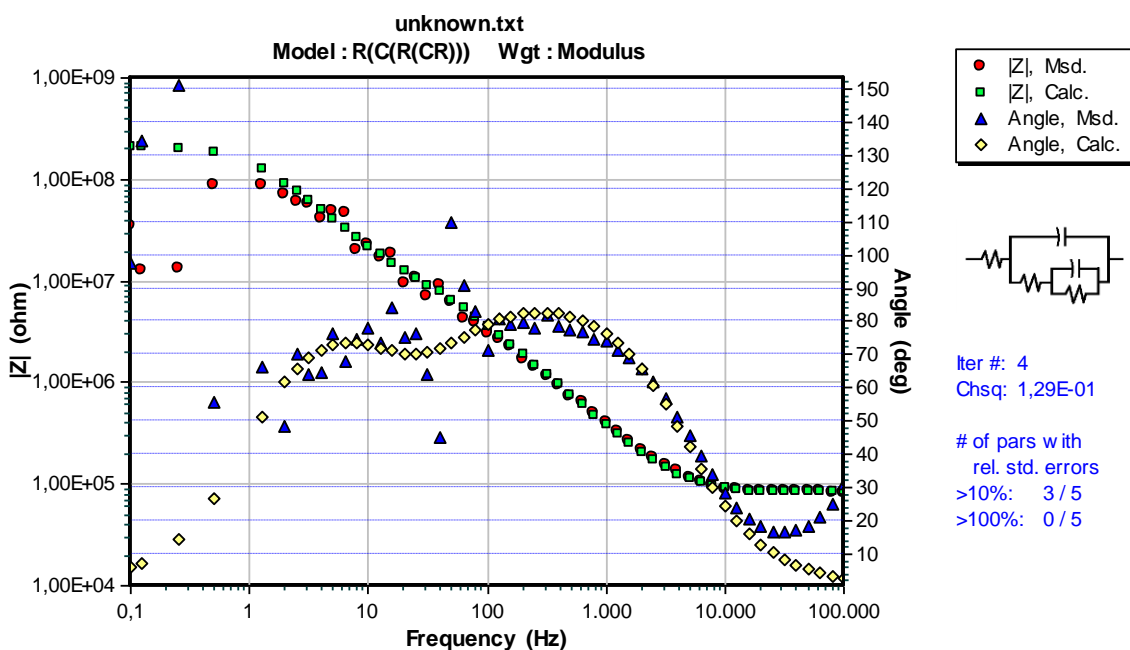


Slika 53. Bodeov dijagram za uzorak M1 nakon 336 sati izloženosti elektrolitu

Na slikama 54 i 55 prikazani su Nyquist, odnosno Bodeov dijagram za uzorak P3 za vrijeme izloženosti elektrolitu od 672 h.

