

Svojstva infracrveno sušenih sustava premaza za zaštitu energetskih transformatora

Frljužec, Sofija

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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:235:556542>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-07**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Sofija Frljužec

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Sofija Frljužec

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem mentoru, izv. prof. dr. sc. Ivanu Stojanoviću na svom znanju koje mi je prenio i svoj pomoći tijekom studiranja i pisanja diplomskog rada. Veliko hvala Mirti Logar, mag. ing. cheming. i Ivanu Fatoviću, mag. ing. nav. arch. na pomoći s eksperimentalnim radom te svim ostalim djelatnicima Katedre za zaštitu materijala.

Posebno hvala mojoj obitelji i prijateljima na podršci i motivaciji. Hvala mome Josipu što ima strpljenja i više nego što zaslužujem.

Zahvaljujem se djelatnicima Končar – Mentalne Konstrukcije na svoj opremi, prostoru i vremenu izdvojenom za izradu eksperimentalnog rada. Istraživanje je provedeno u sklopu projekta „Pametno postrojenje za sušenje tekućih premaza (Referentna oznaka: KK.01.2.1.02.) kojeg je sufinancirala Europska unija iz Europskog fonda za regionalni razvoj.

Sofija Frljužec



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske 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 / 23 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 23 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Sofija Frljužec** JMBAG: 0035220454

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Svojstva infracrveno sušenih sustava premaza za zaštitu energetskih transformatora**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Properties of infrared-cured coating systems for corrosion protection of power transformers**

Opis zadatka:

Zaštita od korozije premazima je neizostavan proces izrade neke konstrukcije, a direktno utječe na njenu trajnost i sigurnost u radu. Iz tog razloga, zahtjevi za kvalitetom zaštite od korozije su sve stroži. Razvoj zaštitnih premaza je usmjeren na poboljšanja njihovih korozijskih svojstava, smanjenja negativnog utjecaja na okoliš te ubrzanog sušenja. Jedno od tehnoloških rješenja za ubrzano sušenje je infracrveno zračenje koje se danas sve više uvodi i primjenjuje u metalnoj industriji čime se postiže kraće vrijeme sušenja i veća produktivnost proizvodnje.

U radu je potrebno obraditi zaštitne premaze, pripremu površine i postupke nanošenja premaza. Ukratko obraditi sušenje premaza s naglaskom na infracrveno zračenje. U eksperimentalnom dijelu rada, na čelične uzorke je potrebno nanijeti sustave premaza koji se koriste za zaštitu energetskih transformatora, posušiti infracrvenim zračenjem i ispitati njihova korozijska i fizikalna svojstva. U zaključku je potrebno kritički se osvrnuti na dobivene rezultate.

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

Zadatak zadan:

4. svibnja 2023.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Ivan Stojanović

Datum predaje rada:

6. srpnja 2023.

Predviđeni datumi obrane:

17. – 21. srpnja 2023.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA I KRATICA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. ORGANSKE PREVLAKE.....	2
2.1. Komponente premaza	2
2.2. Mehanizmi sušenja prevlaka	5
2.3. Sustav premaza	6
3. PRIPREMA POVRŠINE I NANOŠENJE PREMAZA	7
3.1. Priprema površine	7
3.1.1. Odmaščivanje.....	7
3.1.2. Mehaničko čišćenje.....	8
3.1.3. Kemijsko čišćenje	9
3.1.4. Elektrokemijsko čišćenje	9
3.2. Priprema premaza	10
3.3. Nanošenje premaza	11
3.3.1. Nanošenje aplikatorima	11
3.3.2. Nanošenje četkama	12
3.3.3. Nanošenje lopaticama	12
3.3.4. Nanošenje valjcima	13
3.3.5. Prskanje boje	14
3.3.5.1. Zračno prskanje.....	14
3.3.5.2. Bezračno prskanje	15
3.3.5.3. Elektrostatsko prskanje i naprašivanje.....	16
3.3.6. Nanošenje premaza uranjanjem	16
3.3.7. Nanošenje premaza prelijevanjem	17
3.3.8. Nanošenje premaza elektroforezom.....	17
3.4. Zaštita na radu	18
4. SUŠENJE PREMAZA IC ZRAČENJEM.....	20
4.1. Svojstva IC zračenja.....	20
4.2. Mehanizam sušenja	20
4.3. Vrste uređaja	21
4.3.1. Električni izvor.....	22
4.3.2. Plinski izvor	23
4.4. Prednosti i nedostaci	23
4.5. Razvoj i primjena u industriji.....	24

5. VAŽNOST KOROZIJSKIH ISPITIVANJA.....	25
5.1. Klasifikacija korozivnih uvjeta	27
5.2. Odabir sustava premaza	30
5.3. Korozijska ispitivanja	30
5.3.1. Eksploatacijska korozijska ispitivanja	31
5.3.2. Terenska korozijska ispitivanja.....	31
5.3.3. Laboratorijska korozijska ispitivanja	32
6. EKSPERIMENTALNI DIO	33
6.1. Provedba ispitivanja	33
6.1.1. Nanošenje i sušenje premaza	34
6.1.2. Debljina suhog filma	40
6.1.3. Mjerenje tvrdoće olovkama	46
6.1.4. Ispitivanje tvrdoće Shore D metodom	48
6.1.5. Ispitivanje prionjivosti vlačnom metodom (<i>pull-off</i>)	49
6.1.6. Ispitivanje otpornosti na udar.....	52
6.1.7. Određivanje potencijala otvorenog strujnog kruga.....	54
6.1.8. Elektrokemijska impedancijska spektroskopija	56
6.1.9. Ispitivanje u slanoj komori.....	62
6.1.10. Ispitivanje u klima komori	70
6.2. Analiza rezultata ispitivanja.....	75
7. ZAKLJUČAK.....	77
LITERATURA.....	78

POPIS SLIKA

Slika 1. Komponente premaza [3].....	2
Slika 2. Podjela premaza s obzirom na način otvrdnjavanja [3]	5
Slika 3. Shematski prikaz sustava premaza.....	6
Slika 4. Elektropoliranje metala [1]	9
Slika 5. Nanošenje kubnim aplikatorom	11
Slika 6. Nanošenje spiralnim aplikatorom	11
Slika 7. Kistovi za nanošenje premaza	12
Slika 8. Nanošenje premaza valjkom [12]	13
Slika 9. Raspršivači za zračno prskanje [11].....	14
Slika 10. Shematski prikaz opreme za bezračno prskanje [11].....	15
Slika 11. Razlika bezračnog i zračnog prskanja [11]	15
Slika 12. Shematski prikaz visokonaponskog raspršivača praha [11]	16
Slika 13. Nanošenje premaza prelijevanjem [3].....	17
Slika 14. Nanošenje premaza pridržavajući se zaštite na radu, Končar Metalne Konstrukcije	19
Slika 15. Elektromagnetski spektar [16]	20
Slika 16. Mehanizam IC sušenja [18]	21
Slika 17. Dijelovi uređaja za infracrveno sušenje [19]	22
Slika 18. Električni izvor za IC sušenje [19].....	22
Slika 19. Plinski izvor za IC sušenje [19]	23
Slika 20. Primjena infracrvenog sušenja u automobilskoj industriji [22]	24
Slika 21. Kutub-stup [24]	25
Slika 22. Shema atmosferske korozije [23].....	26
Slika 23. Dva temeljna pristupa klasifikacije atmosferske korozije [23].....	27
Slika 24. Korozijska stanica u Kaštel Sućurcu	32
Slika 25. Mjerenje hrapavosti površine.....	34
Slika 26. Dodavanje kontakta.....	35
Slika 27. Zamješavanje	35
Slika 28. Nanošenje premaza na podlogu pomoću žlice	35
Slika 29. Premazivanje podloge aplikatorom.....	35
Slika 30. IC sušenje uzoraka, prototip kabine za IC sušenje premaza u tvrtki Končar – Metalne Konstrukcije	36
Slika 31. Uzorci A (EP-PUR)	38
Slika 32. Uzorci B (EP-PUR).....	38
Slika 33. Uzorci C (EP-EP-PUR).....	39
Slika 34. Uzorci D (EP-EP-PUR)	39
Slika 35. Mjerenje DSF temeljnog premaza	40
Slika 36. Mjerenje ukupne DSF	40
Slika 37. DSF A sustava premaza	41
Slika 38. DSF B sustava premaza	42
Slika 39. DSF C sustava premaza	43
Slika 40. DSF D sustava premaza	44
Slika 41. Oprema za ispitivanje tvrdoće olovkama.....	46
Slika 42. Redosljed ispitivanja tvrdoće [3]	46
Slika 43. Rezultati ispitivanja tvrdoće olovkama	47
Slika 44. Srednja vrijednost ispitivanja Shore D metodom	48
Slika 45. Pribor za pripremu površine i lijepljenje ispitnog valjka	49

Slika 46. Zalijepljeni ispitni valjci na uzorcima.....	50
Slika 47. Skidanje ljepila oko dolija.....	50
Slika 48. Mjerenje naprezanja.....	50
Slika 49. Oprema za ispitivanje, Laboratorij za zaštitu materijala, FSB	52
Slika 50. Elektrokemijska ćelija.....	55
Slika 51. Najčešći ekvivalentni krug za opisivanje ponašanja premaza [35].....	56
Slika 52. Nyquistov graf za jednostavni ekvivalentni krug [3].....	57
Slika 53. Bodeov graf za jednostavni ekvivalentni krug [3]	57
Slika 54. Nyquistov graf za porozni premaz [3]	58
Slika 55. Bodeov dijagram za porozni premaz [3].....	58
Slika 56. Učinkovitost zaštite u odnosu na impedanciju ($\log Z$), (gdje je Z u Ωcm^2 pri 0,1 Hz)	59
Slika 57. Izgled Nyquistovog grafa nakon 24 h	60
Slika 58. Izgled Bodeovog grafa nakon 24 h	60
Slika 59. Izgled Nyquistovog grafa nakon 8 dana	61
Slika 60. Izgled Bodeova grafa nakon 8 dana.....	61
Slika 61. Urezivanje premaza.....	64
Slika 62. Uzorci u klima komori, Laboratorij za zaštitu materijala, FSB	70

POPIS TABLICA

Tablica 1. Klasifikacija i karakteristike organskih premaza [4].....	3
Tablica 1. Klasifikacija i karakteristike organskih premaza [4].....	4
Tablica 2. Podjela postupaka mehaničkog čišćenja [1,3].....	8
Tablica 3. Produktivnost nanošenja premaza [9]	11
Tablica 4. Karakteristike nanošenja četkama [3,10,11]	12
Tablica 5. Mjere zaštite na radu [12].....	19
Tablica 6. Karakteristike sustava s obzirom na intenzitet energije [18]	21
Tablica 7. Prednosti i nedostaci IC sušenja [18,20,21]	23
Tablica 8. Kategorije atmosferske korozivnosti okoliša i primjeri tipičnog okoliša [25,26]...	28
Tablica 9. Brzina korozije za pojedine materijale u određenoj kategoriji [25,26].....	29
Tablica 10. Funkcije brzina korozije [25]	29
Tablica 11. Opis oznaka [25]	29
Tablica 12. Propisani eksploatacijski vijek sustava premaza [28]	30
Tablica 13. Usporedba karakteristika pojedinih vrsta ispitivanja [29].....	31
Tablica 14. Oznake premaza	33
Tablica 15. Debljine pločica [mm].....	34
Tablica 16. Vrijeme sušenja premaza [min].....	37
Tablica 17. Postignute temperature premaza prikazane [°C].....	37
Tablica 18. Prosječna debljina suhog filma za IC sušene premaze [μm].....	45
Tablica 19. Prosječna debljina suhog filma premaza sušenih na zraku [μm]	45
Tablica 20. Izgled uzoraka	47
Tablica 21. Numeričke vrijednosti tvrdoće premaza mjerene Shore D metodom	48
Tablica 22. Numeričke vrijednosti ispitivanja <i>pull-off</i> [MPa]	50
Tablica 23. Izgled uzoraka nakon <i>pull-off</i> ispitivanja	51
Tablica 24. Rezultati ispitivanja udarom.....	53
Tablica 25. Parametri za mjerenje OCP-a	54
Tablica 26. E_{cor} nakon stabilizacije u 3,5 % NaCl [mV].....	54
Tablica 27. Parametri ispitivanja.....	59
Tablica 28. Vrijednosti otpora premaza [Ω]	59
Tablica 29. Parametri ispitivanja u slanoj komori.....	62
Tablica 30. Provedena ispitivanja i norme	62
Tablica 31. Analiza ljuštenja premaza [39].....	63
Tablica 32. Ocjene ispitivanja u slanoj komori.....	64
Tablica 33. Uzorci prije i nakon izlaganja u slanoj komori	65
Tablica 34. Izgled ureza nakon ispitivanja u slanoj komori.....	69
Tablica 35. Ocjene ispitivanja u klima komori	70
Tablica 36. Uzorci prije i nakon izlaganja u klima komori.....	71

POPIS OZNAKA I KRATICA

Oznaka	Jedinica	Opis
1K		Jednokomponentni
2K		Dvokomponentni
BDP		Bruto domaći proizvod
c	mm	Stupanj korozije
C_{dl}	μF	Dvoslojni kapacitet
C_{premaz}	μF	Kapacitet premaza
DSF		Debljina suhog filma
E_{cor}	mV	Korozijski potencijal
EIS		Elektrokemijska impedancijska spektroskopija
f	Hz	Frekvencija
IC		Infracrveno
NACE		<i>National Association of Corrosion Engineers</i>
OCP		<i>Open circuit potential</i>
p_d	$\text{mg}/\text{m}^2\text{d}$	Prosječna godišnja količina taloženja SO_2
PUR		Poliuretan
R_{el}	Ω	Nekompenzirani otpor
r_{corr}	$\mu\text{m}/\text{god}$	Brzina korozije u prvoj godini
RH	%	Prosječna godišnja relativna vlažnost
R_{pore}	Ω	Otpor pora
R_z	μm	Srednja visina neravnina
s_d	$\text{mg}/\text{m}^2\text{d}$	Prosječna godišnja količina taloženja klorida
T	$^{\circ}\text{C}$	Prosječna godišnja temperatura
UV		<i>Ultraviolet</i>
VOC	g/l	<i>Volatile Organic Compounds</i>
w_c	mm	Širina zone korozije
w	mm	Širina ureza
Z	Ω	Impedancija
Z'	Ω	Realna komponenta impedancije
Z''	Ω	Imaginarna komponenta impedancije

SAŽETAK

U ovom je radu prikazana metoda zaštite od korozije organskim premazima koji se primjenjuju u širokom spektru industrija kao sustavi premaza kako bi se pokrio što širi raspon zahtjeva mehaničkih i korozivskih svojstava. Predstavljene su načini nanošenja premaza i pripreme površine koja prethodi samom nanošenju te su dane karakteristike sušenja infracrvenom (IC) metodom. Kako bi se predvidjelo ponašanje premaza, provedena su laboratorijska ispitivanja na čeličnim pločicama na koje su nanoseni sustavi premaza te je napravljena usporedba dvaju različitih sustava sušenih na zraku i pomoću IC zraka. Sukladno dobivenim rezultatima izvedeni su zaključci o svojstvima premaza ovisno o načinu njihovog sušenja.

Ključne riječi: korozija, organski premazi, IC sušenje

SUMMARY

In this paper a method of corrosion protection with organic coatings is presented, which is applied in a wide range of industries as coating systems to cover the widest possible spectrum of mechanical and corrosion properties. The methods of applying the coating and preparing the surface before the actual application is presented, and the characteristics of drying using the infrared (IR) method are given. To predict the behavior of the coating, laboratory tests were carried out on steel plates on which the coating systems were applied, and a comparison was made between two different systems dried in air and with IR rays. Following the obtained results, conclusions were drawn about the properties of the coating depending on the method of their drying.

Key words: corrosion, organic coatings, IR drying

1. UVOD

Korozija je proces koji podrazumijeva trošenje materijala uzrokovano kemijskim ili elektrokemijskim djelovanjem okoliša. Ona može uzrokovati zastoje i gubitke u proizvodnji, oštećenje građevina ili skulptura, nesreće, ali i predstavljati opasnost za ljudsko zdravlje. Istraživanje koje je provedeno od strane NACE-a pokazuje da trošak korozije predstavlja 3,4 % iznosa svjetskog BDP-a. Proces korozije nije moguće spriječiti jer je on spontan, no moguće ga je pravilnim mjerama usporiti. [1,2]

Fokus ovog rada je na zaštiti materijala organskim prevlakama što je najčešće korištena metoda zaštite od korozije. Prikazana je podjela organskih prevlaka, njihov sastav te su detaljnije razrađeni načini nanošenja prevlaka prilikom koje je iznimno važna zaštita na radu. Istaknuta je metoda sušenja premaza IC zračenjem kao nova metoda koja sve više pronalazi svoju primjenu u industriji. Za kraj teorijskog dijela, prikazana je važnost korozijskih ispitivanja za predviđanje korozijskog ponašanja materijala i premaza koji se primjenjuju.

Kroz eksperimentalni dio rada, provedena su ispitivanja korozijskih i mehaničkih svojstava dvaju sustava premaza baziranih na epoksidnim (EP) temeljima i epoksidnim međuslojevima te završnim poliuretanskim (PUR) premazima. Pola uzoraka osušeno je na zraku, dok je druga polovica ubrzano osušena pomoću IC zraka. Korozijska svojstva ispitana su u slanoj i klima komori te elektrokemijskom impedancijskom spektroskopijom (EIS). Od mehaničkih svojstava premaza, izmjerena je tvrdoća prema Shore D metodi i napravljena je usporedba s tvrdoćom olovaka, određena je otpornost na udar te prionjivost premaza vlačnom metodom.

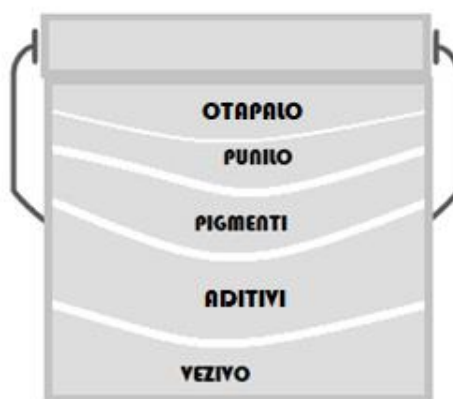
2. ORGANSKE PREVLAKE

Osnovne mjere zaštite od korozije dijele se na konstrukcijsko – tehnološke mjere, primjenu korozijski postojanih materijala, inhibitore, elektrokemijsku zaštitu te prevlačenje. [1]

Uloga prevlaka jest sprečavanje dodira materijala s agresivnim medijem. Osim korozijske zaštite, one sprečavaju i mehaničko trošenje, a mogu se nanositi i radi poboljšanja estetike. Prevlake se dijele na metalne i nemetalne pri čemu se nemetalne dijele na anorganske i organske. Organske prevlake čine osnovnu korozijsku zaštitu za $\frac{3}{4}$ metalnih materijala. To su prevlake čiji je osnovni sastojak (vezivo) neka organska tvar. [3]

2.1. Komponente premaza

Osnovne komponentne premaza prikazane su na slici 1.



Slika 1. Komponente premaza [3]

Vezivo je osnovni sastojak premaza čija je zadaća povezivanje svih komponenata premaza. Ono je neisparljiva komponenta te čini zaštitni tvrdi sloj. Vezivo se otapa u otapalu koje kontrolira viskoznost. Dodaje se prilikom proizvodnje premaza, a kao razrjeđivač koristi se i kod pripreme boje za nanošenje premaza. Neprozirnost i boju premaza osiguravaju pigmenti koji uz obojenje imaju funkciju i kao inhibitori korozije, pasivatori površine, ostvaruju katodnu zaštitu metalne podloge, čine barijeru od okoliša i štite od UV zračenja. Punila se primjenjuju u svrhu dobivanja boljih mehaničkih svojstava, tečenja i poboljšanja funkcije barijere. Uloga aditiva je kompenzacija nedostataka (npr. razlijevanje, sedimentacija, umrežavanje). Prikaz karakteristika premaza i medija u kojem se primjenjuju s obzirom na vrstu smole dan je u tablici 1. [3]

Tablica 1. Klasifikacija i karakteristike organskih premaza [4]

Vrsta smole	Podvrsta	Kiseline	Lužine	Otopine	Voda	Atmosfera	Svojstva
1K- sustavi							
Alkidi	Uljna baza	+/-	-	-	+/-	++	Dobra prionjivost na loše pripremljene površine, prikladan za blage kemijske pare, ali nije kemijski otporan.
	Silicij	+/-	+/-	+/-	+/-	++	Poboljšana trajnost, sjajnost, otpornost na toplinu.
	Amino	+/-	+/-	+/-	+	++	Visoka otpornost na vlagu.
	Fenolni	+/-	+/-	+/-	++	++	Pogodan za ukopane konstrukcije.
Epoksidester		+/-	+/-	-	+/-	+/-	Slična svojstva kao i kod alkida, ali je skuplji.
Klorkaučuk		+	+	-	+	++	Tvori dobru barijeru, ali ima lošu otpornost na UV zračenje.
Akrili		+/-	+	+	+	++	Koristi se kao završni premaz u automobilskoj industriji.

Tablica 1. Klasifikacija i karakteristike organskih premaza [4]

Vrsta smole	Podvrsta	Kiseline	Lužine	Otopine	Voda	Atmosfera	Svojstva
Vinili		++	++	-	++	+	Široka primjena u industriji, lako ponovno premazivanje, ima visok sadržaj hlapljivih tvari, no nisko je toksičan, ali postoji opasnost od požara.
2K sustavi							
Fenoli		+/-	+/-	+	++	++	Pogodan za ukopane konstrukcije.
Poliamid, Epoksid		+/-	++	++	-	+	Čvrst, fleksibilan, nije pogodan kao završni premaz, otporan na abraziju.
Katran/epoksid		++	++	+	++	+	Temeljni premaz, vrlo dobra prionjivost, izvrsna kemijska otpornost.
Polieseter uretan		+/-	+	++	+/-	++	Širok raspon primjene ovisno o modifikacijama.
++ vrlo dobra otpornost, + dobra otpornost, +/- djelomična otpornost, - nije otporan							

2.2. Mehanizmi sušenja prevlaka

Mehanizmi sušenja, odnosno otvrdnjavanja premaza mogu se podijeliti u dvije osnovne kategorije: fizikalno i kemijsko. Kemijsko se sušenje grana na oksidacijsko, dvokomponentno te na ostale mehanizme sušenja. [3]

Fizikalno sušeni premazi su oni premazi čije se otvrdnjavanje postiže isparavanjem otapala ili razrjeđivača u tri koraka:

- 1) isparavanje otapala s površine – rezultat je povećani udio polimera,
- 2) difuzija otapala duž slojeva – rezultat je novo povećanje udjela polimera,
- 3) isparavanje ostalog otapala iz nastalog filma polimera. [3]

Kod oksidacijskog mehanizma, film se postiže reakcijama hlapljenja otapala te kisika s vezivom. Kako bi se ubrzao proces oksidacije, kod ovog procesa potrebno je koristiti katalizatore zbog spore reakcije veziva s kisikom na nižim temperaturama. Proces dvokomponentnog sušenja karakterističan je za 2-K premaze koji se sastoje od sredstva za otvrdnjavanje i baze. Njihovo se sušenje odvija na način da otapalo hlapi, dok vezivo reagira sa sredstvom za otvrdnjavanje. Pod ostale reakcije smatra se proces nastanka filma reakcijom veziva s vlagom u zraku ili veziva s CO₂, te polimerizacijom na visokim temperaturama. Na slici 2. prikazana je podjela premaza prema vrsti veziva s obzirom na način otvrdnjavanja. [3]



Slika 2. Podjela premaza s obzirom na način otvrdnjavanja [3]

2.3. Sustav premaza

Zaštita premazima najčešće se izvodi kao sustav premaza kod kojeg svaki sloj ima svoju ulogu. Prikaz komponenta sustava dan je na slici 3.