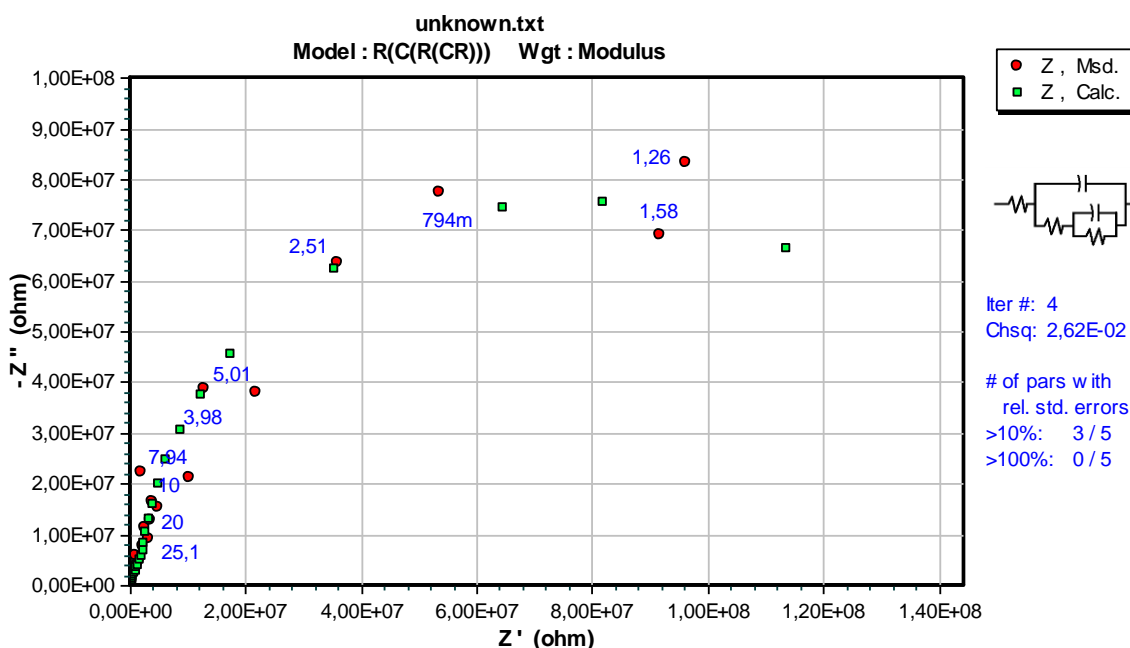


Slika 54. Nyquist dijagram za uzorak M1 nakon 672 sata izloženosti elektrolitu

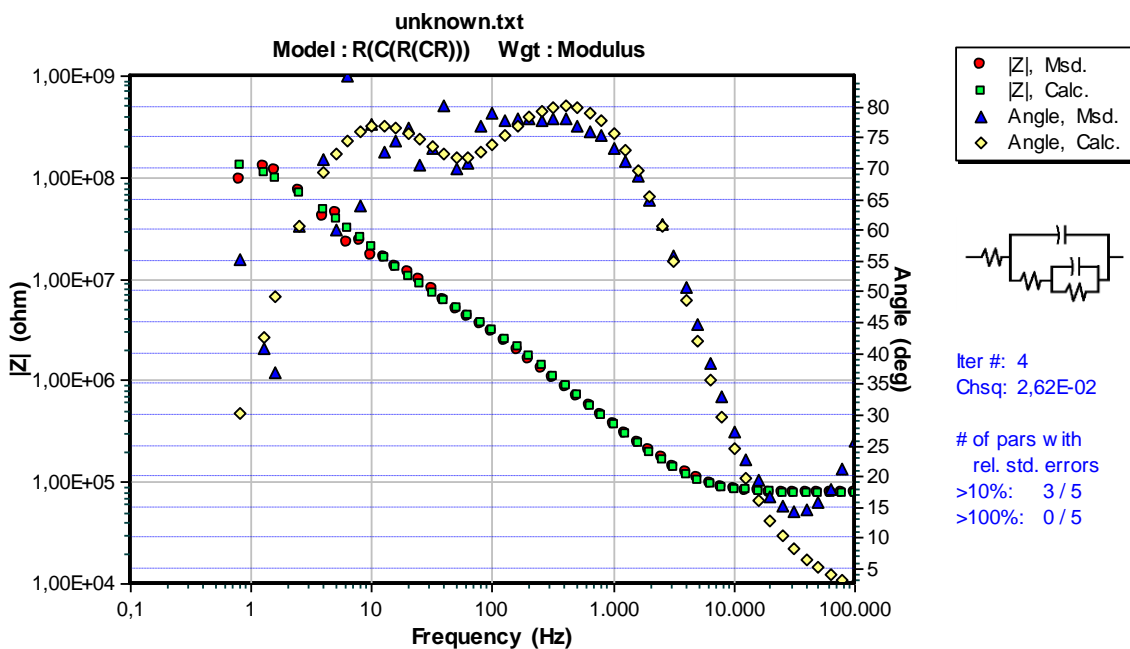


Slika 55. Bodeov dijagram za uzorak M1 nakon 672 sata izloženosti elektrolitu

Na slikama 56 i 57 prikazani su Nyquist, odnosno Bodeov dijagram za uzorak P3 za vrijeme izloženosti elektrolitu od 1440 h.



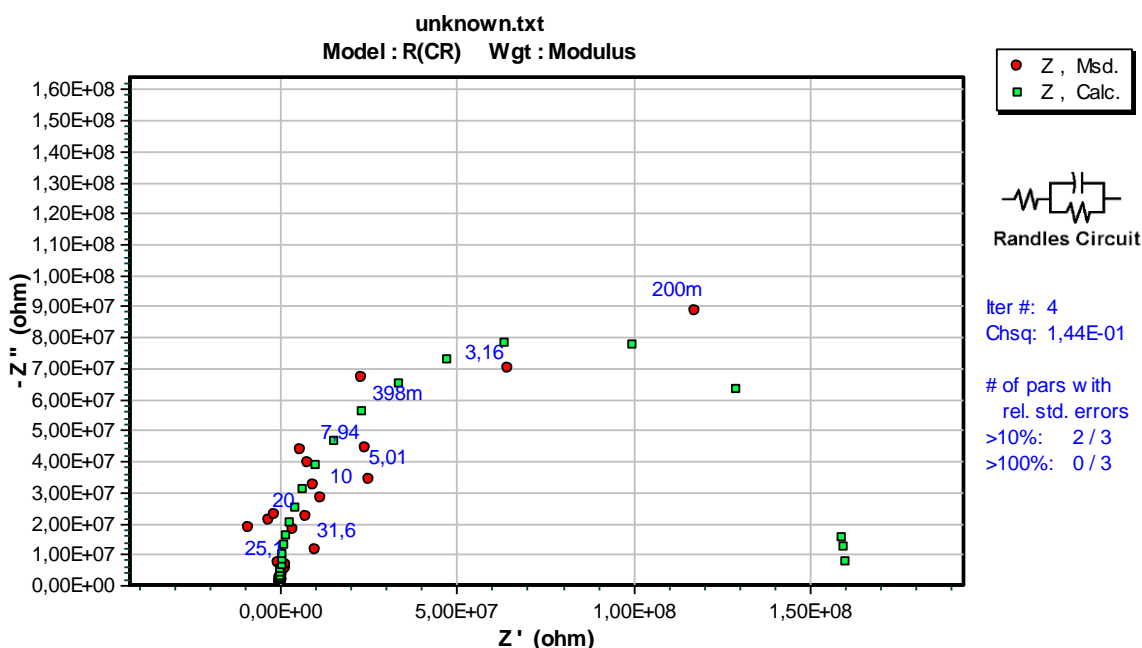
Slika 56. Nyquist dijagram za uzorak M1 nakon 1440 sati izloženosti elektrolitu



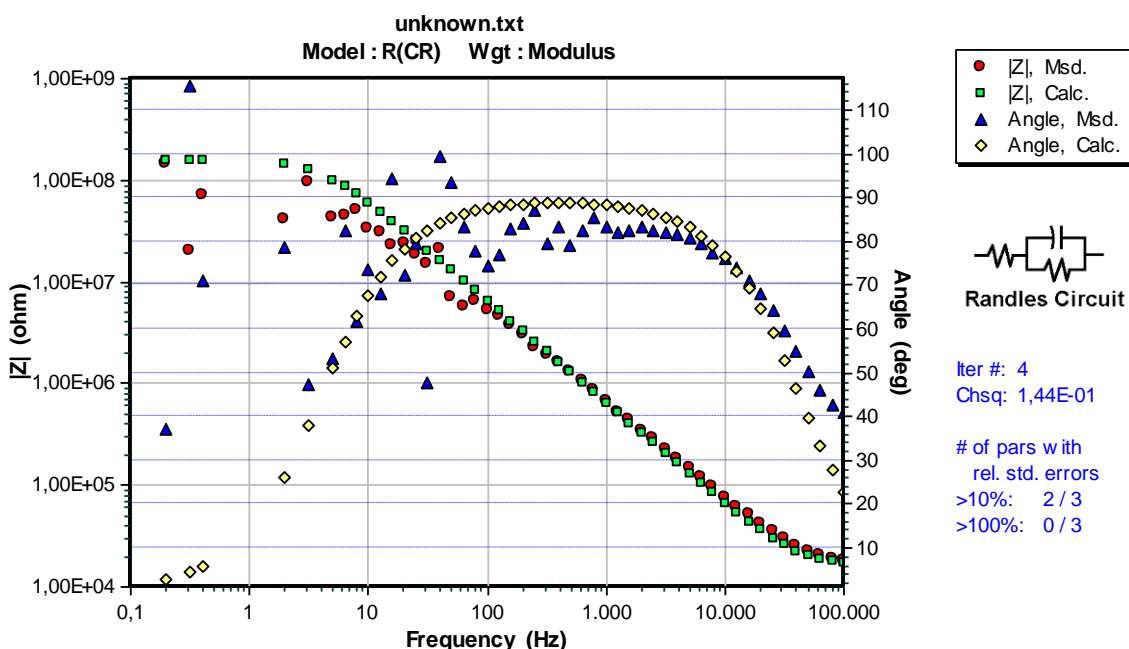
Slika 57. Bodeov dijagram za uzorak M1 nakon 1440 sati izloženosti elektrolitu



Na slikama 58 i 59 prikazani su Nyquist, odnosno Bodeov dijagram za uzorak PX8 za vrijeme izloženosti elektrolitu od 168 h.