Slika 3. Shematski prikaz sustava premaza

Temeljni premaz je zaštitni sloj koji ide direktno na površinu metala. Njegova je uloga osiguranje dobre prionjivosti i stvaranje zaštite od korozije u obliku pasivnog filma čime se stvara inertnost na koroziju i kemikalije. Korozija se sprječava i dodavanjem pigmentata koji štite podlogu katodnim učinkom. Temeljni sloj mora imati visoku elastičnost kako bi mogao pratiti dilataciju podloge te mora imati dobru kompatibilnost i sposobnost vezanja s međuslojem. [3,5]

Međuslojni premazi imaju ulogu postizanja dovoljne debljine sustava premaza pri čemu moraju imati dobru sposobnost vezivanja na temeljni sloj, ali i mogućnost nanošenja i dobrog prijanjanja završnog sloja na njega. [3,5]

Završni premaz koristi se kao primarni barijerni sloj prema okolišnim uvjetima. Povrh uloge zaštite od korozije, završni premazi mogu imati posebnu namjenu poput zaštite od požara, sprečavanje obraštaja ili klizanja. Dekorativni pigmenti u završnom sloju osiguravaju lijep izgled premaza. Svi slojevi premaza moraju biti međusobno kompatibilni kako bi sustav premaza bio učinkovit. [3,5]

3. PRIPREMA POVRŠINE I NANOŠENJE PREMAZA

Kako bi nanošenje premaza bilo učinkovito, potrebno je prije nanošenja pravilno očistiti površinu. Ukoliko površina nije dobro pripremljena, dolazi do nekvalitetne zaštite i time premaz ne zadovoljava projektirani vijek trajanja. Premazi se mogu nanositi aplikatorima, kistom, valjkom, prskanjem, uranjanjem, prelijevanjem i elektroforezom. [1,3]

3.1. Priprema površine

Zadaća pripreme površine je uklanjanje produkata korozije, okujine, masnoće i drugih nečistoća. Vrsta postupaka koji će se primijeniti ovisi o vrsti materijala, stanju površine i vrsti premaza koji će se aplicirati na površinu. Vrste obrada koje se najviše koriste su: mehanička, kemijska, elektrokemijska i odmašćivanje. [1,3]

3.1.1. Odmašćivanje

Odmašćivanje je priprema površine koja se izvodi kako bi se odstranile masne tvari s površine materijala u svrhu dobivanja dobre prionjivosti premaza na površinu. Ono se može izvesti pomoću lužnatih ili organskih otapala te elektrokemijskim ili ultrazvučnim odmašćivanjem. Lužnate otopine koje se koriste su: NaOH, KOH, Na₂CO₃ te industrijski deterdženti. Ovaj se princip koristi pri temperaturama 50-100 °C uranjanjem metala u otopine 3-10 min ili prskanjem 0,5-3 min. Ovaj postupak nije pogodan za Al, Zn i njihove legure te nemetalne materijale koji se u njima otapaju. Odmašćivanje hlapljivim organskim otapalima izvodi se fizikalnim otapanjem u tekućinama pri čemu one isparavaju s odmašćenih ploha što je nedostatak ove metode jer su pare štetne za okoliš, a također su i zapaljivi te se zbog toga ta metoda izbacuje iz upotrebe. Elektrokemijsko odmašćivanje površine dijeli se na katodno, anodno ili kombinirano. Pod katodnim odmašćivanjem podrazumijeva se proces elektrolize kod kojeg se na katodi izlučuje vodik koji odvaja masnoću s površine materijala pri čemu čestice nečistoće emulgiraju u lužnatoj otopini u kojoj se proces odvija. S druge strane, anodno se odmašćivanje rjeđe primjenjuje zbog toga što kisik slabije odvodi nečistoće od vodika, no zbog rizika od pojave vodikove krhkosti anodna i katodna se zaštita koriste kombinirano. Nakon grubog odmašćivanja može se primijeniti ultrazvučno odmašćivanje za uklanjanje sitnih nečistoća koje radi na principu širenja ultrazvučnih valova kroz otopinu pri čemu se stvaraju velike tlačne sile poradi kojih se masnoće odvajaju od materijala. Nedostatak ovog postupka je cijena te se zbog toga rijetko primjenjuje. [1,3]

3.1.2. Mehaničko čišćenje

Mehaničko se čišćenje izvodi u svrhu uklanjanja boje, strugotina, hrđe i/ili troske. Ono može biti ručno za manje površine ili strojno koje se koristi za veće površine zbog veće produktivnosti. Podjela postupka i karakteristike istih prikazana je u tablici 2. [3]

Tablica 2. Podjela postupaka mehaničkog čišćenja [1,3]

POSTUPAK	KARAKTERISTIKE
Brušenje	Provodi se abrazivnim zrcima dijamanta ili SiC finoće 8-3000 kako bi se skinule nepravilnost nastale zavarivanjem te produkti korozije.
Poliranje	Provodi se pastama ili prahom u svrhu uklanjanja neravnina koje su posljedica brušenja.
Obrada u bubnjevima	Primjenjuje se za male predmete koji nisu osjetljivi na udar. Materijali abraziva su kvarcni pijesak i korund.
Četkanje	Koristi se za skidanje rahlih produkata korozije metalnim četkama.
Pjeskarenje	Primjenjuje se za uklanjanje starih prevlaka i korozijskih produkata pomoću komprimiranog zraka i korunda iz mlaznica. Nedostatak ove metode je opasnost za zdravlje operatera.
Čišćenje vodenim mlazom	Ovom se metodom uklanjaju nečistoće i smanjuje se prašina u zraku, no problemi su nemogućnost postizanja dovoljne hrapavosti pojava korozije.
Sačmarenje	Koristi se za skidanje prevlaka i korozijskih produkata mlazom sačme.

Stupanj pripreme površine mlazom abraziva definiran je normom HRN EN ISO 8501-1. Dijeli na Sa 1 (lagano čišćenje), Sa 2 (temeljito čišćenje), Sa 2,5 (vrlo temeljito čišćenje) i Sa 3 (čišćenje do čistog čelika). Najčešće se primjenjuje Sa 2,5 gdje ne smiju biti prisutne nečistoće, ulje, masnoće, okujina, hrđa ni premazi, a ostale nečistoće mogu biti u obliku mrlja. [3,6]

Kod mehaničke pripreme površine valja obratiti pozornost na hrapavost površine. Ako bi se primjenjivala kuglasta sačma, tada dolazi do manjeg odstupanja od profila hrapavosti, dok je kod primjene lomljene sačme profil hrapavosti izraženiji zbog grubljih čestica sačme. Odstupanje od profila podloge naizgled bi moglo pružiti mehaničko usidrenje prevlake i time poboljšati adheziju, ali ako se u premazu zarobi zrak, tada to postaje mjesto gdje se voda i elektroliti mogu koncentrirati i tako pokrenuti koroziju. [7,8]

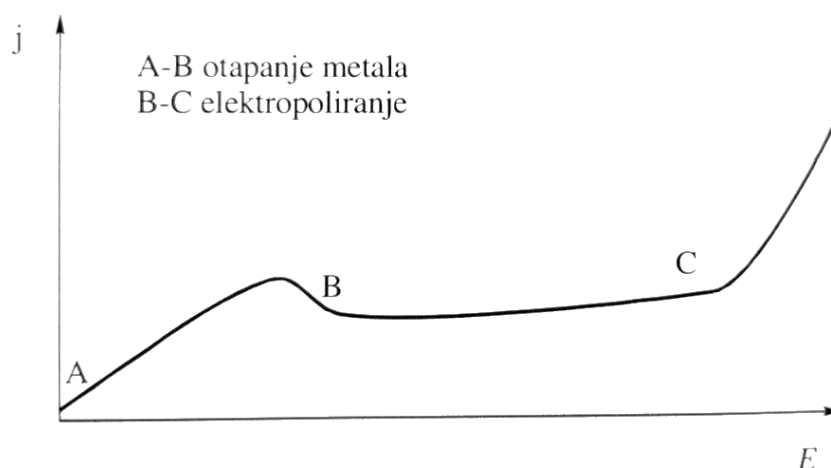
3.1.3. Kemijsko čišćenje

Dekapiranje je vrsta kemijske obrade u otopinama lužina ili kiselina u svrhu uklanjanja produkata korozije. Za nelegirane i niskolegirane čelike te željezne ljevove primjenjuje se kiselinsko dekapiranje odnosno nagrizanje u 3-20 %-tnoj otopini HCl ili H₂SO₄. Dolazi do otapanja sloja produkata korozije, no može doći i do nepovoljnih situacija kao što je smanjenje dimenzija, nastanka hrapavije površine te vodikova krhkost. Zbog toga se prilikom ovog postupka primjenjuju inhibitori. Za visokolegirane čelike primjenjuju se smjese HNO₃ i HF. Lužnato se dekapiranje primjenjuje kod čišćenja Al i njegovih legura u 10 %-tnoj otopini NaOH. Kod takve reakcije nije moguće primijeniti inhibitore pa se ona ne smije predugo odvijati zbog otapanja aluminija. [1,3]

3.1.4. Elektrokemijsko čišćenje

Elektrokemijsko čišćenje sastoji se od nagrizanja i poliranja. Elektrokemijsko nagrizanje podrazumijeva uklanjanje slojeva oksida i korozijskih produkata pri čemu je metal uronjen u elektrolit te je spojen na istosmjernu struju. Kod anodnog nagrizanja dolazi do otapanja materijala, dok se kod katodnog nagrizanja razvija vodik koji uklanja nečistoće s metala pri čemu može doći do vodikove krhkosti. Poradi toga primjenjuje se kombinacija obje metode. Elektrokemijsko poliranje (slika 3.) sastoji se od dvije faze:

- 1) otapanje povišenih dijelova materijala (A-B),
- 2) poliranje (B-C).



Slika 4. Elektropoliranje metala [1]

Kod ovog postupka anodu predstavlja metal, dok je katoda olovo ili grafit. Elektrolit koji se koristi je smjesa H₃PO₄, HClO₄, H₂SO₄ i H₂CrO₄.

3.2. Priprema premaza

Proizvodnja premaza sastoji se od:

- zamješavanja određenih komponenata,
- dispergiranja pigmenata u vezivu,
- homogeniziranja.

Prilikom skladištenja može doći do taloženja pigmenata te je nužno prije aplikacije premaza promiješati kako bi se postigla ravnomjerna tekstura. Na površini premaza može doći do pojave kožice koja nastaje radi oksidacije veziva i pigmenata. Prije nanošenja premaza, potrebno ju je ukloniti. [3]

Miješanje boje može biti ručno ili strojno. Ručno miješanje u pravilu se primjenjuje za pakiranja do 20 l. Proces se sastoji od sljedećih koraka:

- odvajanje tekućeg dijela u čistu kantu,
- miješanje slegnute smjese dok ne postane tečnija,
- spajanje 2 smjese,
- miješanje dok se sredstvo ne ujednači,
- prelijevanje nekoliko puta da se osigura potpuna ravnomjerna struktura boje.

Prednosti strojnog miješanja nad ručnim je brzina postupka i dobivanje ravnomjernije strukture. Za miješanje se primjenjuju miješalice što manje brzine da ne bi došlo do miješanja premaza sa zrakom, a time i pojava mjehura i rupa u premazu. Kod primjene 2K premaza, baza i otvrdnjivač miješaju se netom prije nanošenja radi postizanja kemijske reakcije. Baza i otvrdnjivač najčešće su različite boje kako bi nakon zamiješanja lakše provjerili je li uspješno dobivena jednolika nijansa i ravnomjerna struktura. [3]

Kako bi se snizila viskoznost i olakšalo nanošenje boje, premazu se dodaju razrjeđivači. Kontrola viskoznosti izvodi se mjerenjem vremena tečenja boje poznatog volumena pomoću viskozimetra i štoperice. Radi opasnosti od zagađenja zraka, požara i eksplozije teži se primjeni razrjeđivača sa što manjim udjelom hlapljivih tvari te što većom primjenom praškastih ili vodorazrjeđivih premaza. [3]

3.3. Nanošenje premaza

Pravilno nanošenje premaza ključno je za postizanje projektirane zaštite. Parametri koji uvelike utječu na to su: brzina nanošenja, kvaliteta zaštite, ispravnost opreme te utjecaj operatera na izvedbu nanošenja. Sve to ima utjecaj na prijanjanje premaza, zahtijevanu debljinu, estetski izgled te ekonomičnost rada. Produktivnost pojedinih postupaka nanošenja premaza prikazana je u tablici 3.

Tablica 3. Produktivnost nanošenja premaza [9]

POSTUPAK	PRODUKTIVNOST [m ² /dan]
četka	90-100
valjak	180-370
zračno prskanje	370-740
bezračno prskanje	740-1115

Prije nanošenja premaza potrebno je izmjeriti temperaturu podloge koja mora biti barem za 3 °C viša od temperature rosišta.

3.3.1. Nanošenje aplikatorima

Nanošenje aplikatorima koristi se u svrhu dobivanja precizne debljine na maloj površini za istraživanja i ispitivanja premaza. Najkorišteniji su kubni (slika 5.) i spiralni (slika 6.) aplikator. Nedostatak spiralnog aplikatora je ostavljanje rebrastih tragova na površini materijala.



Slika 5. Nanošenje kubnim aplikatorom



Slika 6. Nanošenje spiralnim aplikatorom

3.3.2. Nanošenje četkama

Nanošenje premaza četkama odnosno kistovima najstarija je metoda nanošenja premaza koja se izvodi ravnim potezima dolje-gore-dolje pa desno-lijevo-desno. U tablici 4. prikazane su karakteristike nanošenja četkama u vidu prednosti i nedostataka ove metode. Na slici 7. prikazani su kistovi različitih debljina. [10]

Tablica 4. Karakteristike nanošenja četkama [3,10,11]

PREDNOSTI	NEDOSTACI
pogodno za eksplozivne ambijente	niska produktivnost = skupa radna snaga
prikladno za prostore bez ventilacije	tragovi od kista – narušava estetski dojam
flekanje – zaštita kritičnih mjesta	neravnomjerna DSF
primjena viskoznih premaza → nema potrebe za razrjeđivačem	na velikim površina veliko odstupanje od ujednačenosti boje
lokalni popravci premaza	manja DSF u odnosu na bezračno prskanje



Slika 7. Kistovi za nanošenje premaza

3.3.3. Nanošenje lopaticama

Lopaticice ili špatule koriste se za kitove i premaze s povećanim udjelom suhe tvari pri čemu debljina suhog filma (DSF) iznosi više od 100 μm . Problem ove metode je dobivanje hrapavih premaza koji nisu jednolike debljine.

3.3.4. Nanošenje valjcima

Ova je metode nanošenja premaza brža od metode nanošenja boje četkom te zbog toga ima prednost primjene kod premazivanja većih površina. Ovom metodom premaz se kotrlja po površini, dok se u prethodnim metodama trlja u podlogu pa se zbog toga premazi slabije utrljavaju u podlogu, ali se dobiva glađi i ravnomjerniji sloj. Primjenom ove metode gubici su minimalni. Glavni je nedostatak ove metode dobivanje tankog poroznog sloja poradi male penetracije čime se ne može dobiti velika debljina premaza. Također, ova metode nije prikladna za bojanje malih, neravnih i loše pripremljenih podloga, osobito u slučajevima kada se na površini nalazi hrđa ili prašina. Iz tih se razloga ova metoda u pravilu koristi za nanošenje završnih premaza na velike i glatke površine, a izbjegava se za nanošenje temeljnih premaza. Na slici 7. prikazano je nanošenje premaza valjkom. [3,10,11]



Slika 8. Nanošenje premaza valjkom [12]

3.3.5. Prskanje boje

Prskanje ili štrcanje je postupak nanošenja materijala koji se koristi za zaštitu složenih konstrukcija. Temelji se na mlaznici koja funkcionira na komprimirani zrak pri sobnoj ili povišenoj temperaturi. Dijeli se na zračno, bezračno i elektrostatsko prskanje. [1,10]

3.3.5.1. Zračno prskanje

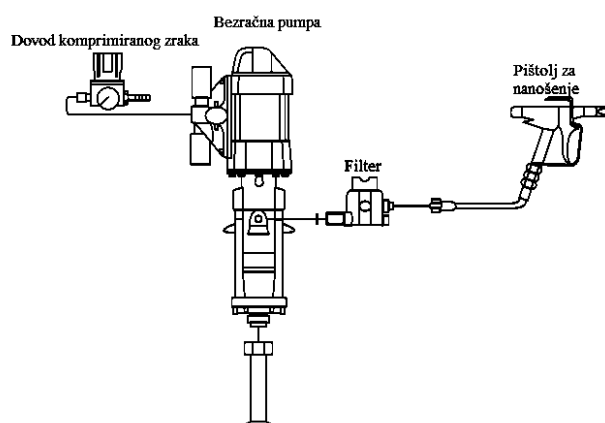
Kod raspršivanja zraka pod niskim pritiskom (0,12-0,5 MPa) u pištolj se dovodi zrak i premaz pomoću podtlaka. Iz mlaznice, premaz se raspršuje u finu maglu usmjerenu pod različitim kutovima u odnosu na materijal. Volumni protok prilagođava se veličinom otvora mlaznice. Premaz koji se dobije nanošenjem ovom metodom je ujednačen i gladak. Nanošenje premaza izvodi se pomicanjem pištolja lijevo-desno-lijevo tako da mlaz bude okomit na podlogu pri čemu bi udaljenost od pištolja do podloge trebala biti od 150 do 200 mm, a širina mlaza 300 mm. Tim načinom gubici su između 20 i 50 %. Glavne prednosti ove metode su: visoka kvaliteta premaza, niska cijena i brza promjena boje. Nedostaci ove metode su nemogućnost dobivanja velikih debljina premaza, nije prikladna za sve vrste boja, problematično je bojanje kutova te je potrebno razrijediti boju razrjeđivačem prije nanošenja što rezultira duljim sušenjem, dobivanjem poroznijeg sloja te postoji opasnost od požara, eksplozije i zagađenja zraka. Zbog toga, potrebno je koristiti kabine za uklanjanje magle kapljica boje pomoću ventilacije i vodene zavjese. Ova metoda karakteristična je za automobilsku industriju. Raspršivači za bezračno prskanje prikazani su na slici 9. [3,10,11]



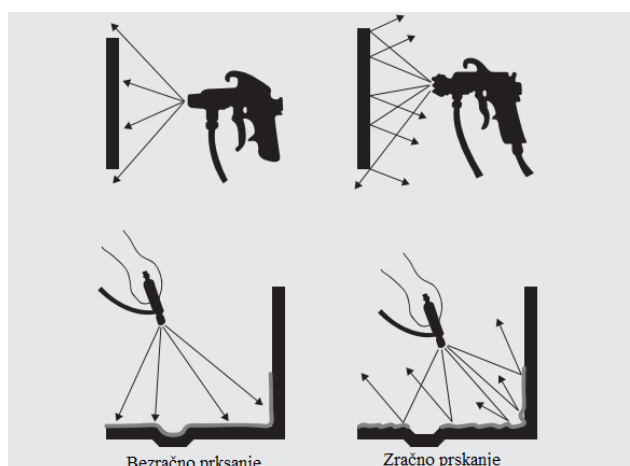
Slika 9. Raspršivači za zračno prskanje [11]

3.3.5.2. Bezračno prskanje

Bezračno raspršivanje je metoda nanošenja premaza koja se temelji na visokotlačnom (1-30 MPa) potiskivanju zraka pri čemu ne dolazi do miješanja premaza sa zrakom, već on izlazi iz mlaznice. Kapljice premaza udaraju velikom brzinom o površinu i slobodno ulaze u kutove i dna površinskih pora pri čemu ne moraju savladati „zračnu blokadu“ u odnosu na zračno prskanje. Volumni protok raspršivanja premaza ovisi o veličini mlaznice i tlaku koji se primjenjuje. Otvori mlaznice kreću se u rasponu 0,23-0,67 mm, a kutovi 10-80°, dok je karakteristična širina prskanja 50-300 mm. Prednosti ove metode su mogućnost primjene za širok spektar premaza, postiže se velika produktivnost te velika debljina suhog filma. Nedostaci su potreba za visokim tlakom, lošiji estetski izgled završne obrade u odnosu na zračno prskanje te nije ekonomično za nanošenje manjih količina. Na slici 10. dan je shematski prikaz opreme za bezračno prskanje, dok je na slici 11. prikazana razlika kvaliteta bezračnog prskanja u odnosu na zračno. [3,10,11]