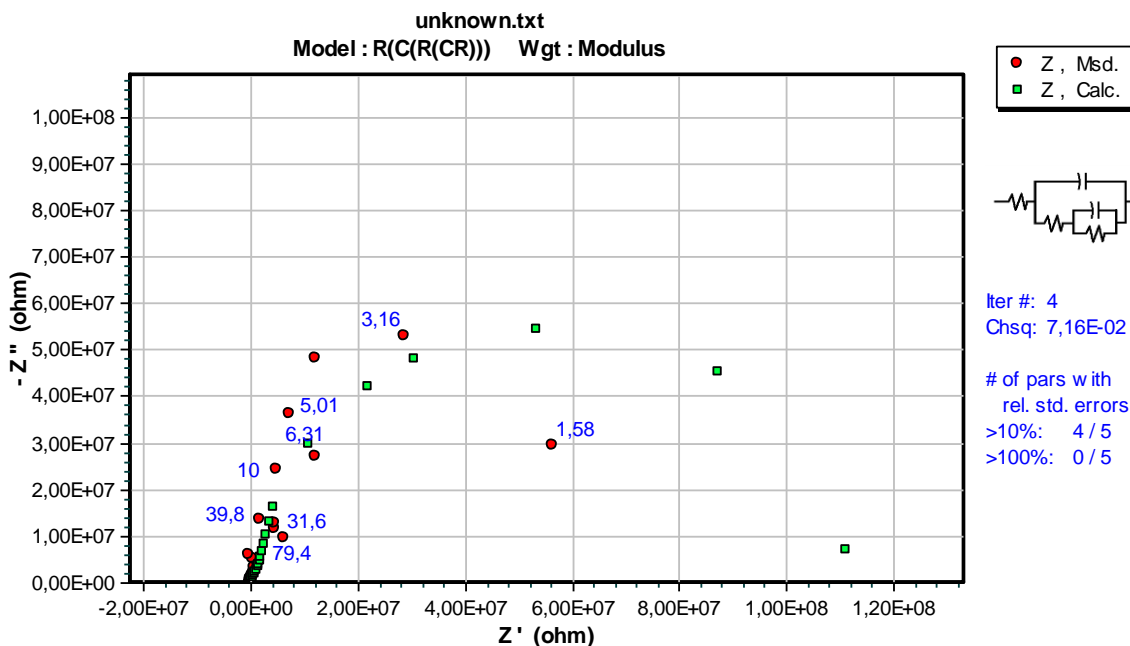


Slika 58. Nyquist dijagram za uzorak PX8 nakon 168 sati izloženosti elektrolitu

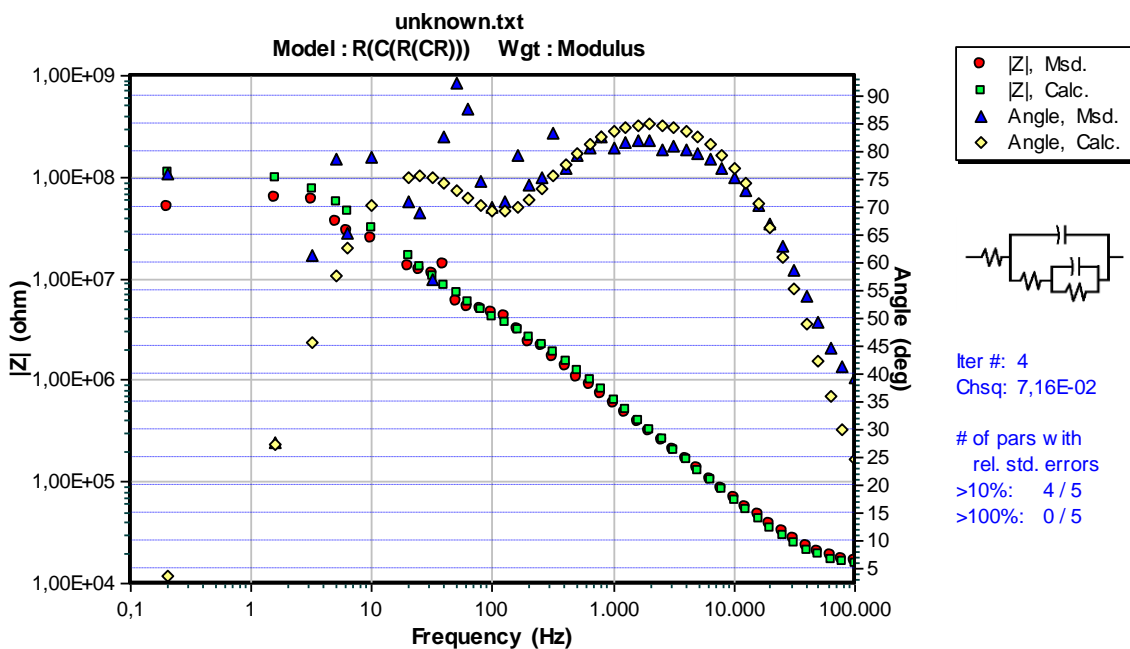


Slika 59. Bodeov dijagram za uzorak PX8 nakon 168 sati izloženosti elektrolitu

Na slikama 60 i 61 prikazani su Nyquist, odnosno Bodeov dijagram za uzorak PX8 za vrijeme izloženosti elektrolitu od 336 h.