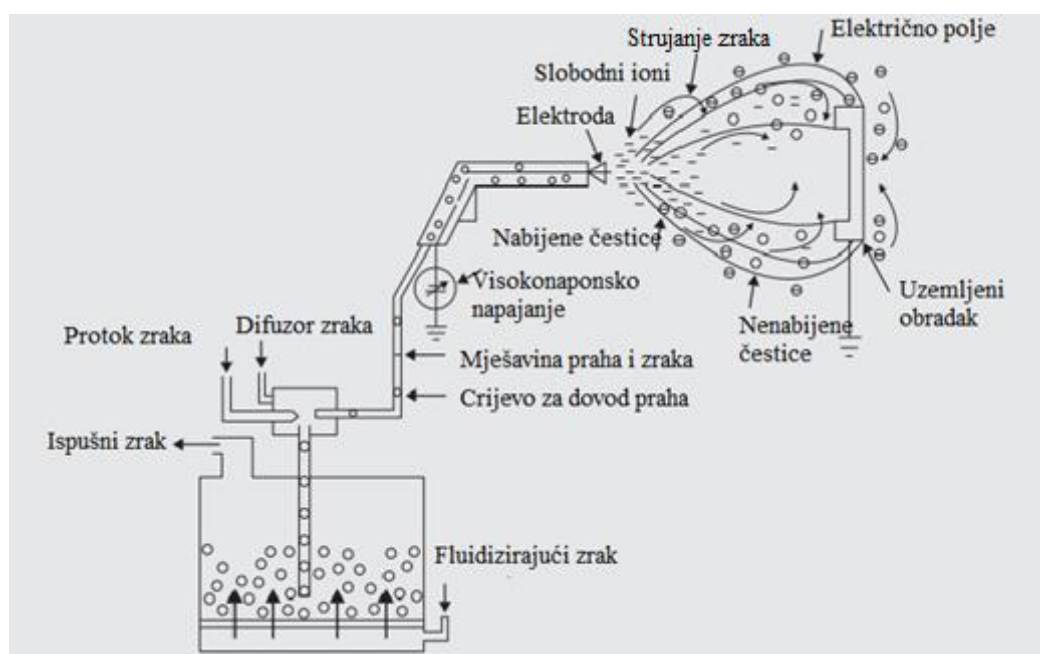
Slika 10. Shematski prikaz opreme za bezračno prskanje [11]



Slika 11. Razlika bezračnog i zračnog prskanja [11]

3.3.5.3. Elektrostatsko prskanje i naprašivanje

Elektrostatsko prskanje je vrsta nanošenja boje kod koje je mlaznica pištolja negativno nabijena, a radni komadi pozitivno nabijeni. Prskanje se može izvesti zračno ili bezračno. Za ovaj je postupak potreban povišeni napon u rasponu od 30 do 150 kV i struje niskog iznosa u rasponu od 100 do 200 μA dobivenih istosmjernim generatorom. Premaz se raspršuje pomoću zraka pod tlakom te postaje električki nabijen i privlači se na površinu radnog komada. Prilikom nanošenja premaza, boja se mora razrijediti što nepovoljno djeluje na radni okoliš. Gubici ovom metodom su mali te se kreću između 5 i 10 %. Zbog stvaranja Faradayevog kaveza nije moguće nanijeti premaz na udubinama. Ovaj postupak pogodan je za nanošenje tekućih i praškastih premaza te se koristi za zaštitu kutova i rubova. Na slici 12. shematski je prikazan visokonaponski raspršivač praha. [3,11]



Slika 12. Shematski prikaz visokonaponskog raspršivača praha [11]

3.3.6. Nanošenje premaza uranjanjem

Uranjanje je metoda nanošenja premaza koja se koristi za serijsku proizvodnju manjih i jednostavnih oblika. Bazeni za uranjanje dimenzioniraju se prema veličini predmeta za premazivanje. Sastoje se od pumpi koje služe protočnost premaza zbog čega ga je potrebno razrijediti. Nakon nanošenja predmet je potrebno ocijediti. Nije pogodno za dvokomponentne premaze. Kod predmeta složenih geometrija nije moguće postići jednoliku debljinu premaza. [3,11]

3.3.7. Nanošenje premaza prelijevanjem

Postupak nanošenja premaza prelijevanjem koristi se za velike rebraste i rešetkaste površine. Ovaj se postupak temelji na razlijevanju premaza niz mlaznice ili proreze, dok se višak skuplja ispod površine na koju se nanosi premaz kako bi se ponovno iskoristio čime su gubici minimizirani. Da bi razlijevanje bilo što bolje, potrebno je razrijediti premaz. Ravnomjernije nanošenje premaza postiže se držanjem predmeta na koji se premaz nanosi u atmosferi zasićenoj razrjeđivačem kako bi se smanjilo njegovo hlapljenje. Primjer prelijevanja premaza na transformatorski kotao dan je slikom 13. [3]



Slika 13. Nanošenje premaza prelijevanjem [3]

3.3.8. Nanošenje premaza elektroforezom

Elektroforeza je metoda nanošenja premaza u vodenim disperzijama ili otopinama lakova i boja. U njima su nabijene čestice veziva i pigmentata koje putuju prema obratku koji je suprotno nabijen. Ovim se postupkom dobivaju jednolični premazi, no on je pogodan samo za temeljne premaze čija se debljina kreće od 20 do 35 μm . Parametri karakteristični za ovaj postupak su napon u rasponu od 50 do 300 V i struja iznosa 0,1-1 A/dm^2 . [3]

3.4. Zaštita na radu

Prilikom rukovanja s kantama za boju, zamješavanja boje i nanošenja premaza treba pravilno koristiti zaštitnu opremu i pridržavati se propisanih mjera. U prostorijama gdje se skladište ili nanose premazi nije dozvoljeno jesti i piti te paliti vatru da ne bi došlo do zapaljenja ili eksplozije. U prostorijama gdje se nanosi premaz mora postojati odsis zraka ili prozračivanje. Prema Pravilniku o uporabi osobnih zaštitnih sredstava iz Zakona u zaštiti o radu, radnici moraju imati sljedeću zaštitnu opremu [12]:

1. Zaštitu za glavu (zaštita lubanje),
2. Zaštita nogu:
 - cipele s neprobojnim potplatima (rad na skelama),
 - cipele bez neprobojnih potplata (rad na metalnim mostovima, konstrukcijama i postrojenjima, spremnicima, rekonstrukcije, održavanje i pogoni za preradu metala),
3. Zaštita očiju i lica,
4. Zaštita organa za disanje,
5. Zaštita sluha,
6. Zaštita tijela i ruku:
 - zaštitna odjeća (štetne kemijske tvari, pjeskarenje, nepovoljni mikroklimatski uvjeti, mogućnost mehaničke ozljede, opasnost od statičkog elektriciteta),
 - zaštitne pregače (rukovanje kemijskim tvarima, izloženost prljavštini),
 - rukavice (rukovanje s predmetima oštih rubova, rad s opasnim kemijskim tvarima),
 - reflektirajuća odjeća (radovi gdje radnici moraju biti jasno vidljivi),
 - sigurnosni pojasevi i užad (rad na skelama),
 - zaštita kože (proizvodnja premaza, rad na otvorenom).

Ako dođe do udisanja kemikalija, treba izaći na svježiji zrak. Ukoliko dođe do teškoća s disanjem ili iritacije respiratornih organa potrebno je potražiti liječničku pomoć. Dođe li do kontakta kemikalije s kožom prvi je korak skidanje kontaminirane odjeće, zatim ispiranje kože blagim sapunom i vodom. U slučaju da je kemikalija unesena kroz usta, nužno je dobro isprati ih vodom te unositi puno tekućine. Ako dođe do pojave simptoma trovanja, potrebno je potražiti liječničku pomoć. U tablici 5. prikazane su opasnosti na radu koje mogu nastupiti i mjere zaštite, dok je na slici 14. prikazano nanošenje premaza s pravilnom zaštitnom opremom. [14]

Tablica 5. Mjere zaštite na radu [12]

DIO TIJELA	UZROK OPASNOSTI	ZAŠTITA
oči	prskanje, čestice premaza, pare, prašina	naočale, viziti, štitnici
disanje	dim, para, prašina, nedostatak kisika	maska s filterom ili dovodom zraka
ruke	kemikalije, ulje, masnoća	nepropusne rukavice, duga odjeća
sluh	buka	prigušivači i čepići
tijelo	kemikalije, premazi, aerosol iz šprice	kombinezon
stopala	proklizavanje, pad predmeta, prskanje kemikalija	čelični štitnici i protuklizni potplati
glava	padajući predmeti, zaštita kose	kacige



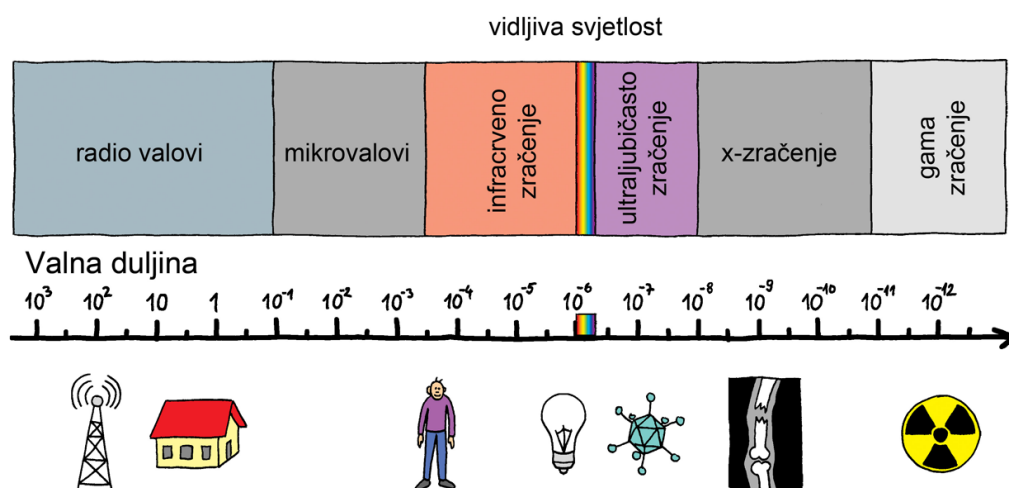
Slika 14. Nanošenje premaza pridržavajući se zaštite na radu, Končar Metalne Konstrukcije

4. SUŠENJE PREMAZA IC ZRAČENJEM

IC zračenje je mehanizam koji se počeo primjenjivati u Drugom svjetskom ratu u svrhu ubrzane prerade metala. Danas ono ima široku primjenu u industriji pa se tako sve više primjenjuje i za ubrzano sušenje premaza. Toplina koju izvor IC zračenja dovodi omogućava sušenje premaza i/ili njegovo otvrdnjavanje reakcijom polimerizacije i umrežavanja. [15]

4.1. Svojstva IC zračenja

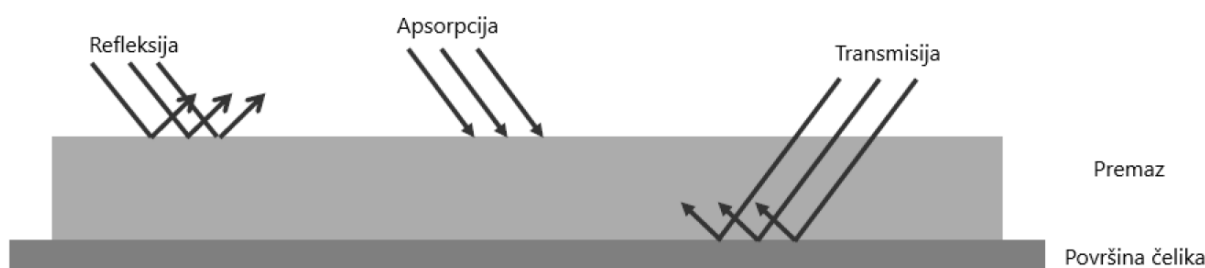
IC zračenje vrsta je radijacije koja je dio elektromagnetskog spektra. Karakteristične su valne duljine od 0,1 do 100 mm. Kao što je vidljivo iz slike 15., IC zračenje nije dio vidljive svjetlosti te ga zbog toga nije moguće vidjeti, no moguće je osjetiti toplinu. Podjela IC zračenja je na blisko, srednje i daleko. Blisko zračenje podrazumijeva valne duljine u rasponu od 780 do 3000 nm, srednje od 3000 do 50 000, a daleko od 50 000 do 1 000 000 nm. [16,17]



Slika 15. Elektromagnetski spektar [16]

4.2. Mehanizam sušenja

Toplinska energija emitirana iz IC emitera direktno se apsorbira na premaz pri čemu može doprijeti do podloge pomoću transmisije. Kako bi se povećala apsorpcija i transmisija, u premaz dodaju se pigmenti. Uz transmisiju i apsorpciju, može se djelomično postići i konvekcijsko zagrijavanje. Zbog toga se postiže brže sušenje premaza. Prikaz IC sušenja dan je slikom 16. Prednost IC sušenja u odnosu na konvekcijsko sušenje jest da kod sušenja infracrvenim zračenjem nije potrebno zagrijavati zrak kako bi toplina osušila premaz već se on direktno zrači. Također, kod primjene IC zračenja, sušenje se odvija dvosmjerno: izvana prema unutra i obratno.



Slika 16. Mehanizam IC sušenja [18]

IC sustavi dijele se prema intenzitetu energije pa tako postoje: visokoenergetski, srednjeenergetski i niskoenergetski. Njihove karakteristike prikazane su u tablici 6.

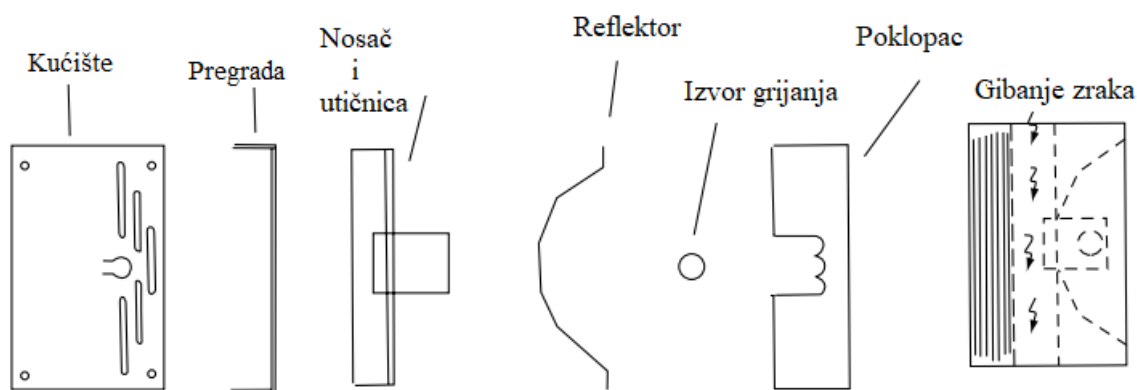
Tablica 6. Karakteristike sustava s obzirom na intenzitet energije [18]

INTENZITET	KARAKTERISTIKE
visokotenergetski	energija se prenosi kroz premaz, apsorbira ju podloga, prikladno za složene oblike, najveća brzina zagrijavanja
srednjeenergetski	najčešće se koristi za stvrđivanje premaza jer on izravno apsorbira energiju, prikladno za jednostavne i simetrične dijelove
niskoenergetski	ne primjenjuje se zbog toga što se velik dio energije gubi na grijanje, dio se apsorbira na površini što može uzrokovati formiranje „kožice“ ili drugih oštećenja

Parametri o kojima ovisi sušenje premaza su: kut pod kojim se emitiraju zrake, udaljenost emitera i premaza, vrsta spektra zračenja, vrsta i količina pigmenta koja se nalazi u premazu, čvrstoća prevlake, toplinska vodljivost i debljina predmeta koji je izložen IC zračenju.

4.3. Vrste uređaja

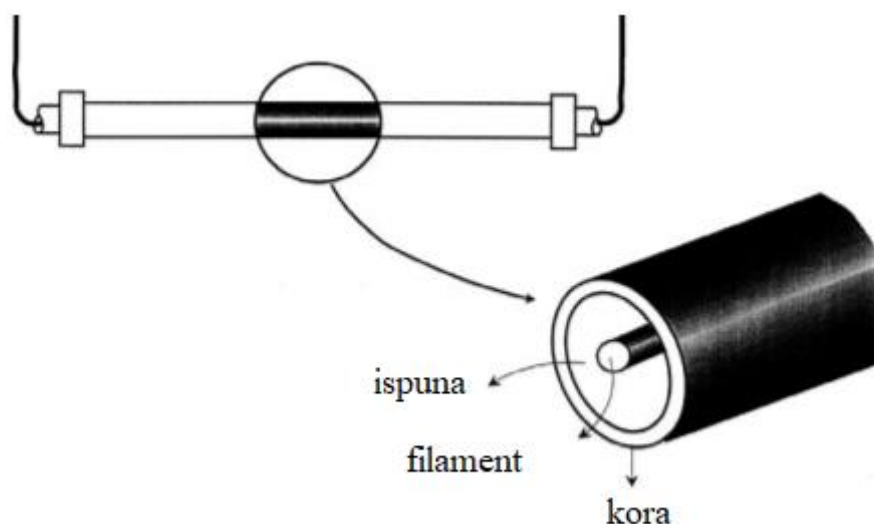
Uređaji za emitiranje IC zračenja sastavljeni su od emitera koji je ujedno i izvor topline, reflektora koji reflektira zračenje, priključaka te kućišta. Dijelovi uređaja prikazani su na slici 17. Podjela uređaja vrši se prema vrsti emitera: električki i plinski. [19]



Slika 17. Dijelovi uređaja za infracrveno sušenje [19]

4.3.1. Električni izvor

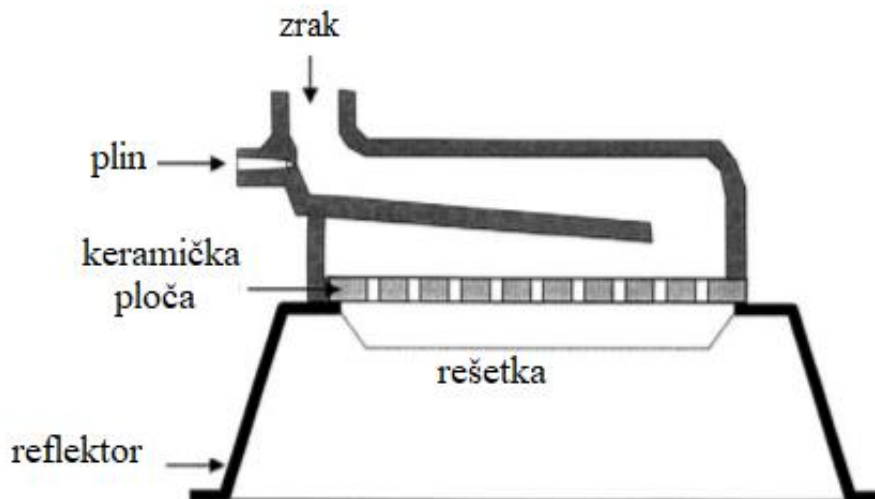
Uređaji na električni izvor rade tako da se propuštanjem električne struje kroz otpor povisuje temperatura. Za to se koriste kvarcne cijevi ili lampe, a nit je uobičajeno napravljena od volframa. Učinkovitost zračenja ovim izvorom može se definirati kao omjer emitiranog zračenja u odnosu na unesenu energiju. Postotak pretvaranja električne energije u IC zračenje je između 40 i 50 %, dok ostatak otpada na konvekcijsko zagrijavanje. Za fokusiranje energije često se koristi i reflektor, a kućište emitera može poslužiti kao sekundarni reflektor. Prikaz električnog uređaja dan je na slici 18. [18,19]



Slika 18. Električni izvor za IC sušenje [19]

4.3.2. Plinski izvor

Rad plinskog emitera (slika 19.) temelji se na miješanju zraka i plinova što rezultira povišenje temperature ploče za emitiranje zračenja. Postoje i sustavi koji ne stvaraju plamen, već katalitički oksidiraju gorivo egzotermnom reakcijom kojom nastaje energija. Plinski emiter ima bolju učinkovitost u odnosu na električni te iznosi 60 %. [18,19]



Slika 19. Plinski izvor za IC sušenje [19]

4.4. Prednosti i nedostaci

Sušenje premaza IC zračenjem pokazuje mnoge prednosti u odnosu na konvencionalne postupke sušenja, no ono ima i neke mane što je vidljivo iz tablice 7.

Tablica 7. Prednosti i nedostaci IC sušenja [18,20,21]

PREDNOSTI	NEDOSTACI
otvrdnjavanje premaza izvana prema unutra i obratno	problem sušenja složenih dijelova i udubina
ubrzano sušenje	nusprodukti izgaranja
manje prostora	povišeni operativni i investicijski troškovi
podesivi uređaji/parametri	zahtjevno odvođenje toplote
niža emisija ugljika	potreba za prilagodbom parametra za svaki premaz
manje toplote u radnoj okolini	

4.5. Razvoj i primjena u industriji

Primjena IC sušenja praktična je za sušenje dvodimenzionalnih dijelova poput čeličnih pločica, ploča za prekidače i simetrične trodimenzionalne dijelove poput filtera za ulje i cijevi. Prvu veću primjenu IC sušenje premaza pronašlo je u automobilskoj industriji (slika 20.), dok se danas sve više koriste u energetske i metalnoj industriji te brodogradnji.



Slika 20. Primjena infracrvenog sušenja u automobilskoj industriji [22]

5. VAŽNOST KOROZIJSKIH ISPITIVANJA

Atmosferska je korozija najrašireniji oblik korozije koji nastaje kao posljedica izlaganja materijala zraku i njegovim zagađivačima. Najznačajniji faktori koji utječu na nastanak atmosferske korozije su kisik i vlaga. Ako dolazi do izostanka jednog od ta dva faktora ne dolazi do korozije. U suhom zraku (ispod ledišta vode ili kod relativne vlažnosti manje od 60 %) ne dolazi do hrđanja ugljičnog čelika. Primjer toga je postojanost Kutub-stupa (slika 21.) od kovanog željeza koji je više od 1700 godina izložen atmosferskim uvjetima, a nije korodirao. [1,23]

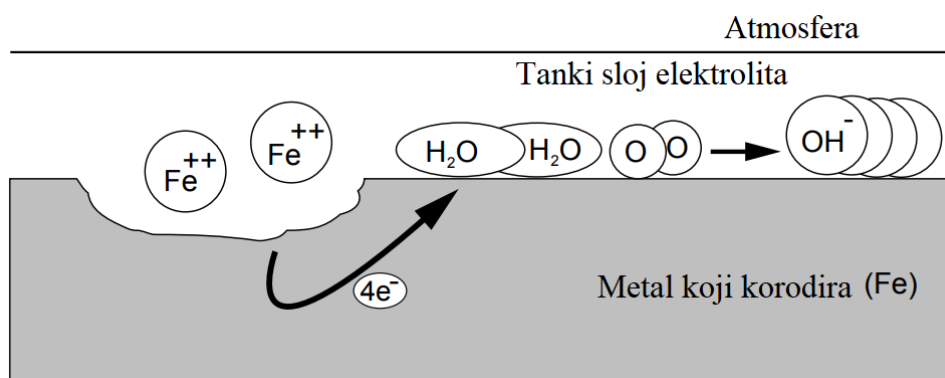
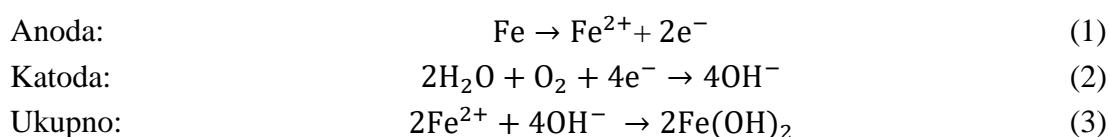


Slika 21. Kutub-stup [24]

Atmosferska korozija ovisi o uvjetima u okruženju. Karakteristična je podjela na:

- ruralno: najmanje korozivna atmosfera koja ne sadrži kemijske zagađivače, ali sadrži organske i anorganske čestice pri čemu su glavni uzroci korozije vlaga, kisik i CO_2 ,
- urbano: umjereno korozivna atmosfera kod koje su dodatni zagađivači SO_x i NO_x iz industrije, emisija motornih vozila i domaćinstva,
- industrijsko: povezano je s teškim industrijskim procesnim postrojenjima gdje je povećana koncentracija sumpornog dioksida, klorida, fosfata i nitrata,
- morsko: čestice klorida nanošene vjetrom pri čemu korozivnost ovisi o smjeru i brzini vjetra te udaljenosti od obale. [23]

Mehanizam atmosferske korozije temelji se na principu elektrokemijske korozije kod koje je nužan uvjet prisutnost elektrolita. Sloj elektrolita stvara se na površini već pri kritičnoj razini vlage u zraku. Proces korozije odvija se kod istovremenih reakcija oksidacije i redukcije. Na anodi se odvija oksidacija metala što ima za posljedicu otapanja metala, dok se na katodi odvija redukcija kisika. Prikaz mehanizma korozije dan je na primjeru korozije željeza jednadžbama 1,2 i 3 te slikom 22. [1,3]

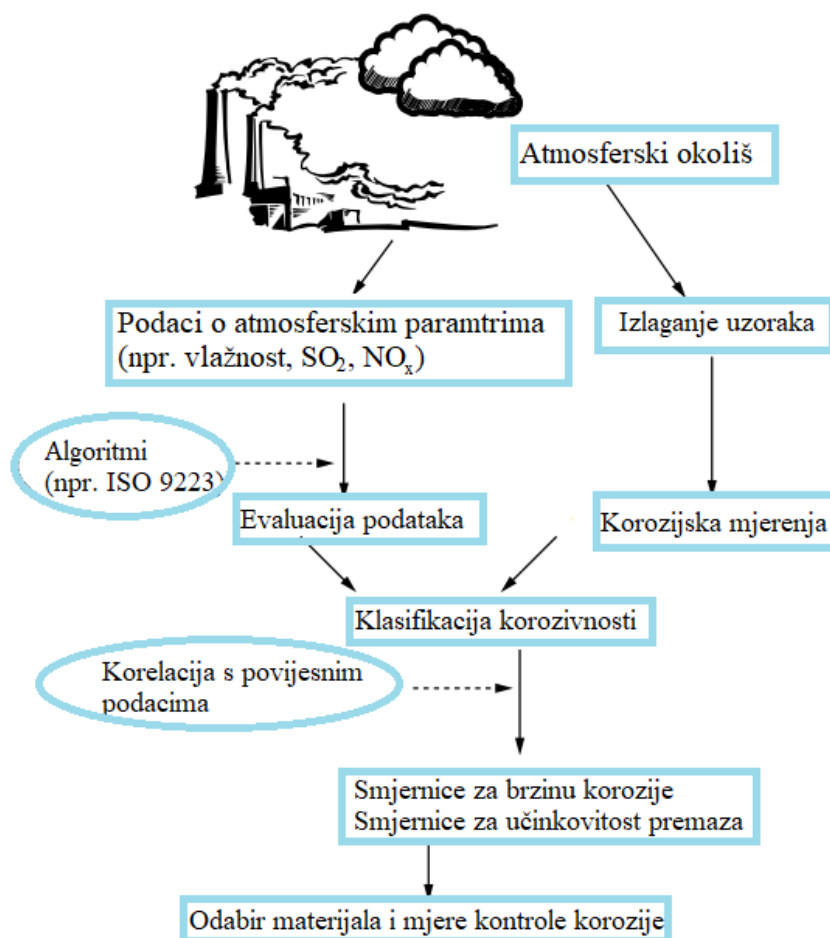


Slika 22. Shema atmosferske korozije [23]

Mnogi faktori utječu na brzinu atmosferske korozije. Jedan od ključnih je prisutnost vode, odnosno vlage u zraku. Kiša može dvojako djelovati – djelotvorno kao sredstvo ispiranja ili razrjeđivanja korozivnih medija, dok s druge strane ona osigurava elektrolit za odvijanje reakcije korozije. Sumporni dioksid kao produkt izgaranja fosilnih goriva nalazi se u povećanim koncentracijama u urbanim i industrijskim atmosferama. On se adsorbira na metalnim površinama, ima visoku topljivost u vodi pri čemu nastaje sumporna kiselina, a time se ubrzava sam proces korozije. Osim sulfida, na proces korozije negativno utječu i kloridi koji su tipični za morske atmosfere. Također manji, ali nezanemariv utjecaj imaju i spojevi NO_x te ozon. Utjecaj temperature na atmosfersku koroziju je složen. Porastom temperature dolazi do porasta brzine elektrokemijske reakcije kod stalne razine vlažnosti, no povećanjem temperature dolazi do smanjenja relativne vlažnosti i bržeg isparavanja elektrolita s površine čime se posljedično smanjuje brzina korozije. [23]

5.1. Klasifikacija korozivnih uvjeta

Klasifikacija korozivnih uvjeta vrlo je važna za pravilan odabir materijala i mjera zaštite od korozije kako bi se osigurao projektirani vijek trajanja. Pomoću određenih parametara moguće je odrediti odnos brzine atmosferske korozije i dominantnih parametara koji utječu na nju. Shematski prikaz dva fundamentalna pristupa određivanja parametara dan je na slici 23. [23]



Slika 23. Dva temeljna pristupa klasifikacije atmosferske korozije [23]

Određivanje korozivnosti okoliša na temelju mjerenja brzine korozije izvodi se tako da se uzorci izlože atmosferi tijekom jedne godine. Norma HRN EN ISO 9223:2012 preporuča da se ispitivanje započne tijekom proljeća ili jeseni, no ako se mjeri u području klime kod koje dolazi do izraženih sezonskih razlika, mjerenje se započinje u najagresivnijem razdoblju. Kategorije korozivnosti s primjerima tipičnog okruženja u umjerenj klimi prikazani su u tablici 8. [25]

Tablica 8. Kategorije atmosferske korozivnosti okoliša i primjeri tipičnog okoliša [25,26]

Kategorija	Korozivnost	Primjer okruženja	
		Vanjsko	Unutarnje
C1	jako mala	-	grijane građevine s neutralnom atmosferom (uredi, trgovine, škole, hoteli)
C2	mala	okruženja s manjim zagađenjem (sela)	negrijane građevine (garaže, sportske dvorane)
C3	srednja	gradska i industrijska okruženja, srednje zagađenje sumporovim dioksidom, obalna područja s malim salinitetom	proizvodne prostorije s velikom količinom vlage i malim zagađenjem zraka, pogoni za proizvodnju hrane, pivovare, praonice rublja
C4	visoka	industrijska i obalna područja sa srednjim salinitetom	kemijski pogoni, bazeni, pristaništa brodova i čamaca
C5	jako visoka	industrijska područja s visokom količinom vlage i agresivnom atmosferom, obalna područja s visokim salinitetom	objekti ili okruženja s konstantnom kondenzacijom i velikim zagađenjem
CX	ekstremna	<i>offshore</i> područja s visokom salinitetom i industrijske zone sa ekstremnom količinom vlage i agresivne atmosfere, subtropske i tropske atmosfere	industrijska područja sa ekstremnom količinom vlage i agresivnom atmosferom

Numeričke vrijednosti brzine korozije tijekom prve godine za različite materijale i korozijske atmosfere dane su u tablici 9.

Tablica 9. Brzina korozije za pojedine materijale u određenoj kategoriji [25,26]

Kategorija	Gubitak mase po jedinici površine (g/m ²)/gubitak debljine (μm)							
	Niskouglični čelik		Cink		Bakar		Aluminij	
	g/m ²	μm	g/m ²	μm	g/m ²	μm	g/m ²	μm
C1	≤ 10	≤ 10	≤ 0,7	≤ 0,1	≤ 0,9	≤ 0,1	-	-
C2	10-200	1,3-25	0,7-5	0,1-0,7	0,9-5	0,1-0,6	≤ 0,6	-
C3	200-400	25-50	5-15	0,7-2,1	5-12	0,6-1,3	0,6-2	-
C4	400-650	50-80	15-30	2,1-4,2	12-25	1,3-2,8	2-5	-
C5	650-1500	80-200	30-60	4,2-8,4	25-50	2,8-5,6	5-10	-
CX	1500-5500	200-700	60-180	8,4-25	50-90	5,6-10	>10	-

U tablici 10. prikazane su funkcije u ovisnosti taloženja SO₂, klorida, temperature i relativne vlažnosti, dok je u tablici 11. prikazan opis oznaka. Te su funkcije modelirane na temelju podataka prikupljenih na korozivskim stanicama diljem svijeta.

Tablica 10. Funkcije brzina korozije [25]

Materijal	Funkcija (r_{corr})	f za $T \leq 10$ °C	f za $T > 10$ °C
Uglični čelik	$1,77p_d^{0,52} e^{0,020 RH+f_{st}} + 0,102s_d^{0,62} e^{0,033 RH+0,040 T}$	$0,15(T-10)$	$-0,054(T-10)$
Cink	$0,0129p_d^{0,44} e^{0,046 RH+f_{zn}} + 0,0175s_d^{0,57} e^{0,008 RH+0,085 T}$	$0,038(T-10)$	$-0,054(T-10)$
Bakar	$0,0053p_d^{0,26} e^{0,059 RH+f_{cu}} + 0,01025s_d^{0,27} e^{0,036 RH+0,049 T}$	$0,126(T-10)$	$-0,080(T-10)$
Aluminij	$0,0042p_d^{0,73} e^{0,025 RH+f_{Al}} + 0,0018s_d^{0,60} e^{0,020 RH+0,094 T}$	$0,009(T-10)$	$-0,043(T-10)$

Tablica 11. Opis oznaka [25]

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
p_d	mg/m ² d	prosječna godišnja količina taloženja SO ₂
r_{corr}	μm/god	brzina korozije u prvoj godini
RH	%	prosječna godišnja relativna vlažnost
s_d	mg/m ² d	prosječna godišnja količina taloženja klorida
T	°C	prosječna godišnja temperatura

5.2. Odabir sustava premaza

Preporučene vrste i broj premaza u sustavu te debljina suhog filma za kategorije C2-C5 za ugljični i vruće pocinčani čelik prikazani su u normi HRN EN ISO 12944-5, dok se za CX nalazi u HRN EN ISO 12944-9. Konstrukcije koje se nalaze u atmosferi koja je okarakterizirana kao C1 nije potrebno štititi prevlakama. U tablici 12. prikazan je eksploatacijski vijek sustava premaza koji je definiran prema normi HRN EN ISO 12944-1:2018. [27]

Tablica 12. Propisani eksploatacijski vijek sustava premaza [28]

Kratica	Trajnost	Projektirani vijek
L	Kratkotrajni	< 7 godina
M	Srednjetrojajni	7 – 15 godina
H	Dugotrajni	15 – 25 godina
VH	Vrlo dugotrajni	> 25 godina

5.3. Korozijska ispitivanja

Pouzdanost zaštite od korozije ostvaruje se praćenjem rezultata ispitivanja koja prate postupke zaštite od faze projektiranja do održavanja zaštićenog objekta:

- prije nanošenja premaza potrebno je provjeriti kvalitetu pripremljene površine usporedbom sa fotografijama iz norme HRN EN ISO 8501-1:2007,
- pri nanošenju boje nužno je mjeriti temperaturu podloge, rosišta i zraka te relativnu vlažnost pri čemu vlažnost mora biti manja od 85 %, a temperatura podloge mora biti minimalno 3 °C iznad točke rosišta,
- konstrukcije na koje je nanesen premaz potrebno je ispitati na koroziju i druge vrste oštećivanja (kod takvih se ispitivanja prate promjene u sustavima materijal/medij, odnosno rezultati procesa oštećivanja tijekom izlaganja agresivnim uvjetima). [23]

Korozijska se ispitivanja dijele na laboratorijska, terenska i eksploatacijska, a njihova usporedba dana je u tablici 13. [23]

Tablica 13. Usporedba karakteristika pojedinih vrsta ispitivanja [29]

Vrsta ispitivanja	Pouzdanost	Cijena	Zapažanja
Laboratorijska	niska; mogućnost dobre usporedbe podataka	niska	dobro za preliminarnе rezultate, zahtjevno reproduciranje preciznih korozijskih procesa, kratko izlaganje, brzina korozije mora se ekstrapolirati
Eksploatacijska	visoka	visoka	visoki troškovi zbog zaustavljanja procesa, prate se realni uvjeti, dugotrajno izlaganje
Terenska	relativno visoka	niska	dugotrajno izlaganje, mogućnost ispitivanja više uzoraka istovremeno, uzorci moraju biti izolirani da bi se spriječio kontakt

5.3.1. Eksploatacijska korozijska ispitivanja

Eksploatacijska ispitivanja provode se u slučajevima kada je moguće promatrati neki proizvodni proces tijekom rada u svrhu odabira što boljeg materijala ili proučavanja korozijskog ponašanja postojećih materijala u uvjetima rada. Za učinkovitije ispitivanje kombinira se primjena laboratorijskih i eksploatacijskih ispitivanja pri čemu se prvo laboratorijskim ispitivanjem definiraju materijali koji ne zadovoljavaju primjenu, dok se oni koji pokazuju prihvatljivo ponašanje ispituju u realnom okruženju. Nažalost, ovakva se ispitivanja provode u vrlo maloj mjeri zbog zaustavljanja normalnog rada, dugotrajnosti te financijskih gubitaka koje prouzrokuje privremeno zaustavljanje proizvodnog procesa. [5]

5.3.2. Terenska korozijska ispitivanja

Terenska ispitivanja vrsta su dugotrajnih ispitivanja kod kojih se veći broj uzoraka izlaže atmosferskim uvjetima postavljenim na postolja na jednoj ili nekoliko geografskih lokacija. Postolja na kojima se nalazi uzorci najčešće su izvedena pod standardnim kutom od 5°, 45° ili 90° u odnosu na referentni horizontalni kut. Kut treba biti što bliži položaju u kojem će se materijal upotrebljavati. Kod ispitivanja atmosferske korozije i korozije u tlu često je potrebno nekoliko godina da se dobiju konačni rezultati zbog vrlo sporog procesa korozijskog napada. [5,23,29]

Osnovni parametar uzoraka koji se mjeri ovim načinom ispitivanja je promjena mase uzorka. Također, radi se i vizualna kontrola uzoraka te se radi usporedba prije i nakon izlaganja. Ako se radi o premazima, tada se promatra mjehuranje, hrđanje, pucanje i ljuštenje prema normama HR EN ISO 4628-2 do 5. Na slici 24. prikazana je korozijska stanica Laboratorija za zaštitu materijala koja se nalazi u mjestu Kaštel Sućurac. [5,23,29]



Slika 24. Korozijska stanica u Kaštel Sućurcu

5.3.3. Laboratorijska korozijska ispitivanja

Laboratorijska se ispitivanja provode kontinuiranim izlaganjem uzoraka u mediju. Mogu biti statička ili dinamička ako se provodi relativno gibanje između medija i uzoraka. Takva su ispitivanja ubrzana, tj. provode se u agresivnijim uvjetima od onih koji se očekuju u stvarnosti. To se postiže promjenom temperature, sastava medija i brzine gibanje. Atmosferska se korozija u laboratorijima ispituje u komorama u kojima se postiže određena temperatura i vlažnost okoline, a mogu se dodati i korozivne tvari (npr. SO_2 ili kapljice otopine NaCl), a ponekad i ponašanje sunčevog svjetla. U komorama se u pravilu obavljaju ciklička ispitivanja s promjenama okoline u svrhu oponašanja tipičnih dnevnih promjena. Najvažnija ispitna komora je slana komora koja na uzorke raspršuje maglu otopine NaCl simulirajući morsku atmosferu. Trajanje takvog ispitivanja ovisi o vrsti premaza koji se ispituje za određeni okoliš pri čemu veća trajnost premaza u satima ispitivanja bez pojave korozije daje dugotrajniju mogućnost primjene u okolišu veće korozivnosti. Norma koja propisuje vrijeme ispitivanja za okoliš C2-C5 je HRN EN ISO 12944-6, dok je za CX atmosferu HRN EN ISO 12944-9. Da bi uzorci zadovoljili postojanost u određenoj kategoriji korozivnosti ne smije doći do promjene izgleda, grešaka i korozije. Osim slane komore, primjenjuju se i vlažna komora te klima komora pomoću koje se mogu simulirati temperaturne oscilacije te promjene vlažnosti zraka. Osim korozijskih ispitivanja, provode se i mehanička ispitivanja materijala poput ispitivanja prionjivosti prevlaka metodom zarezivanja ili *pull-off* metodom, otpornost na udar te mjerenje tvrdoće premaza. [3]

6. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni dio rada napravljen je u dva dijela. Prvi je dio bio proveden u tvrtki Končar – Metalne konstrukcije gdje su nanošeni i sušeni premazi. Dio premaza sušen je na zraku, dok je dio bio sušen u kabini pomoću IC zraka. Drugi dio eksperimentalnog rada sastajao se od korozijskih i mehaničkih ispitivanja premaza koja su provedena u Laboratoriju za zaštitu materijala na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

6.1. Provedba ispitivanja

Ispitivanje je provedeno na dva različita sustava premaza. Prvi sustav načinjen je od jednog sloja epoksidnog premaza i jednog sloja poliuretana, dok drugi sustav čine epoksidni premaz kao temelj, epoksid s cinkom fosfatom kao međusloj te poliuretan kao završni sloj.

Karakteristika prvog temelja je da je to brzosušeci epoksidni premaz, postojan do kategorije CX. Ima dobru otpornost na pucanje i općenito dobra mehanička svojstva, nisku razinu VOC-a, crvene je boje i polusjajan. Priprema površine mora biti minimalno Sa 2,5 te profil hrapavosti srednji (G). Završni premaz je poliuretan visokog sjaja, sive boje, koji sadrži cink fosfate. Predviđen je za primjenu u korozivnim okolišima C2 i C3. Karakteristike premaza su dobra otpornost na atmosferilije te odlična mehanička svojstva. [30,31]

Temeljni premaz drugog sustava je brzosušeci epoksid bijele boje. Glavna primjena ovog premaza je unutarnja i vanjska zaštita transformatora zbog otpornosti na prirodna i sintetička transformatorska ulja. Površina na koju se premaz nanosi mora biti abrazivno pjeskarena do stupnja čistoće Sa 2,5 – Sa 3 te hrapavosti srednjeg stupnja (G). Zbog dodatka pigmenta cink fosfata i titan dioksida, premaz je otporan na atmosferske i kemijske uvjete. Međusloj također čini epoksidni premaz s pigmentima željezova oksida sive boje koji se koristi za jako korozivne uvjete poput *off-shore* postrojenja, kemijska postrojenja i transformatorskih stanica. Završni premaz je PUR sive boje koji se ističe prema dobroj otpornosti na svjetlo i atmosferske uvjete. U tablici 14. prikazane su oznake premaza s obzirom na način sušenja. [32, 33, 34]

Tablica 14. Oznake premaza

	Sustav 1 EP-PUR	Sustav 2 EP-EP-PUR
IC sušenje	A	C
Sušenje na zraku	B	D

6.1.1. Nanošenje i sušenje premaza

Prije nanošenja premaza pločice provjereni su mikroklimatski parametri sukladno normi HRN EN ISO 8501-4, priprema površine prema HRN EN ISO 8501-1 te hrapavost površine (slika 25.) koja je iznosila $R_z = 55 \mu\text{m}$.



Slika 25. Mjerenje hrapavosti površine

Premazi su volumno zamiješani (slika 26. i 27.) prema uputama proizvođača te su nanoseni pomoću metalne žlice (slika 28.) i spiralnih aplikatora (slika 29.) na čelične pločice debljina prikazanih u tablici 15.

Tablica 15. Debljine pločica [mm]

	A	B	C	D
8 pločica	4	2	4	2
1 pločica	0,8	0,8	0,8	0,8



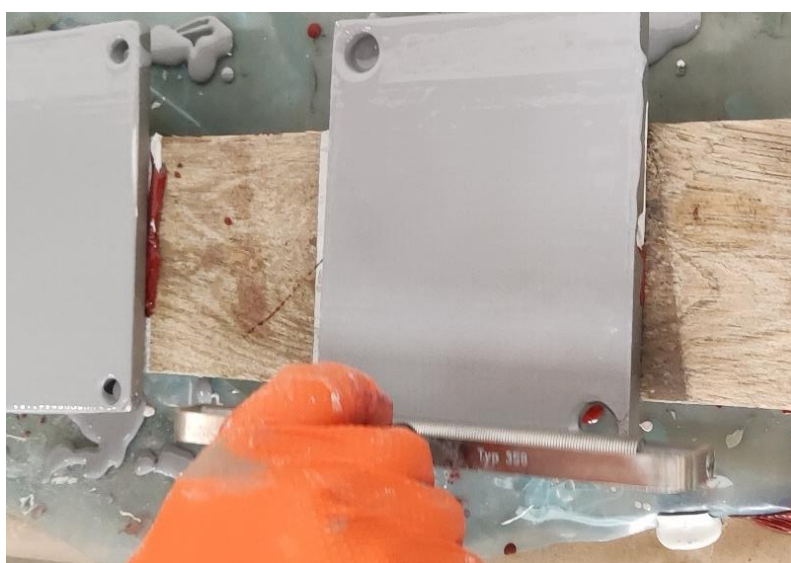
Slika 26. Dodavanje kontakta



Slika 27. Zamješavanje



Slika 28. Nanošenje premaza na podlogu pomoću žlice



Slika 29. Premazivanje podloge aplikatorom

Premazi sušeni na zraku (B, D) odloženi su na paletu, dok su uzorci sušeni IC zračenjem (A, C) 30 min umrežavali na zraku kako bi se spriječilo curenje premaza zbog vertikalnog položaja uzoraka kod sušenja. IC paneli postavljeni su na udaljenost od 60 cm od ispitnih pločica. Završetak sušenja premaza smatra se kada ne ostaje trag olovke koja se povuče po premazu. Također se mjeri i temperatura premaza jer ne smije prijeći 120 °C prema uputama proizvođača. Na slici 30. prikazano je sušenje u IC kabini, dok je u tablici 16. prikazano vrijeme sušenja premaza, a u tablici 17. temperature koje su ti premazi postigli. Na slikama 31., 32., 33. i 34. prikazani su osušeni premazi.