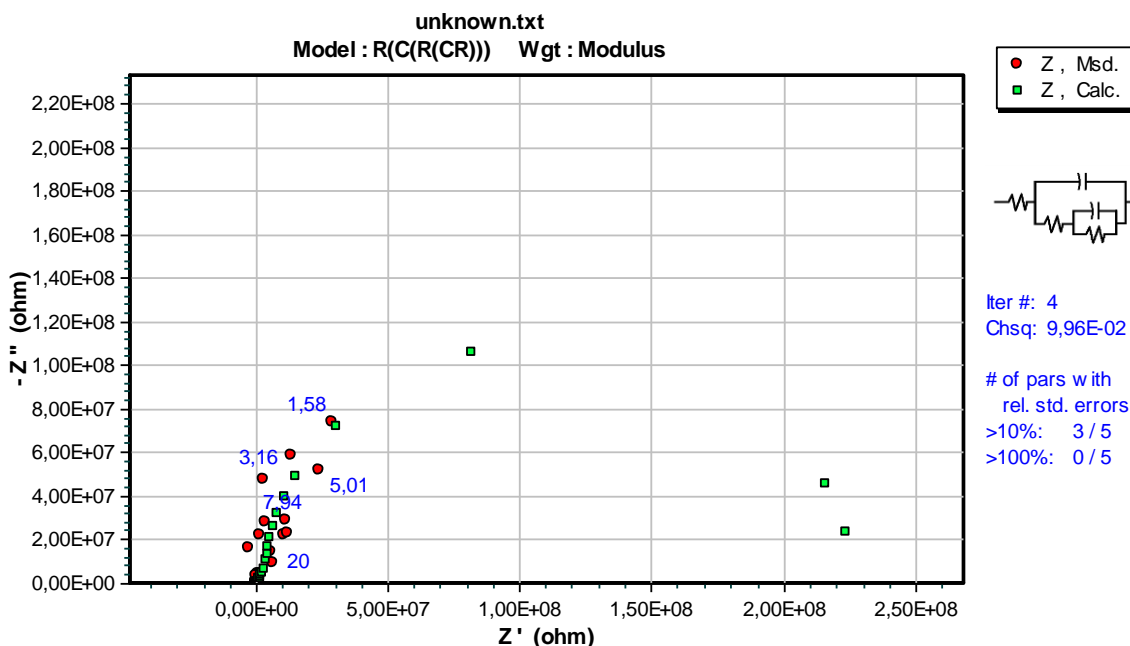


Slika 60. Nyquist dijagram za uzorak PX8 nakon 336 sati izloženosti elektrolitu

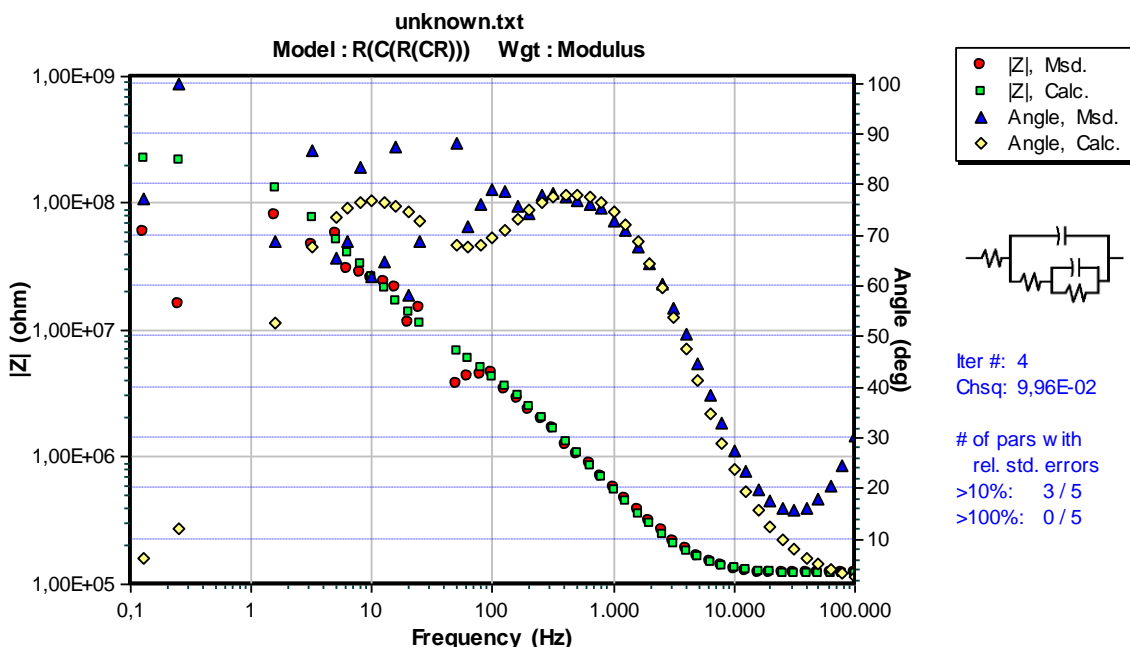


Slika 61. Bodeov dijagram za uzorak PX8 nakon 336 sati izloženosti elektrolitu

Na slikama 62 i 63 prikazani su Nyquist, odnosno Bodeov dijagram za uzorak PX8 za vrijeme izloženosti elektrolitu od 672 h.