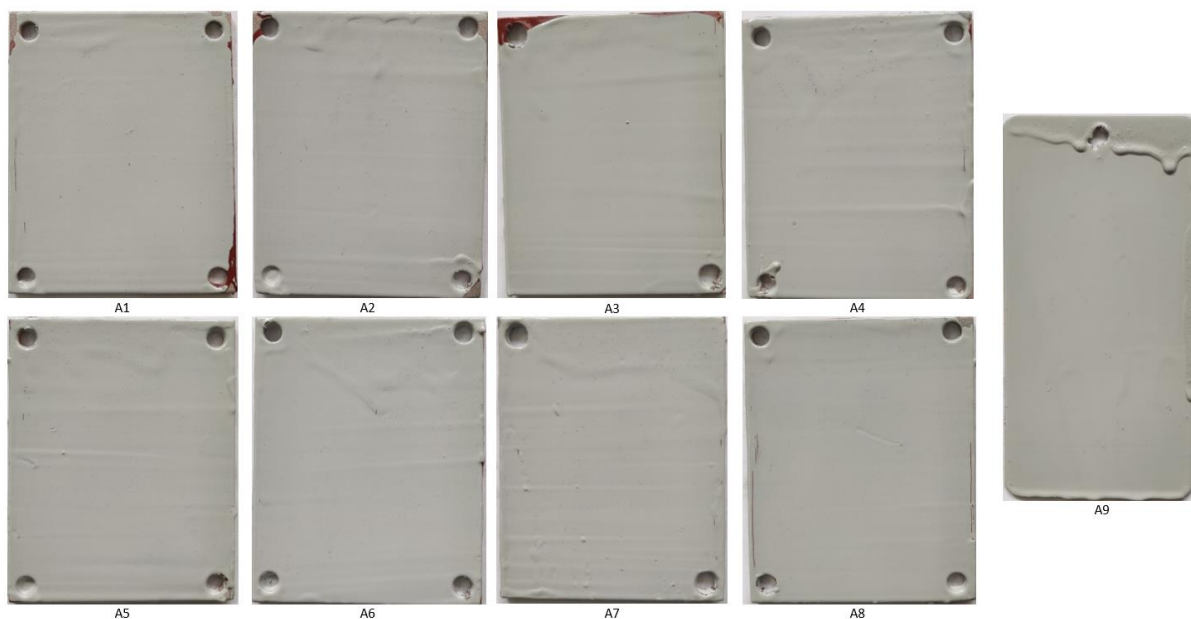
Slika 30. IC sušenje uzoraka, prototip kabine za IC sušenje premaza u tvrtki Končar – Metalne Konstrukcije

Tablica 16. Vrijeme sušenja premaza [min]

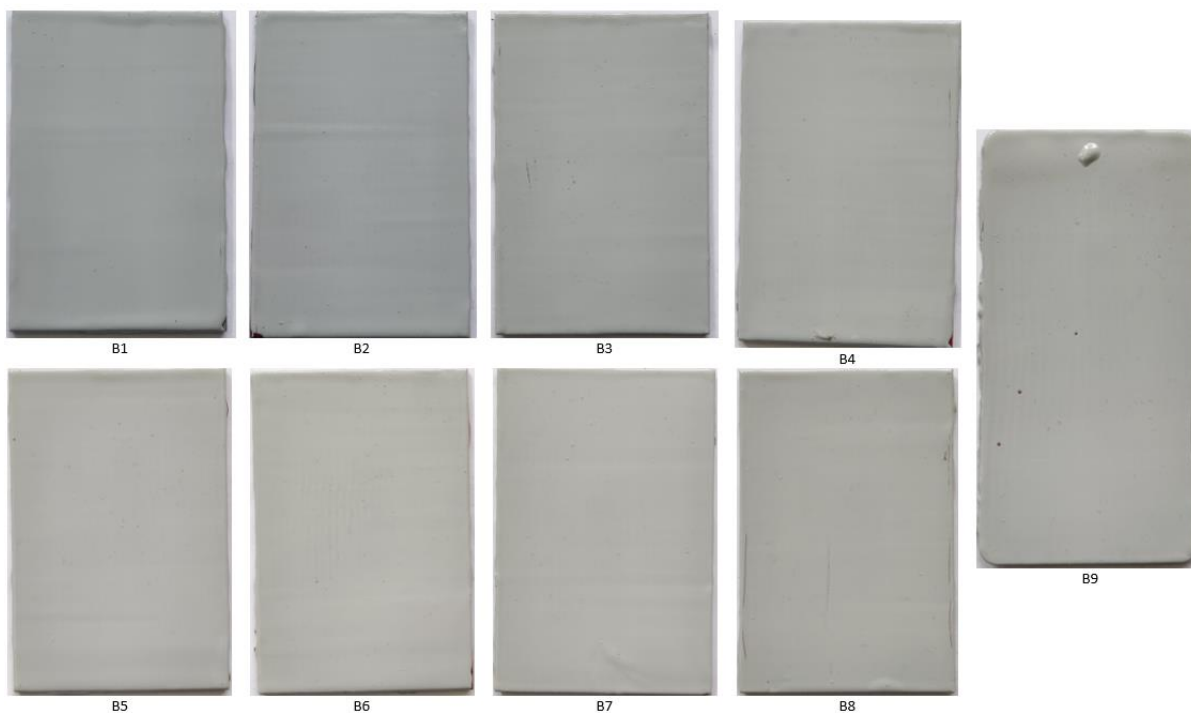
Broj uzorka	A		C		
	Temelj	Završni	Temelj	Međusloj	Završni
1	12,5	8	10	16	9
2	11	12	12	16	9
3	11	8	12	10	9
4	11	8	12	16	9
5	11	8	12	10	9
6	11	8	12	10	9
7	15	12	12	16	14
8	11	12	12	16	14
9	7,5	8	9	10	9

Tablica 17. Postignute temperature premaza prikazane [°C]

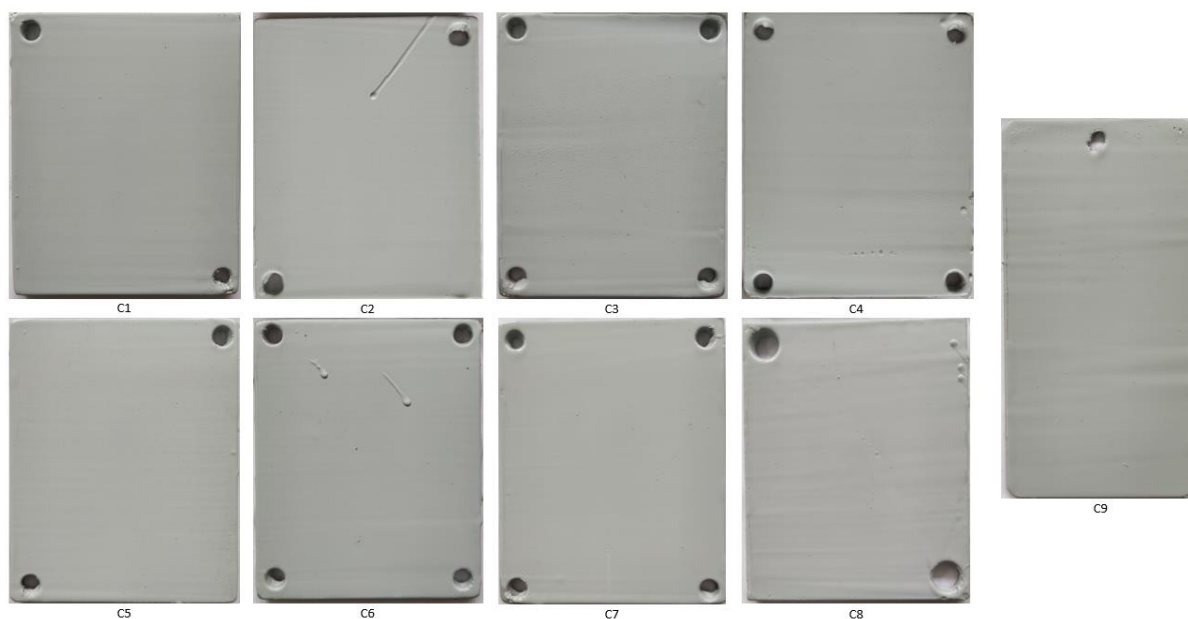
Broj uzorka	A		C		
	Temelj	Završni	Temelj	Međusloj	Završni
1	109	101	101	110	93
2	105	88	106	94	70
3	93	99	96	98	89
4	110	91	98	104	88
5	92	93	84	104	96
6	107	90	92	105	77
7	94	85	81	80	70
8	90	74	80	77	68
9	119	107	100	104	106



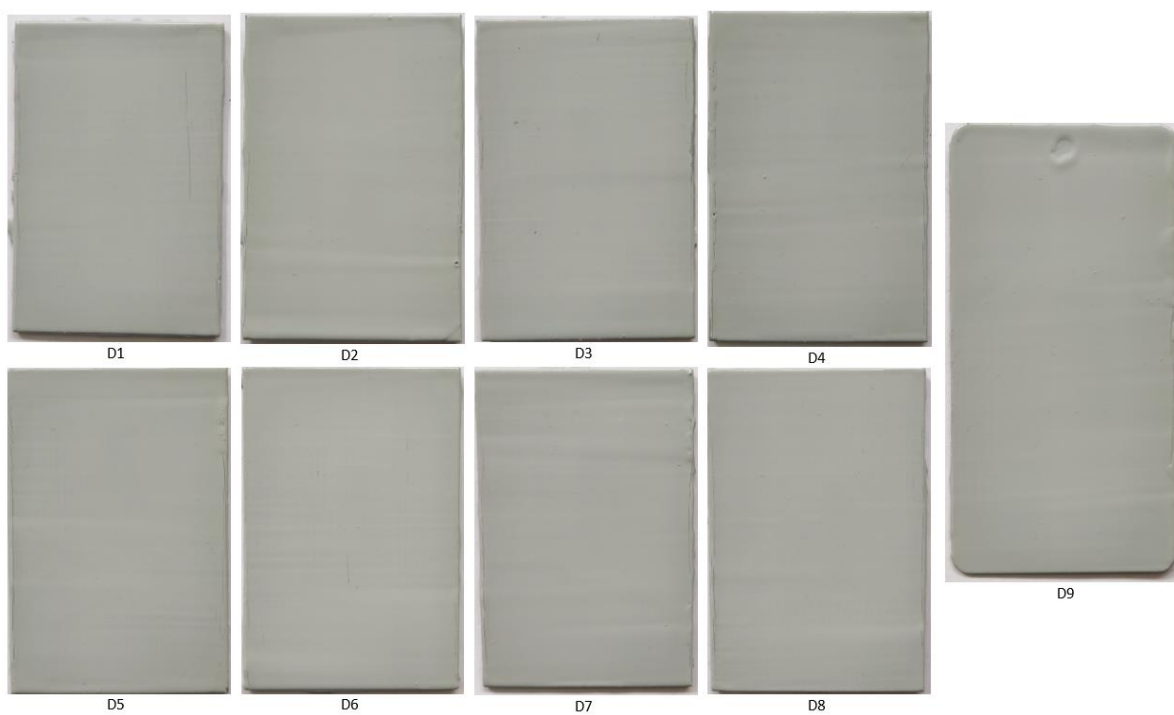
Slika 31. Uzorci A (EP-PUR)



Slika 32. Uzorci B (EP-PUR)



Slika 33. Uzorci C (EP-EP-PUR)



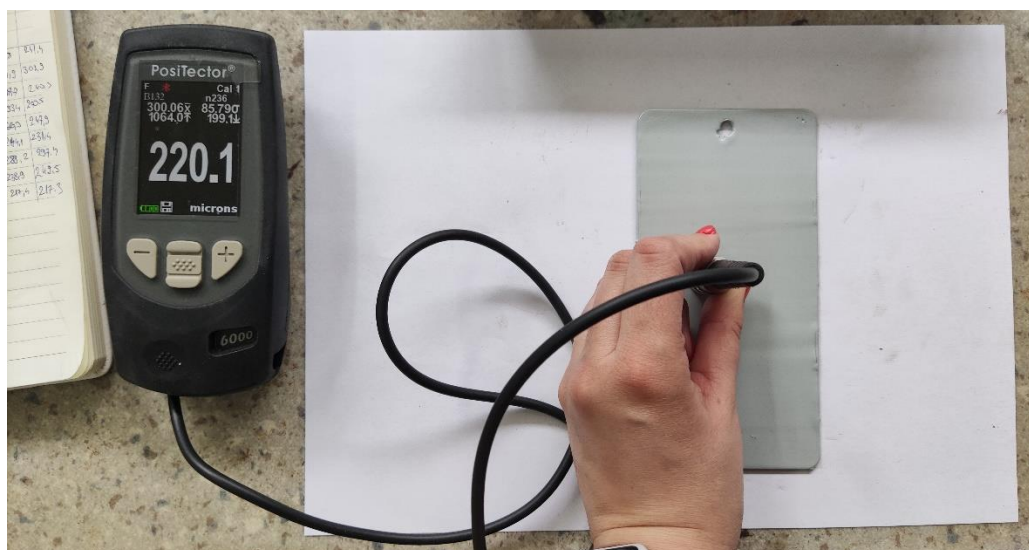
Slika 34. Uzorci D (EP-EP-PUR)

6.1.2. Debljina suhog filma

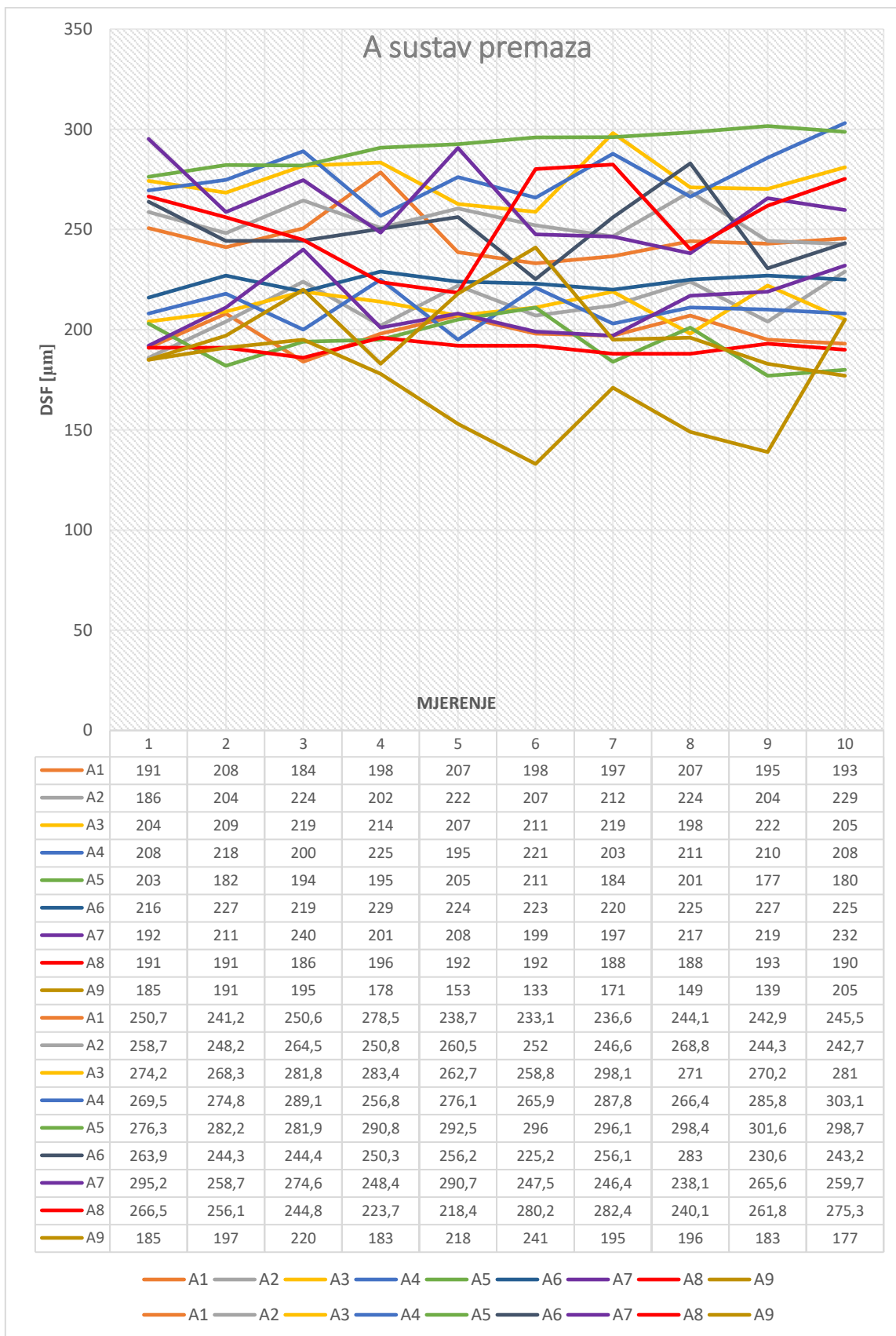
Mjerenje debljine suhog filma provedeno je nakon sušenja svakog pojedinog sloja. Na slikama 35. i 36. prikazano je mjerenje DSF. Mjerenje se temelji na nerazornoj metodi koja radi na principu magnetizma na način da prikazuje udaljenost koja je obrnuto proporcionalna privlačnim silama između permanentnog magneta i magnetične podloge. Na slikama 37., 38., 39. i 40. grafički su prikazane debljine premaza s izmjerenim vrijednostima, dok su u tablicama 18. i 19. prikazane prosječne debljine. [3]



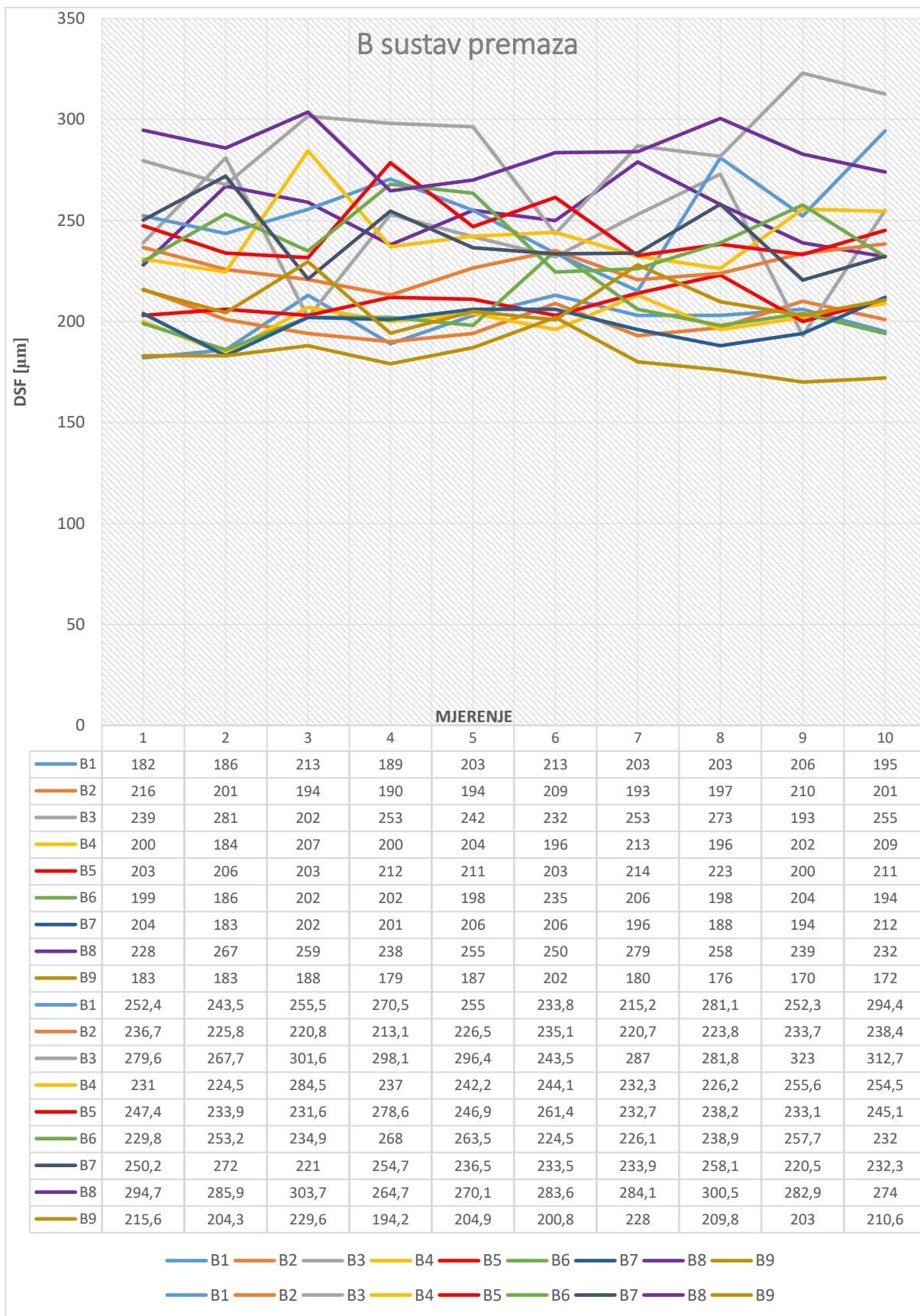
Slika 35. Mjerenje DSF temeljnog premaza