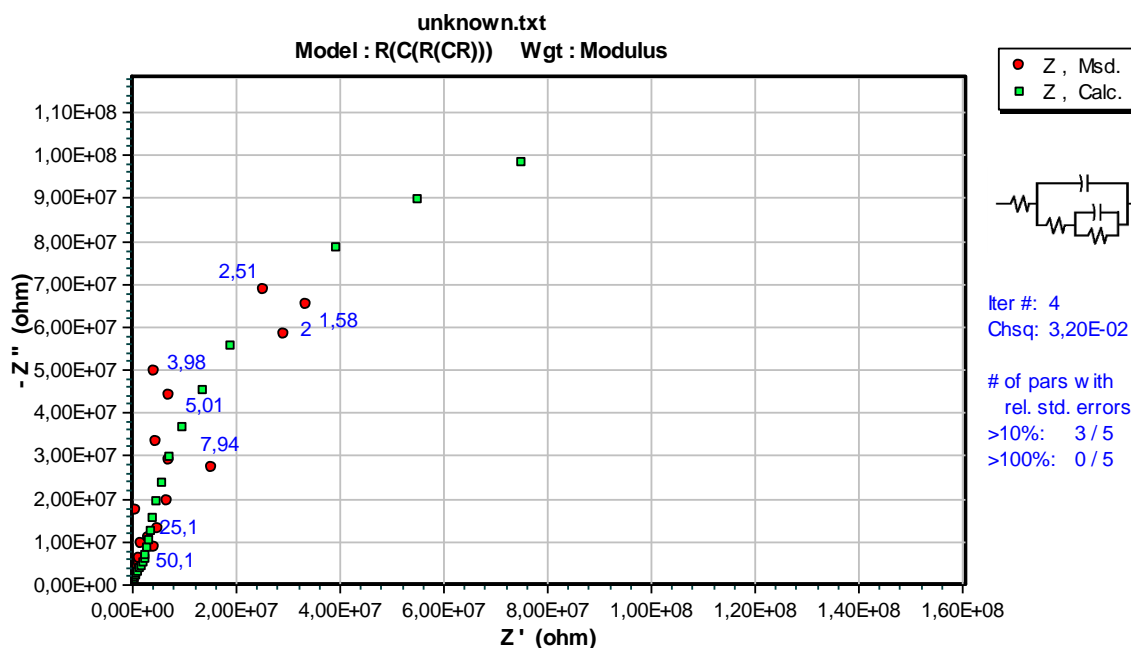


Slika 62. Nyquist dijagram za uzorak PX8 nakon 672 sata izloženosti elektrolitu

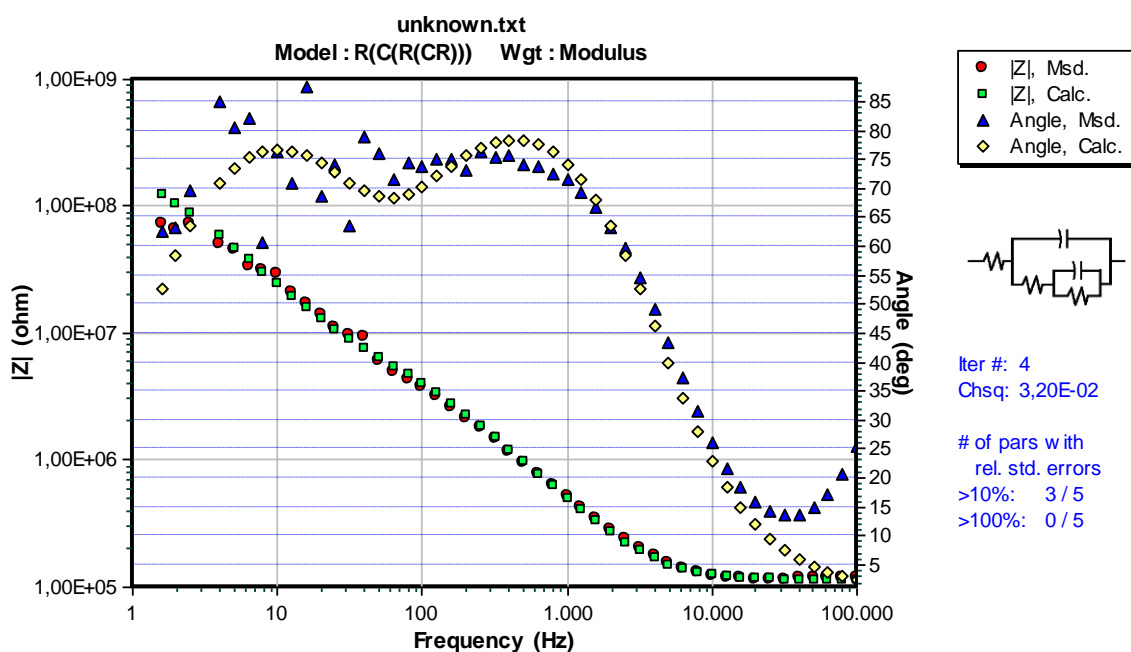


Slika 63. Bodeov dijagram za uzorak PX8 nakon 672 sata izloženosti elektrolitu

Na slikama 64 i 65 prikazani su Nyquist, odnosno Bodeov dijagram za uzorak PX8 za vrijeme izloženosti elektrolitu od 1440 h.



Slika 64. Nyquist dijagram za uzorak PX8 nakon 1440 sati izloženosti elektrolitu



Slika 65. Bodeov dijagram za uzorak PX8 nakon 1440 sati izloženosti elektrolitu

Šumovi, odnosno rasipanja mjernih točaka u grafovima mogu se pripisati veoma dobrim izolacijskim svojstvima premaza.

U tablici 26 su prikazani rezultati dobiveni elektrokemijskom impedancijskom spektroskopijom.

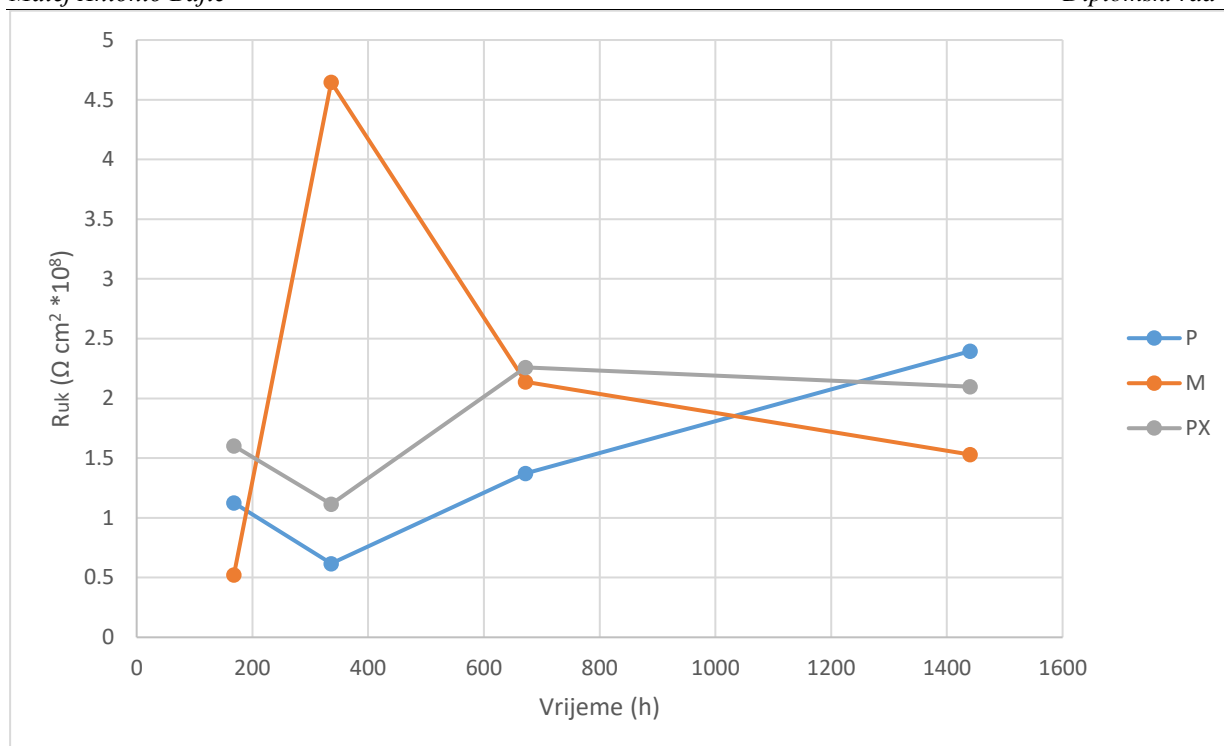
**Tablica 26. Rezultati dobiveni elektrokemijskom impedancijskom spektroskopijom kroz više vremenskih intervala**

|    | t (h)    | $R_s$ ( $\Omega\text{cm}^2$ ) | $C_c$ (F $\text{cm}^2$ ) | $R_c$ ( $\Omega\text{ cm}^2$ ) | $C_{dl}$ (F $\text{cm}^2$ ) | $R_{ct}$ ( $\Omega\text{ cm}^2$ ) | $R_{uk}$ ( $\Omega\text{ cm}^2$<br>* $10^8$ ) |
|----|----------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|---|
| P  | 168      | $8,310 * 10^3$                | $6,716 * 10^{-10}$       | $1,126 * 10^8$                 | -                           | -                                 | 1,126   |
|    | 336      | $7,327 * 10^3$                | $5,785 * 10^{-10}$       | $2,972 * 10^6$                 | $1,475 * 10^{-9}$           | $5,877 * 10^7$                    | 0,617   |
|    | 672      | $6,050 * 10^4$                | $7,221 * 10^{-10}$       | $9,605 * 10^6$                 | $1,683 * 10^{-9}$           | $1,274 * 10^8$                    | 1,371   |
| M  | 144<br>0 | $5,646 * 10^4$                | $7,962 * 10^{-10}$       | $5,945 * 10^6$                 | $2,007 * 10^{-9}$           | $2,335 * 10^8$                    | 2,395   |
|    | 168      | $9,916 * 10^3$                | $3,751 * 10^{-10}$       | $5,221 * 10^7$                 | -                           | -                                 | 0,522   |
|    | 336      | $9,566 * 10^3$                | $3,830 * 10^{-10}$       | $3,146 * 10^7$                 | $7,645 * 10^{-10}$          | $4,332 * 10^8$                    | 4,647   |
| PX | 672      | $8,351 * 10^4$                | $4,200 * 10^{-10}$       | $2,101 * 10^7$                 | $4,168 * 10^{-10}$          | $1,927 * 10^8$                    | 2,138   |
|    | 144<br>0 | $7,857 * 10^4$                | $4,446 * 10^{-10}$       | $1,036 * 10^7$                 | $3,765 * 10^{-10}$          | $1,427 * 10^8$                    | 1,531   |
|    | 168      | $1,561 * 10^4$                | $2,440 * 10^{-10}$       | $1,603 * 10^8$                 | -                           | -                                 | 1,603   |
|    | 336      | $1,418 * 10^4$                | $2,440 * 10^{-10}$       | $7,223 * 10^6$                 | $2,621 * 10^{-10}$          | $1,042 * 10^8$                    | 1,114   |
|    | 672      | $1,216 * 10^5$                | $2,956 * 10^{-10}$       | $1,112 * 10^7$                 | $3,331 * 10^{-10}$          | $2,147 * 10^8$                    | 2,259   |
|    | 144<br>0 | $1,152 * 10^5$                | $3,271 * 10^{-10}$       | $1,094 * 10^7$                 | $3,565 * 10^{-10}$          | $1,987 * 10^8$                    | 2,098   |

Legenda [23]:

- $R_s$  - otpor elektrolita
- $C_c$  - kapacitet premaza
- $R_c$  - otpor premaza
- $C_{dl}$  - kapacitet električnog dvosloja između elektrolita i čelika
- $R_{ct}$  - otpor prijenosu naboja između međufaze elektrolita i čelika
- $R_{uk}$  - zbroj svih otpora u električnom krugu

Na slici 66 prikazane su izmjerene vrijednosti ukupnog otpora kroz vremenske intervale ispitivanja.



**Slika 66. Grafički prikaz mijenjanja vrijednosti otpora kod uzoraka**

Vrijednosti prikazane u grafu su vrijednosti dobivene pri frekvenciji od 0,1 Hz. Kod sva 3 uzorka vrijednosti su pokazale otpore iznad  $10^8$ , što osim kod uzorka P kod kojeg je došlo do rasta sa  $10^7$  na  $10^8$ . Ovo se može pripisati samozacijeljujućem svojstvu cinkovog praha u temeljnom premazu. Time se može opisati i blagi rast otpora kod uzorka PX, s obzirom da oba sustava premaza imaju isti temeljni premaz obogaćen cinkom. Kod uzorka M dolazi do pada otpora. Nakon 1440 h uzorci obogaćeni cinkom u temeljnom premazu imaju više vrijednosti otpora od metaliziranog uzorka [23].

## 7. ZAKLJUČAK

Korozija je izrazito štetan proces nepoželjnog trošenja konstrukcijskih materijala. U struci se najčešće prevenira korištenjem organskih premaza zbog svoje jednostavne primjene i izvrsnih antikorozivnih svojstava. Korištenjem cinka postižu se antikorozivna svojstva sustava bilo da se koristi u metalnoj prevlaci u dupleks sustavu ili kao pigment u temeljnom premazu višeslojnog organskog premaza.

U eksperimentalnom dijelu rada ispitana su 3 sustava premaza, od kojih je jedan dupleks sustav sa metaliziranim slojem cinka te višeslojnim organskim sustavom premaza, dok su druga dva sustava višeslojni organski sustavi premaza s visokim udjelom cinka u temeljnom sloju. Jedan dio uzoraka se za potrebe ispitivanja držao u slanoj komori 720, odnosno 1440 h, dok se drugi dio uzoraka držao u vlažnoj komori 480, odnosno 960 sati. Ispitivanje prionjivosti premaza je pokazalo izrazito dobru adheziju svih sustava premaza te nakon slane i vlažne komore niti jedan rezultat nije bio ispod granice prihvatljivosti. Po kriteriju prionjivosti premaza sva tri sustava su za preporuku u vlažnim i slanim uvjetima.