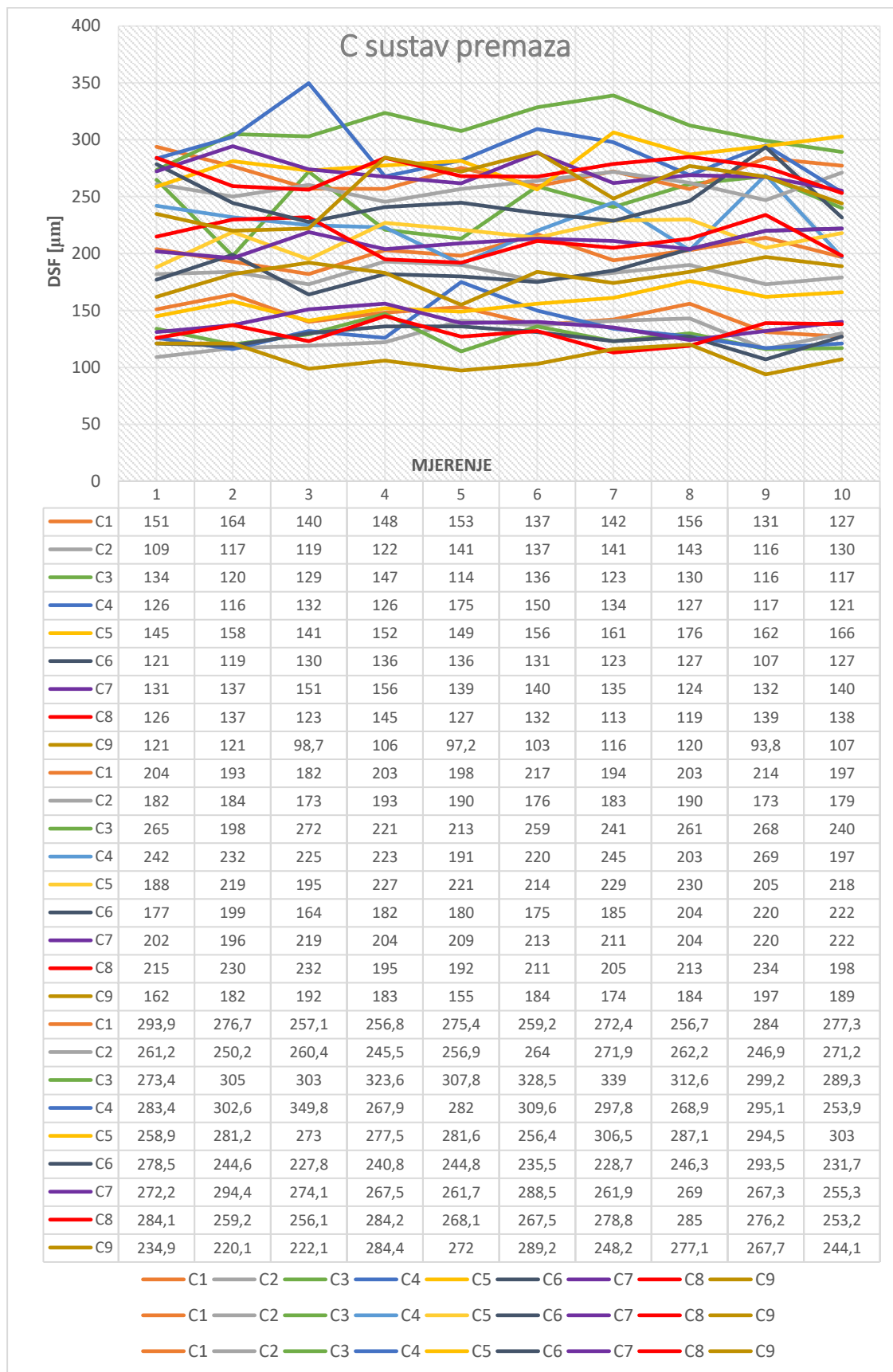
Slika 36. Mjerenje ukupne DSF



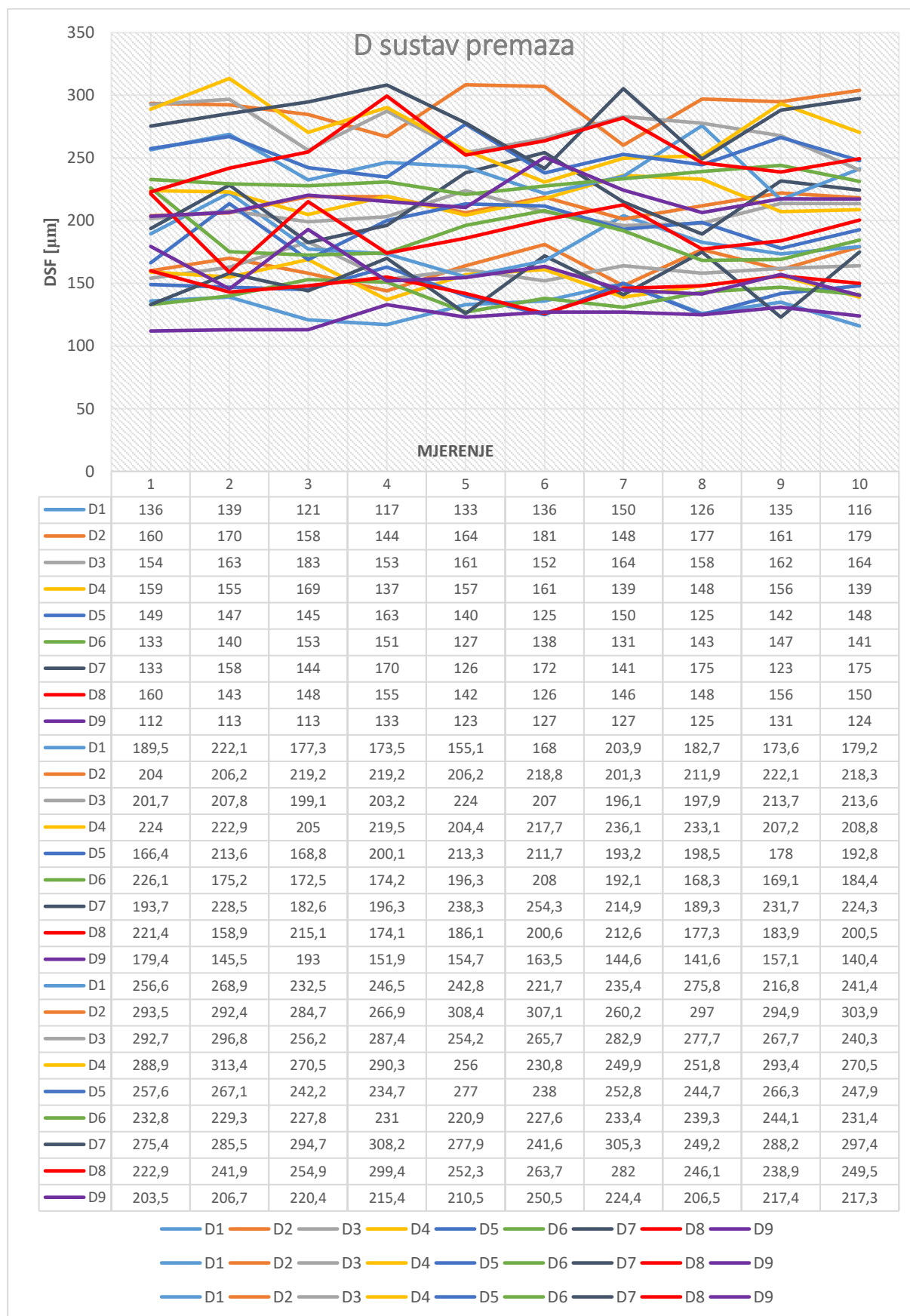
Slika 37. DSF A sustava premaza



Slika 38. DSF B sustava premaza



Slika 39. DSF C sustava premaza



Slika 40. DSF D sustava premaza

Tablica 18. Prosječna debljina suhog filma za IC sušene premaze [μm]

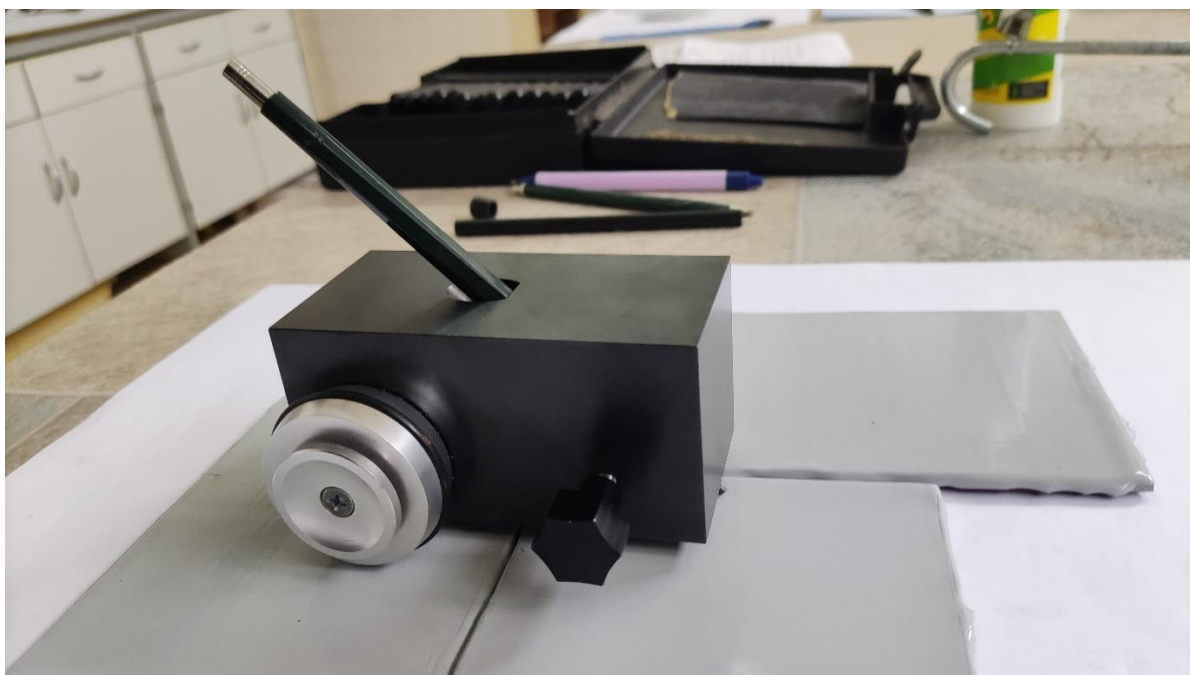
Broj uzorka	A		C		
	Temelj	Završni	Temelj	Međusloj	Završni
1	197,8	246,2	144,9	200,5	271,0
2	211,4	253,7	127,5	182,3	259,0
3	210,8	275,0	126,6	243,8	308,1
4	209,9	277,5	132,4	224,7	291,1
5	193,2	291,5	156,6	214,6	282,0
6	223,5	249,7	125,7	190,8	247,2
7	221,6	262,5	138,5	210,0	271,2
8	190,7	254,9	129,9	212,5	271,2
9	169,9	199,5	108,4	180,2	256,0

Tablica 19. Prosječna debljina suhog filma premaza sušenih na zraku [μm]

Broj uzorka	B		D		
	Temelj	Završni	Temelj	Međusloj	Završni
1	199,3	255,4	130,9	182,5	243,8
2	200,5	227,5	164,2	212,7	290,9
3	242,3	289,1	161,4	206,4	272,2
4	201,1	243,2	152,0	217,9	271,6
5	208,6	244,9	143,4	193,6	252,8
6	202,4	242,9	140,4	186,6	231,8
7	199,2	241,3	151,7	215,4	282,3
8	250,5	284,4	147,4	193,1	255,2
9	182	210,1	122,8	157,2	217,3

6.1.3. Mjerenje tvrdoće olovkama

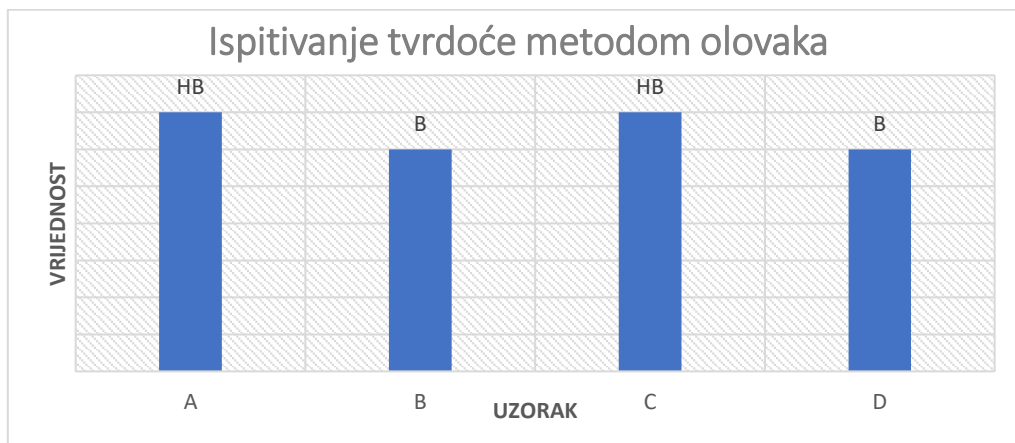
Ispitivanje se izvodi sukladno uputama iz norme HRN EN ISO 15184 pomoću utega čija je svrha pozicioniranje olovke pod kut od 45° i osiguravanje konstante sile pritiska kao što je prikazano na slici 41. Olovke se izmjenjuju od najtvrđe prema mekšoj (slika 42.) sve dok se ne dođe do olovke koja prva ne ostavlja trag i ona predstavlja tvrdoću prevlake. Na slici 43. prikazani su dobiveni rezultati, a u tablici 20. dan je izgled uzoraka. [3]



Slika 41. Oprema za ispitivanje tvrdoće olovkama

6H - 5H - 4H - 3H - 2H - H - F - HB - B - 2B - 3B - 4B - 5B - 6B

Slika 42. Redoslijed ispitivanja tvrdoće [3]



Slika 43. Rezultati ispitivanja tvrdoće olovkama

Tablica 20. Izgled uzoraka

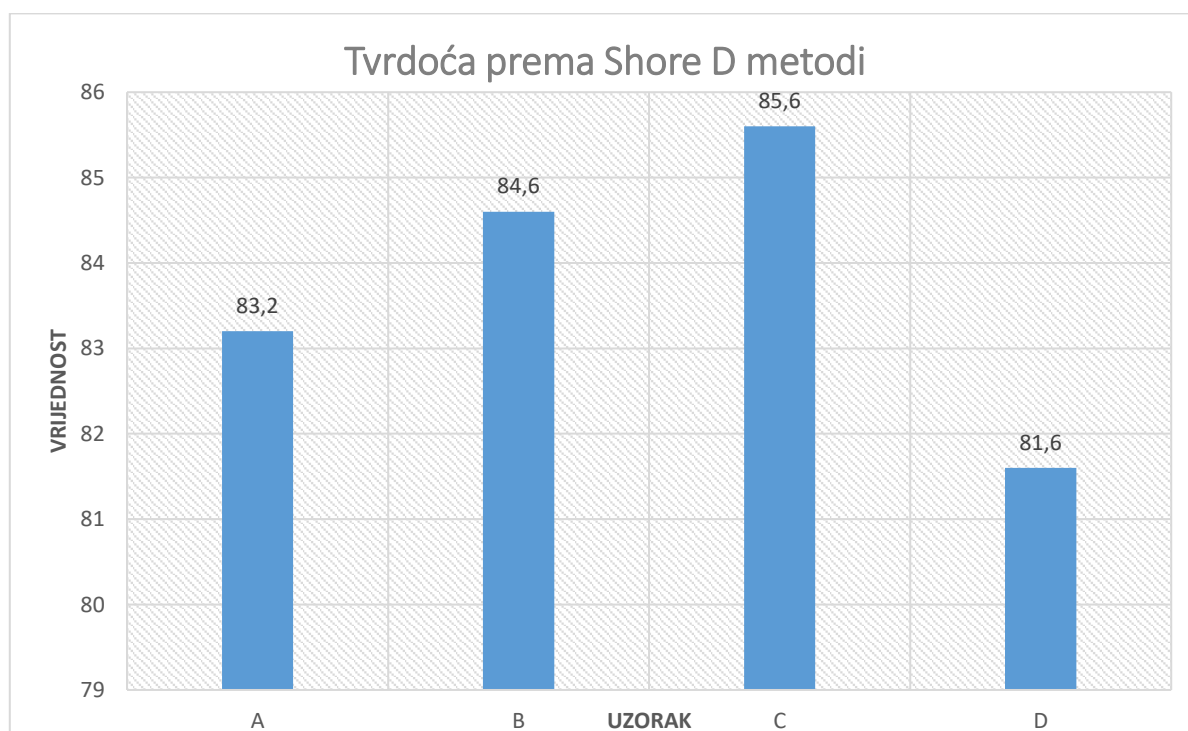
UZORAK	SLIKA	
A EP-PUR IC		
B EP-PUR atm.		
C EP-EP-PUR IC		
D EP-EP-PUR atm.		

6.1.4. Ispitivanje tvrdoće Shore D metodom

Ovo se ispitivanje provodi sukladno metodi HRN EN ISO 7619-1. Sonda uređaja PosiTector 6000 prisloni se na površinu uzorka te se na zaslonu pokaže vrijednost koja može biti u rasponu od 0 do 100. Ispitivanje je provedeno u 5 točaka na svakom uzorku te su numeričke vrijednosti dane u tablici 21., dok su slikom 44. grafički prikazane prosječne vrijednosti za uzorke.

Tablica 21. Numeričke vrijednosti tvrdoće premaza mjerene Shore D metodom

UZORAK	BROJ MJERENJA				
	1	2	3	4	5
A	85	80	86	85	80
B	87	88	81	84	83
C	85	84	87	88	84
D	78	81	82	83	84



Slika 44. Srednja vrijednost ispitivanja Shore D metodom

6.1.5. Ispitivanje prionjivosti vlačnom metodom (*pull-off*)

Ispitivanje se izvodi sukladno normi HRN EN ISO 4624 tako da se brusnim papirom pripremi površina za nanošenje ispitnog valjka (dolija) na kojeg se nanosi lijepilo (slika 45.). Nakon jednog sata (slika 46.), očistila se površina (slika 47.) oko zalijepljenog dolija te se pomoću Pull-off uređaja izmjerila vrijednost naprezanja (slika 48.) koje je bilo potrebno za odvajanje dolija od površine. Ispitivanje je provedeno na jednom uzorku nakon sušenja te na 3 uzoraka nakon ispitivanja u slanoj i klima komori. Vrijednosti naprezanja prikazane su u tablici 22., dok su u tablici 23. prikazani uzorci nakon ispitivanja.



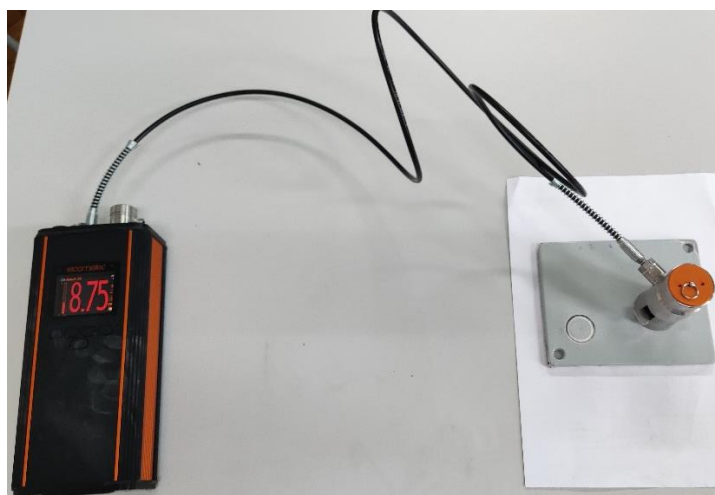
Slika 45. Pripor za pripremu površine i lijepljenje ispitnog valjka



Slika 46. Zalijepljeni ispitni valjci na uzorcima



Slika 47. Skidanje ljepljiva oko dolija



Slika 48. Mjerenje naprezanja

Tablica 22. Numeričke vrijednosti ispitivanja *pull-off* [MPa]

VRIJEME ISPITIVANJA	UZORAK			
	A	B	C	D
Nakon sušenja	7,73	6,74	11,91	6,52
Nakon ispitivanja u klima komori	10,04	4,49	10,33	4,78
	11,67	8,43	10,22	4,01
	8,91	9,53	8,69	2,46
Nakon ispitivanja u slanoj komori	7,59	6,11	10,22	5,10
	9,50	8,42	8,98	6,80
	8,42	10,31	12,05	7,00

Tablica 23. Izgled uzoraka nakon *pull-off* ispitivanja

VRIJEME ISPITIVANJA	UZORAK			
	A	B	C	D
Nakon sušenja				
Klima komora				
Slana komora				


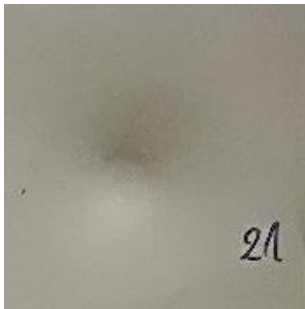
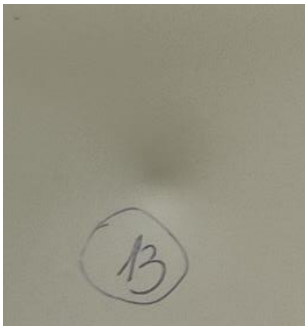
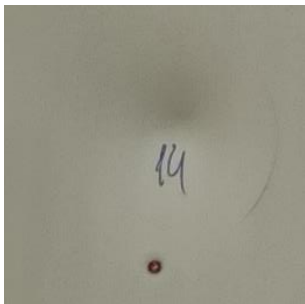
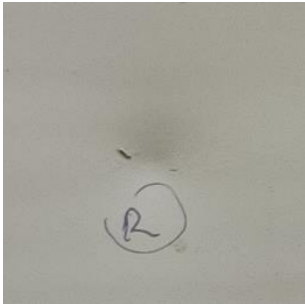
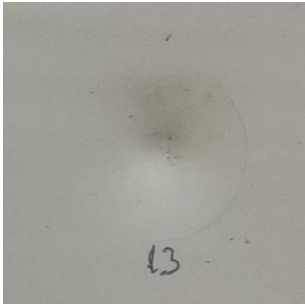
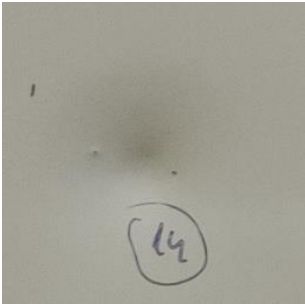
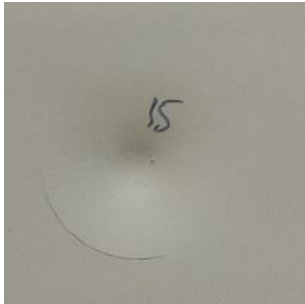
6.1.6. Ispitivanje otpornosti na udar