Pram ispitivanju po normi HRN EN ISO 4628 niti jedan uzorak nije pokazao znakove hrđanja, pucanja, mjehuranja i ljuštenja što upućuje na vrhunska antikorozivna svojstva. Ispitivanje zarezom prema normi je zadovoljilo kriterije s tim da su metalizirani uzorci pokazali najbolje rezultate. Elektrokemijska ispitivanja pokazala su zadovoljavajuće rezultate u kojima je u OCP ispitivanju metalizirani uzorak pokazao najbolju korozijsku stabilnost, no uzorci sa temeljnim premazom obogaćenim cinkom su pokazali dobre rezultate, s tim da je uzorak sa polisiloksanom u završnom premazu pokazao malo bolju stabilnost. EIS ispitivanje je pokazalo da su kroz vrijeme ispitivanja uzorci sa temeljnim premazom obogaćenim cinkom imali nešto bolje vrijednosti otpora, s tim da je i metalizirani uzorak imao visoke vrijednosti.

Sva tri sustava premaza su pokazali izrazito kvalitetna antikorozivna svojstva te su sva tri za preporuku u visoko korozivnim uvjetima jer zadovoljavaju sve uvjete dane ispitivanjima. Nakon ovih ispitivanja osobno bih prije odabira sustava premaza, s obzirom da sva 3 sustava zadovoljavaju tražene uvjete, uzeo u obzir druge uvjete poput cijene, vremena isporuke te prijašnjim iskustvima kod nanošenja istih premaza. Na konačnom kupcu je krajnja odluka koji bi sustav najviše odgovarao jer treba uzeti više faktora u obzir, primjerice opasni radni uvjeti prilikom metalizacije mogu igrati ključnu ulogu jer sve manje poduzeća u Republici Hrvatskoj ga provodi, što direktno utječe na dostupnost. Svakako je povoljno za kupca činjenica da sva tri sustava zadovoljavaju tako da se fokus može usmjeriti na procjenu drugih faktora.

---

**LITERATURA**

- [1] Shreir, L.L., Basic Concepts of Corrosion, Third edition, Elsevier B.V, 2010.
- [2] Juraga, I., Alar, V., Stojanović, I.; Korozija i zaštita premazima, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, Zagreb, 2019.
- [3] Esih, I.: Osnove površinske zaštite, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, Zagreb, 2003.
- [4] Corrosion-engineering,  
<https://faculty.kfupm.edu.sa/me/hussaini/corrosion%20engineering/01.04.01.htm>,  
09.07.2024.
- [5] Alar, V.: Kemijska postojanost materijala, skripte, FSB, Zagreb, 2015.
- [6] Jakopović, B., Izazovi u zaštiti transformatora od korozije, KORMAT, HDZaMa, Zagreb, 2024.
- [7] F. Gui, Novel corrosion schemes for the aerospace industry, Metals and Surface Engineering, Corrosion Control in the Aerospace Industry, Woodhead Publishing, 2009
- [8] NACE, <http://impact.nace.org/economic-impact.aspx> , 03.06.2024.
- [9] Zanella, C., Fedel, M.: Surface Treatments on Al Alloys and Composites, Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys, 2022.
- [10] KISHO, <https://ba.kisho-nano-coating.com/info/the-reason-for-the-stable-performance-of-polys-26750316.html>, 18.06.2024.
- [11] BSBG Corrosion protection,  
<https://bsbgroup.com/blog/a-guide-to-the-corrosion-protection-of-structural-steel>, 15.06.2024.
- [12] Materials performance,  
<https://www.materialsperformance.com/articles/coating-linings/2016/03/nace-sspc-publish-joint-wet-abrasive-blast-standards>, 15.06.2024.
- [13] Hrvatska enciklopedija, <https://www.enciklopedija.hr/clanak/metalizacija>, 15.06.2024.
- [14] Briševac, D., Stojanović, I., Dupleks sustav zaštite prevlakama, MATRIB, Vela Luka, 2018.
- [15] Hrvatska tehnička enciklopedija, <https://tehnika.lzmk.hr/metalizacija/> , 15.06.2024.
- [16] Juraga, I., Šimunović, V., Stojanović, I., Alar, V.: Mehanizmi zaštite od korozije, skripta - autorizirana predavanja, Zagreb, 2012.
- [17] Cramer, S. D., Covino, B. S.: ASM Handbook-Volume 13A, Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection, Materials park, Ohio, 2000.



- 
- [18] Harlow, J.: Electric power transformer engineering, CRC Press, SAD, 2004.
- [19] Hrvatska enciklopedija, <https://www.enciklopedija.hr/clanak/transformatore> 20.06.2024.
- [20] Končar Power Transformers, <https://kpt.hr>, 20.06.2024.
- [21] Enecon Mesogios, <https://eneconmesogios.com/project/power-transformers-protected-from-corrosion/>, 25.06.2024
- [22] Nair, K.R.M.: Power Distribution Transformers, Practical Design Guide, CRC Press, 2021.
- [23] Stojanović, I., Cindrić, I., Turkalj, L., et al: Korozijska svojstva različito sušenih sustava premaza s cinkom u temeljnom sloju, KORMAT, HDZaMa, Zagreb, 2022.