Norma HRN EN ISO 6272-1 propisuje ispitivanje koje pokazuje otpornost premaza na udar. Sukladno normi, uteg propisane mase 1000 ± 5 g ispusti se s neke visine da padne na površinu pod utjecajem gravitacije (slika 49.). Maksimalna visina s koje se pusti uteg, a premaz ne pokazuje oštećenje, predstavlja vrijednosti otpornosti prema udaru. U tablici 24. prikazane su dobivene visine i izgled površine na koju je pao uteg. [3]



Slika 49. Oprema za ispitivanje, Laboratorij za zaštitu materijala, FSB

Tablica 24. Rezultati ispitivanja udarom

UZORAK	VRIJEDNOST [cm]	SLIKA VISINE OTPORNOSTI	SLIKA VISINE KOJA REZULTIRA LOMOM
A	20		
B	13		
C	12		
D	14		

6.1.7. Određivanje potencijala otvorenog strujnog kruga

Potencijal otvorenog strujnog kruga mjeri se u svrhu promatranja ponašanja premaza u ispitnom elektrolitu pri čemu se prate vrijednosti promjene potencijala radne elektrode. Teži se stabilizaciji korozijskog potencijala premaza jer je to znak da premaz izvršava svoju ulogu zaštite od korozije. [3]

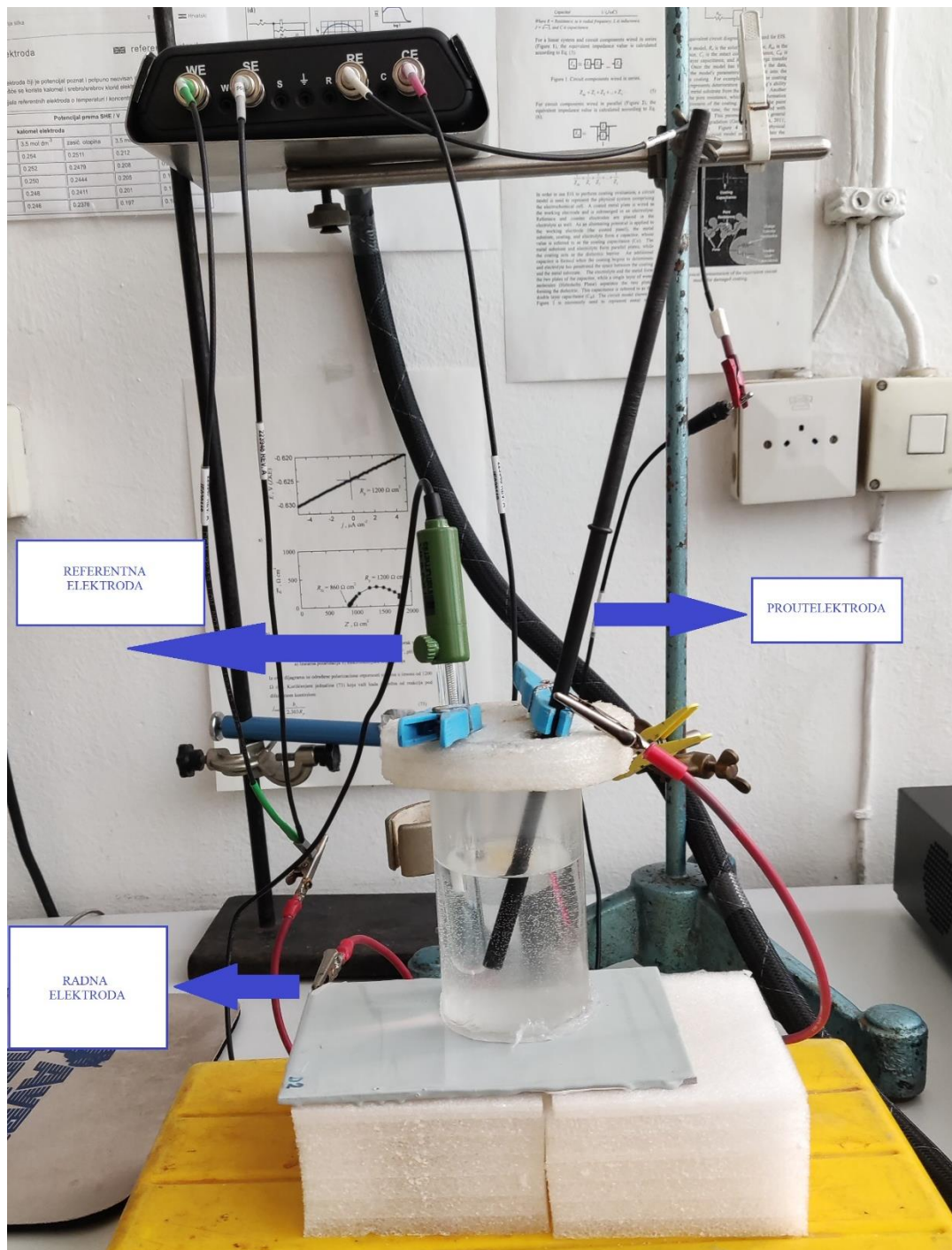
Određivanje potencijala provedeno je uređajem VersaSTAT 3 Potentiostat/Galvanostat, a analiza dobivenih vrijednosti provedena je u programu VersaStudio. Mjerenja su provedena 24 sata i 8 dana nakon izlaganja elektrolitu pri sobnoj temperaturi (23 ± 2 C). Elektrokemijska ćelija prikazana je na slici 50. Parametri ispitivanja prikazani su u tablici 25., dok su rezultati dani tablicom 26.

Tablica 25. Parametri za mjerenje OCP-a

ELEKTROLIT	3,5 % NaCl
REFERENTNA ELEKTRODA	Zasićena Kalomel elektroda (0,242 V)
VRSTA RADNE ELEKTRODE	Čvrsta
PROTUELEKTRODA	Grafitni štapić
POVRŠINA RADNE ELEKTRODE [cm²]	19,625
GUSTOĆA [g/ml]	7,85
EKVIVALENTNA MASA [g]	27,92
TRAJANJE ISPITIVANJA [s]	1 000

Tablica 26. E_{cor} nakon stabilizacije u 3,5 % NaCl [mV]

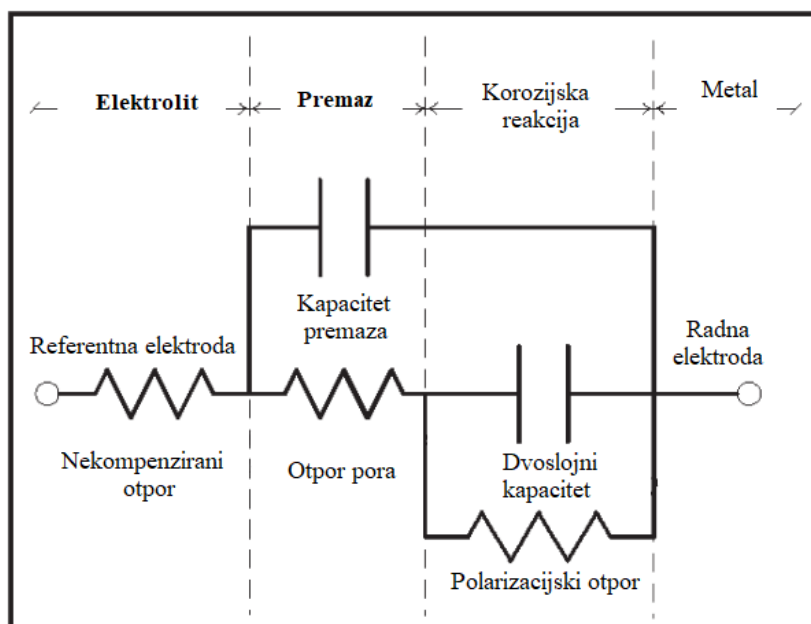
PREMAZ	PERIOD NAKON URANJANJA U ELEKTROLIT		
	24 h	6 dana	8 dana
A	-28,5	-138,6	-161,9
B	-169,9	-177,3	-163,8
C	-60,7	-574,5	-687,6
D	-222,4	-157,3	-145,7



Slika 50. Elektrokemijska ćelija

6.1.8. Elektrokemijska impedancijska spektroskopija

EIS je elektrokemijska nerazorna metoda ispitivanja otpornosti na koroziju kod koje se mogu detektirati promjene i oštećenja premaza prije nego što ona postanu vidljiva. Na elektrodu se narine potencijal male amplitude i visokog raspona frekvencije pri čemu se prate amplituda i fazni pomak. Na temelju tih vrijednosti odabire se model ekvivalentnog kruga koji se može sastojati od otpornika i kondenzatora. Dobiveni otpor odgovara reakcijama prijenosa elektrona. Posebno je važno pratiti promjene u kapacitivnosti premaza jer se on mijenja kako premaz npr. bubri ili upija vodu, a također se može pratiti i promjena u poroznosti premaza. Osim promjene premaza, može se pratiti brzina korozije metalne podloge koja se povećava kako premaz propada. Na slici 51. prikazan je karakteristični krug. [3,35]



Slika 51. Najčešći ekvivalentni krug za opisivanje ponašanja premaza [35]

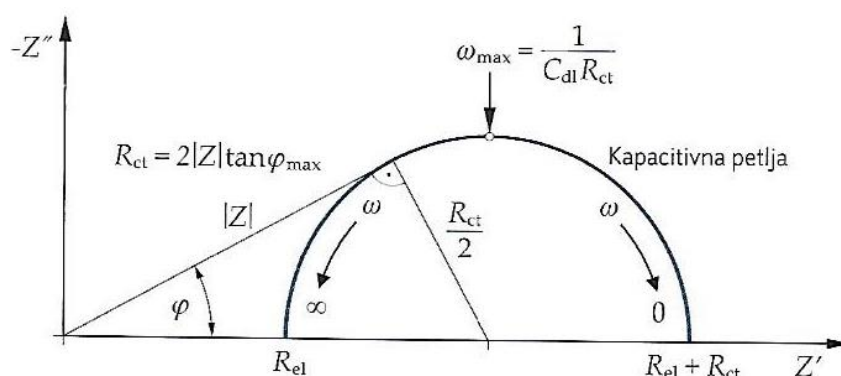
Karakteristični otpori su:

- Nekompensirani otpor (R_{el})– otpor elektrolita između radne i referentne elektrode koji se zbog dobre vodljivosti elektrolita obično zanemaruje radi niske vrijednosti,
- Kapacitet prevlake (C_{premaz})– ovaj kapacitet vrlo je važan parametar prema kojem se može detektirati greška u premazu, zbog veće debljine premaza, ovaj kapacitet teži biti što niži te je povezan s impedancijom:

$$|Z| = \frac{1}{2\pi f C_{premaz}} \quad (4)$$

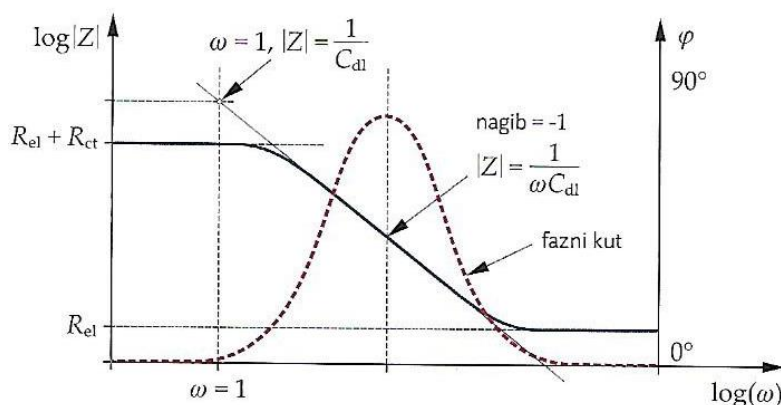
- Otpor pora (R_{pore}) – ovaj se otpor mijenja tijekom izlaganja zbog prodiranja elektrolita u mikropore pri čemu se smanje tijekom vremena, no može i narasti ponovno nakon nekog vremena zbog korozije,
- Polarizacijski otpor (R_p) – obrnuto je proporcionalan brzini korozije,
- Dvoslojni kapacitet (C_{dl}) – ovaj kapacitet je vezan uz naboj elektrolita koji se skuplja oko površine metala, zbog svog velikog iznosa ako dođe oglebotine 0,005 % površine uzorka, taj kapacitet može iznositi kao kapacitet premaza na ostatku netaknute površine. [35]

Vrijednosti dobivene ispitivanjem predočuju se pomoću Nyquistovih i Bodeovih dijagrama. Apscisu Nyquistovog dijagrama predstavlja realna komponenta impedancije Z' , dok se na ordinati nalazi imaginarna komponenta impedancije Z'' . Na slici 52. prikazan je Nyquistov graf za jednostavni ekvivalentni krug. [3]



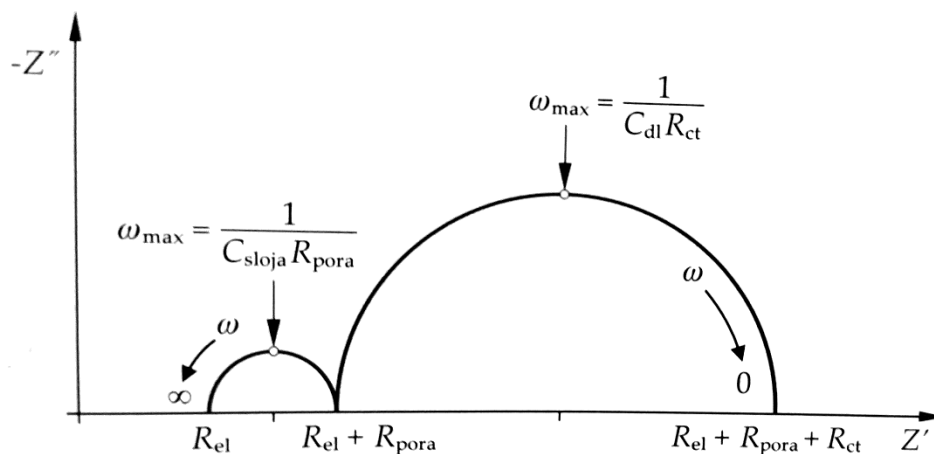
Slika 52. Nyquistov graf za jednostavni ekvivalentni krug [3]

Bodeovim grafom prikazuju se odnosi logaritma impedancije u odnosu na logaritma frekvencije kao što je prikazano slikom 53. [3]

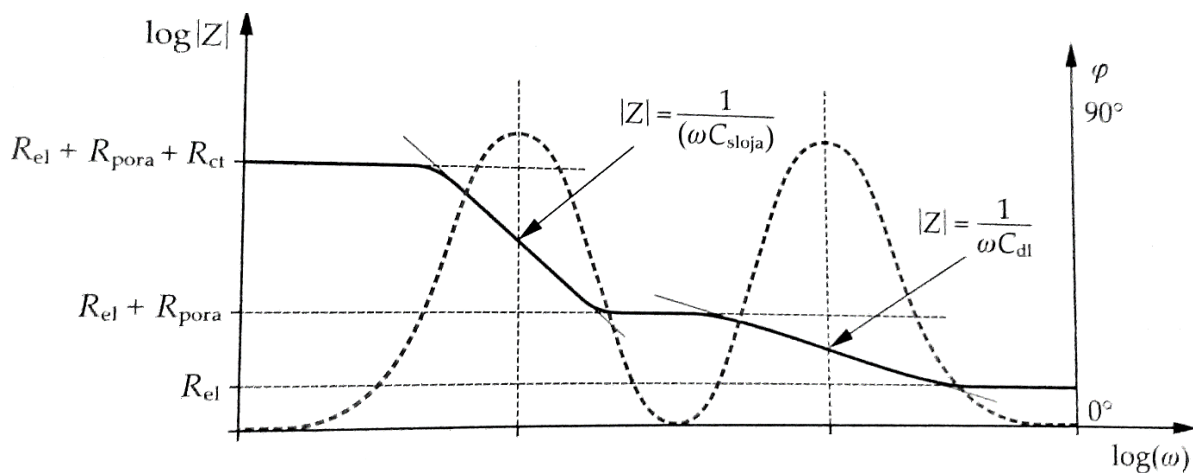


Slika 53. Bodeov graf za jednostavni ekvivalentni krug [3]

Ako bi postojala poroznost u premazu kao što je prikazano na slici 51. Nyquistov i Bodeov dijagram imali bi izgled prema slikama 54. i 55.

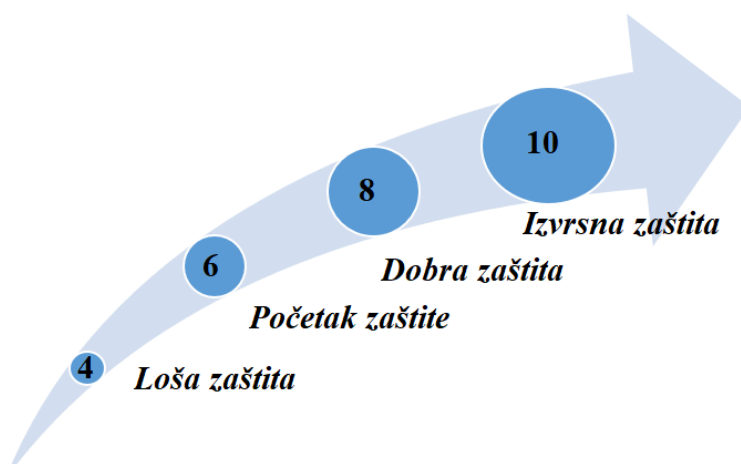


Slika 54. Nyquistov graf za porozni premaz [3]



Slika 55. Bodeov dijagram za porozni premaz [3]

Iz Bodeovih i Nyquistovih se dijagrama očitava konačna vrijednost premaza nakon ispitivanja. Je li premaz učinkovit zaključuje se iz vrijednosti logaritma impedancije premaza prema slici 56.



Slika 56. Učinkovitost zaštite u odnosu na impedanciju ($\log Z$), (gdje je Z u Ωcm^2 pri 0,1 Hz)

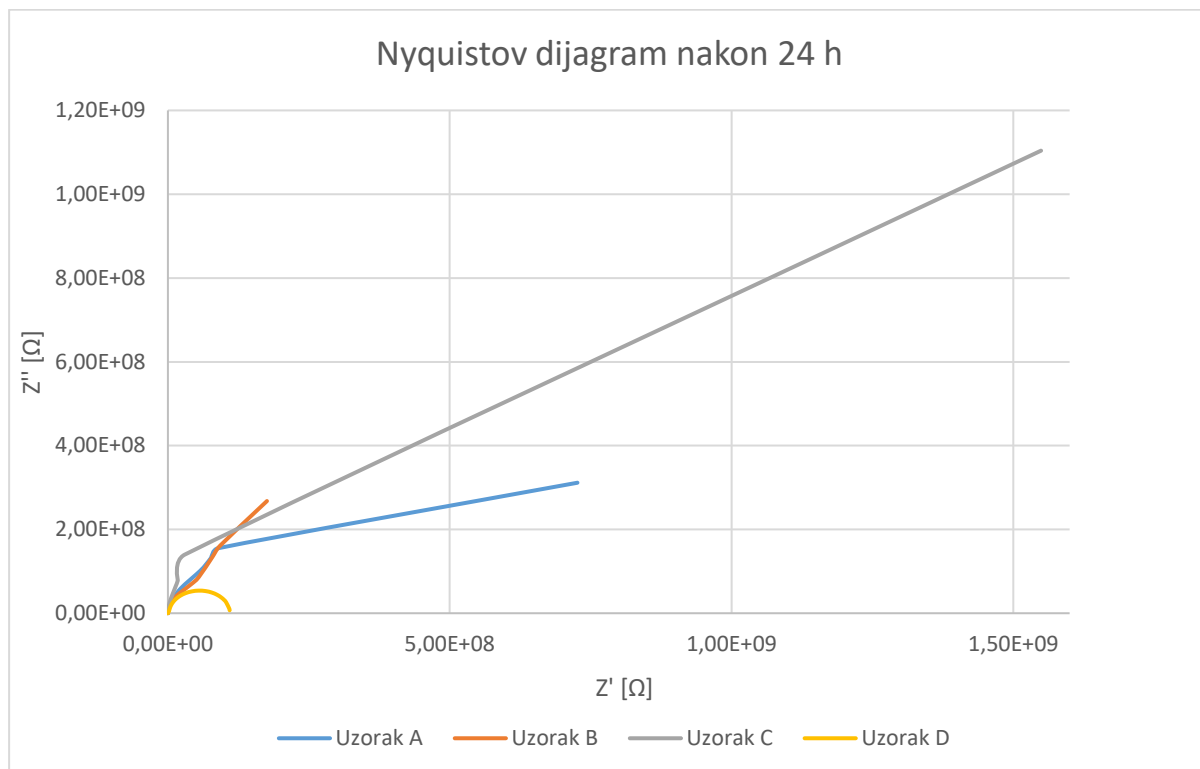
U tablici 27. prikazani su parametri ispitivanja, dok su u tablici 28. prikazane vrijednosti otpora premaza nakon 24 h i 8 dana ispitivanja, a slikama 57., 58., 59. i 60. prikazani su dobiveni dijagrami.

Tablica 27. Parametri ispitivanja

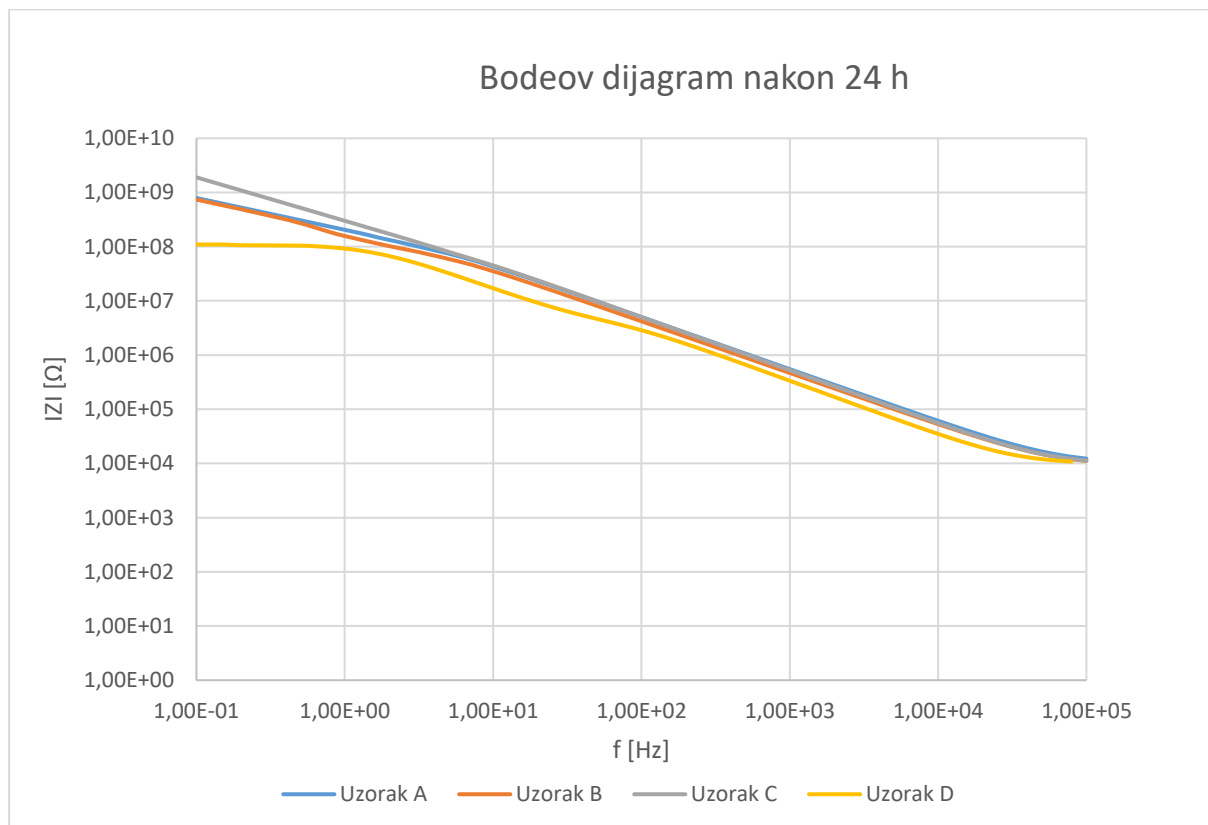
ELEKTROLIT	3,5 % NaCl
REFERENTNA ELEKTRODA	Zasićena Kalomel elektroda (0,242 V)
VRSTA RADNE ELEKTRODE	Čvrsta
PROTUELEKTRODA	Grafitni štapić
POVRŠINA RADNE ELEKTRODE [cm²]	19,625
GUSTOĆA [g/ml]	7,85
EKVIVALENTNA MASA [g]	27,92
RASPON FREKVENCIJE [Hz]	0,1 – 100 000
AMPLITUDA NAPONA [mV]	250

Tablica 28. Vrijednosti otpora premaza [Ω]

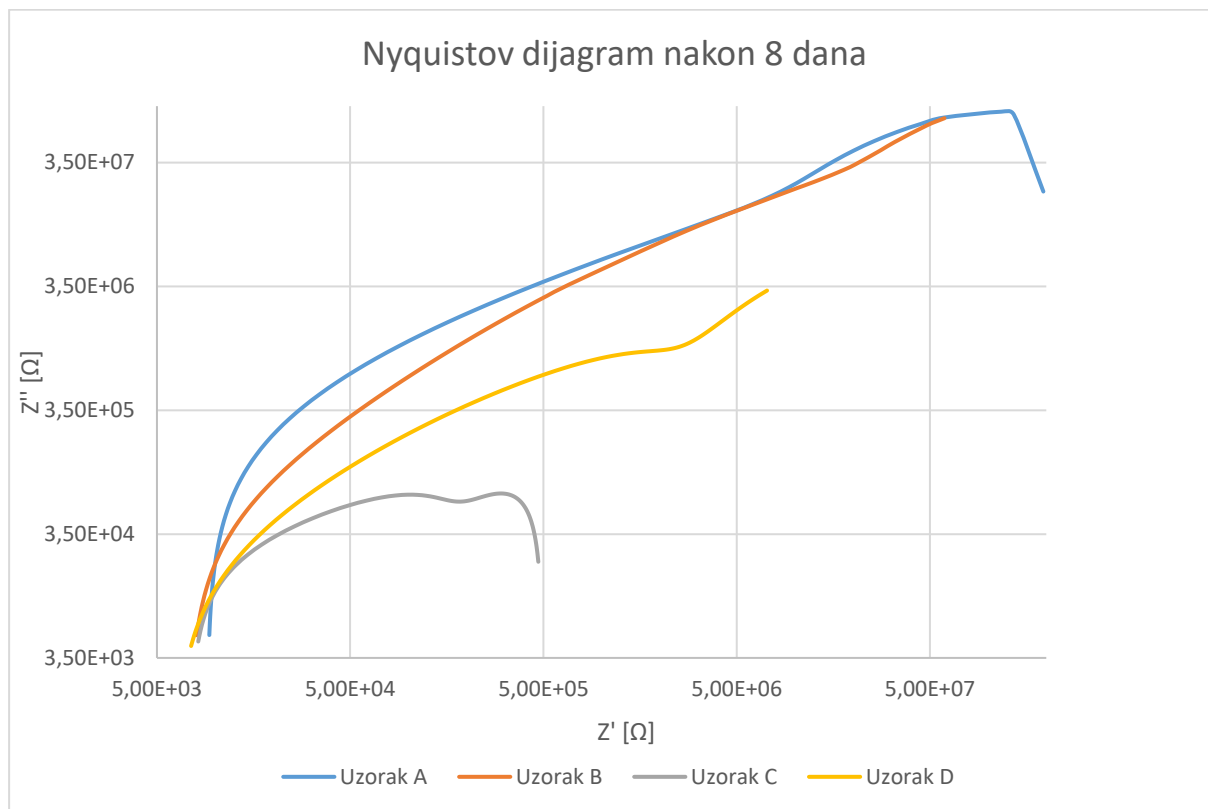
PREMAZ	VRIJEME URANJANJA U ELEKTROLIT	
	24 h	8 dana
A	$1,965 \times 10^8$	$4,546 \times 10^7$
B	$1,480 \times 10^8$	$7,148 \times 10^7$
C	$2,563 \times 10^8$	$1,378 \times 10^5$
D	$8,590 \times 10^6$	$2,021 \times 10^6$



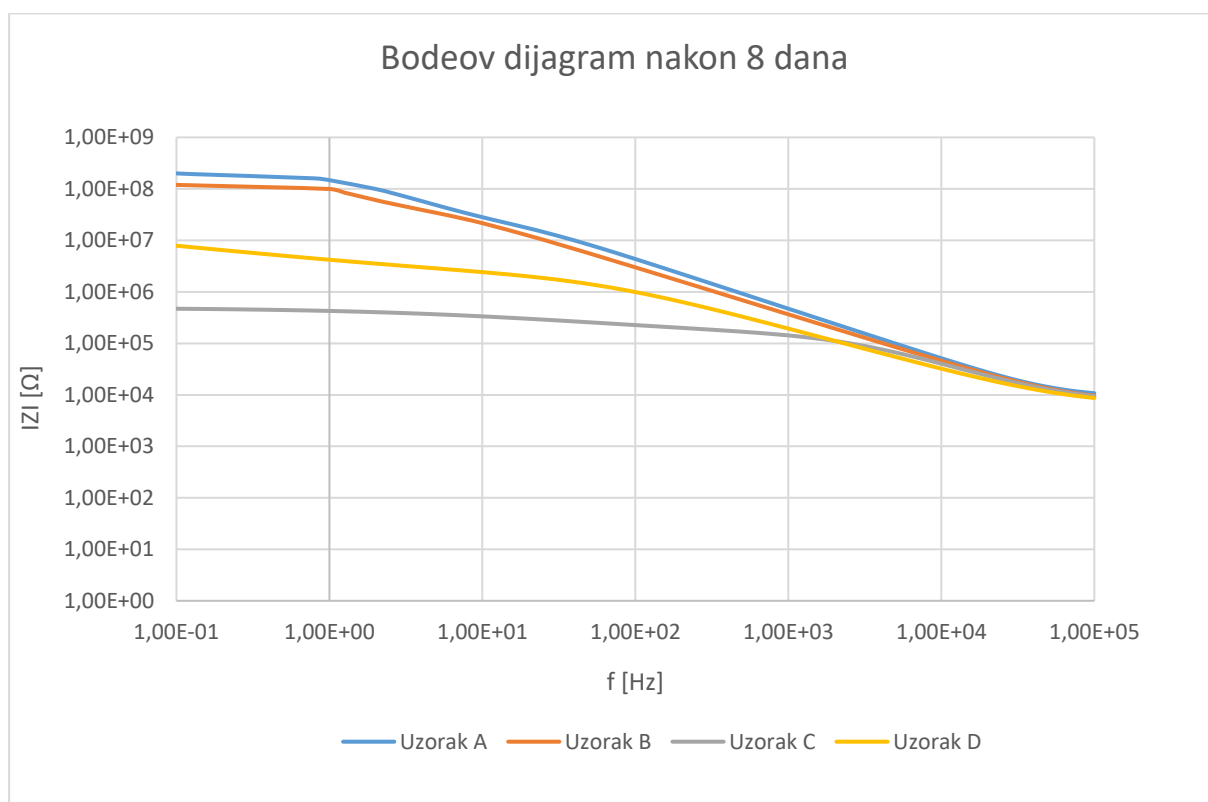
Slika 57. Izgled Nyquistovog grafa nakon 24 h



Slika 58. Izgled Bodeovog grafa nakon 24 h



Slika 59. Izgled Nyquistovog grafa nakon 8 dana



Slika 60. Izgled Bodeova grafa nakon 8 dana

6.1.9. Ispitivanje u slanoj komori

Ubrzano korozijsko ispitivanje u slanoj komori napravljeno je sukladno normi HRN EN ISO 9227. Parametri ispitivanja dani su u tablici 29.

Tablica 29. Parametri ispitivanja u slanoj komori

TRAJANJE [dan]	7
OTOPINA	5 % NaCl
TEMPERATURA	35 ± 2 °C

Prije izlaganja u komori, uzorci su na rubovima zaštićeni trakom kako bi se spriječila mogućnost pojave korozije te je napravljen urez. U tablici 30. prikazana provedena ispitivanja s pripadajućim normama.

Tablica 30. Provedena ispitivanja i norme

ISPITIVANJE	NORMA
Prionjivost	HRN EN ISO 4624
Mjehuranje	HRN EN ISO 4628-2
Hrđanje	HRN EN ISO 4628-3
Pucanje	HRN EN ISO 4628-4
Ljuštenje	HRN EN ISO 4628-5
Stupanj korozije oko ureza	HRN EN ISO 4628-8

Ispitivanje prionjivosti *Pull-off* metodom prikazano je u poglavlju 6.1.5. te su dobiveni rezultati dani u tablici 22.

Mjehuranje premaza ocjenjuje se sukladno veličini i količini mjehura na površini tako da se usporede slike iz norme i površina nakon izlaganja u komori. Na površini premaza ne bi trebalo biti mjehura. [36]

Ocjena hrđanja premaza provodi se na temelju računanja udjela površine na kojoj se pojavljuje hrđanje i dijeli se na stupnjeve Ri 0 – 5 [37]:

- Ri 0 – 0 %
- Ri 1 – 0,05 %
- Ri 2 – 0,5 %
- Ri 3 – 1 %
- Ri 4 – 8 %
- Ri 5 – 40-50 %.

Pucanje premaza ocjenjuje se od 0 do 5 u ovisnosti o količini pukotina na površini [38]:

- 0 nema pukotina,
- 1 malen i beznačajan broj pukotina,
- 2 malen, ali značajan broj pukotina,
- 3 umjeren broj pukotina,
- 4 znatan broj pukotina,
- 5 velik broj pukotina.

Ljuštenje se premaza ocjenjuje prema veličini ljuštenja koje se nalaze na površini premaza kako je prikazano u tablici 31.

Tablica 31. Analiza ljuštenja premaza [39]

Ocjena	0	1	2	3	4	5
Oljuštena površina [%]	0	0,1	0,3	1	3	15
Veličina ljuštenja [mm]	-	< 1	< 3	< 10	< 30	> 30

Za određivanje stupnja korozije c napravljen je urez duljine 5 cm pomoću alata sa slike 61. On se računa prema formuli iz jednadžbe 5 gdje w_c označava ukupnu širinu korozijske zone, dok w predstavlja širinu ureza (2 mm). Prema normi HRN EN ISO 12944-6 najveća dozvoljena numerička vrijednost stupnja korozije iznosi 1,5 mm. [40]

$$c = \frac{w_c - w}{2} \quad (5)$$









Slika 61. Urezivanje premaza





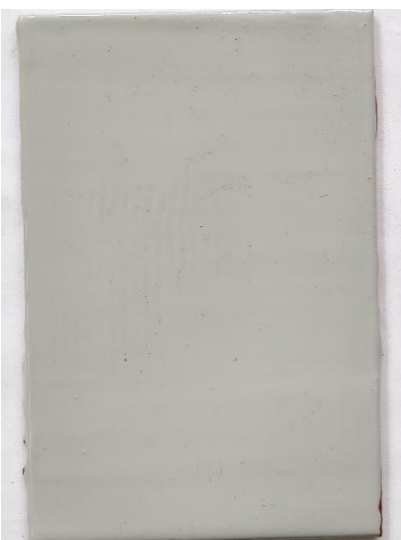

Ocjene premaza nakon izlaganja u slanoj komori nalaze se u tablici 32. U tablici 33. prikazani su uzorci prije i nakon ispitivanja, a u tablici 34. dani su izgledi ureza.


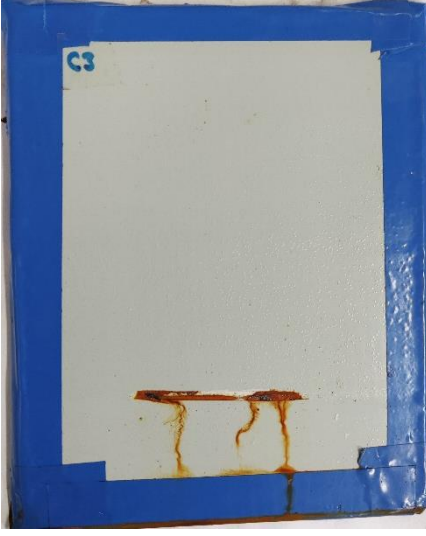
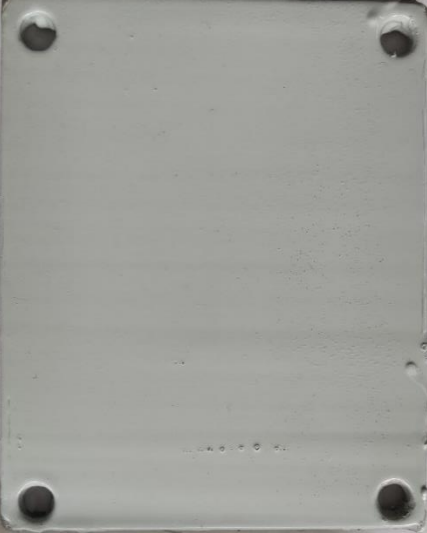



Tablica 32. Ocjene ispitivanja u slanoj komori





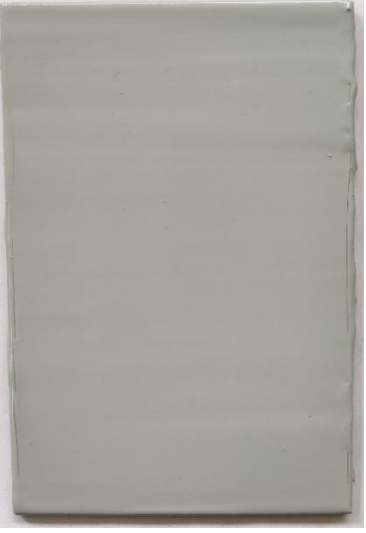

	MJEHURANJE	HRĐANJE	PUCANJE	LJUŠTENJE	STUPANJ KOROZIJE [mm]
A5	0	Ri 1	0	0	0,129
A6	0	Ri 1	0	0	0,164
A7	0	Ri 1	0	0	0,171
B3	0	Ri 1	0	0	0,078
B5	0	Ri 1	0	0	0,547
B6	0	Ri 0	0	0	0,202
C3	0	Ri 0	0	0	0,190
C4	0	Ri 1	0	0	0,134
C6	0	Ri 1	0	0	0,05
D1	0	Ri 1	0	0	0,216
D4	0	Ri 0	0	0	0,257
D7	0	Ri 1	0	0	0,05

Tablica 33. Uzorci prije i nakon izlaganja u slanoj komori













UZORAK	PRIJE IZLAGANJA	NAKON IZLAGANJA
A5	 A rectangular white metal plate with four circular holes, one in each corner. The surface appears clean and uniform.	 The same white metal plate as in the 'PRIJE' image, but now showing significant rust. A horizontal line of rust is visible near the bottom edge, with vertical streaks extending downwards. The plate is mounted on a blue background.
A6	 A rectangular white metal plate with four circular holes, one in each corner. The surface appears clean and uniform.	 The same white metal plate as in the 'PRIJE' image, but now showing significant rust. A horizontal line of rust is visible near the bottom edge, with vertical streaks extending downwards. The plate is mounted on a blue background.
A7	 A rectangular white metal plate with four circular holes, one in each corner. The surface appears clean and uniform.	 The same white metal plate as in the 'PRIJE' image, but now showing significant rust. A horizontal line of rust is visible near the bottom edge, with vertical streaks extending downwards. The plate is mounted on a blue background.

<p>B3</p>		
<p>B5</p>		
<p>B6</p>		

<p>C3</p>		
<p>C4</p>		
<p>C6</p>		

<p>D1</p>		
<p>D4</p>		
<p>D7</p>		

Tablica 34. Izgled ureza nakon ispitivanja u slanoj komori

UZORAK	IZGLED UREZA
A5	
A6	
A7	
B3	
B5	
B6	
C3	
C4	
C6	
D1	
D4	
D7	

6.1.10. Ispitivanje u klima komori

Ispitivanje otpornosti premaza u klima komori trajalo je 5 dana na način da su se svakih 12 sati ciklički mijenjali uvjeti ispitivanja. Minimalna temperatura bila je $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ s 80% strujanja zraka bez vlage, dok je najviša temperatura bila $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ s postotkom relativne vlažnosti zraka 60% . Gradijent grijanja, odnosno hlađenja iznosio je $15\text{ }^{\circ}\text{C/h}$. Izgled uzoraka u komori dan je na slici 62.




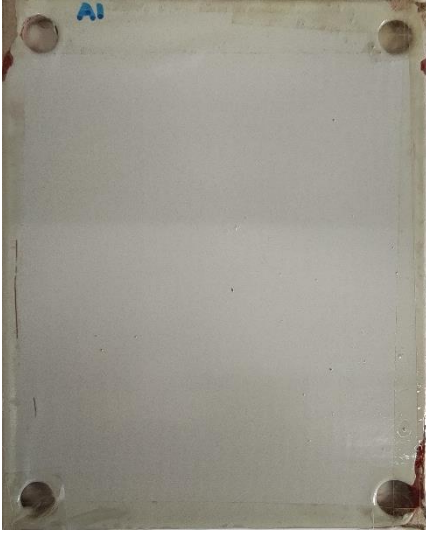




Slika 62. Uzorci u klima komori, Laboratorij za zaštitu materijala, FSB







Nakon ispitivanja provedena je analiza prionjivosti premaza, mjehuranja, hrđanja, pucanja i ljuštenja prema kriterijima koji su objašnjeni u prihodnom poglavlju. Rezultati ocjene premaza dani su u tablici 35., dok su u tablici 36. prikazani uzroci prije i poslije ispitivanja.


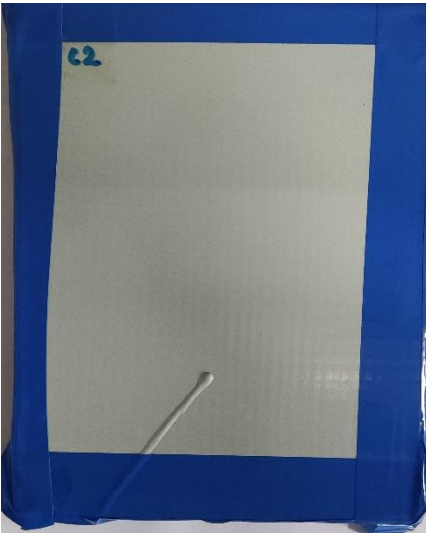
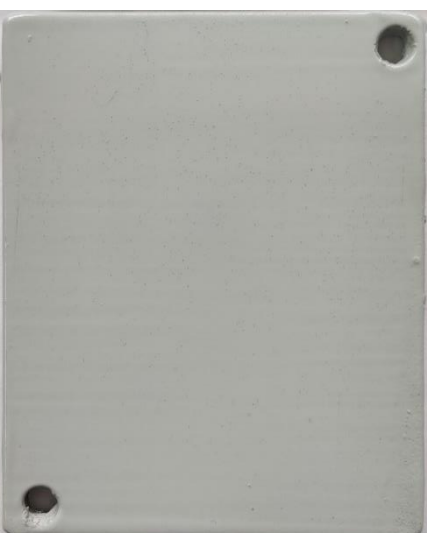


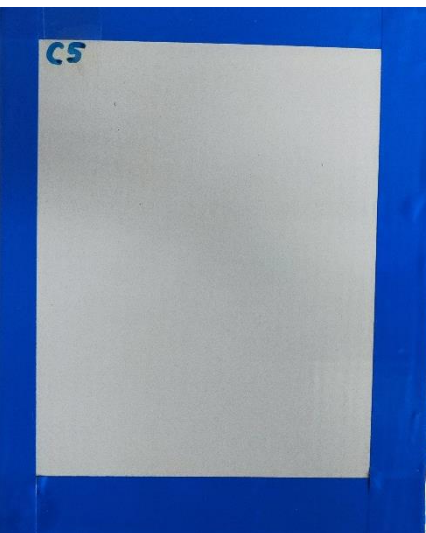
Tablica 35. Ocjene ispitivanja u klima komori







	MJEHURANJE	HRĐANJE	PUCANJE	LJUŠTENJE
A1	0	Ri 0	0	0
A2	0	Ri 0	0	0
A4	0	Ri 0	0	0
B2	0	Ri 0	0	0
B7	0	Ri 0	0	0
B8	0	Ri 0	0	0
C2	0	Ri 0	0	0
C5	0	Ri 0	0	0
C8	0	Ri 0	0	0
D3	0	Ri 0	0	0
D6	0	Ri 0	0	0
D8	0	Ri 0	0	0

Tablica 36. Uzorci prije i nakon izlaganja u klima komori

UZORAK	PRIJE IZLAGANJA	NAKON IZLAGANJA
A1		
A2		
A4		

<p>B2</p>		
<p>B7</p>		
<p>B8</p>		

<p>C2</p>		
<p>C5</p>		
<p>C8</p>		

<p>D3</p>		
<p>D6</p>		
<p>D8</p>		

6.2. Analiza rezultata ispitivanja

Na čelične pločice nanosena su dva sustava premaza sličnog sastava različitih proizvođača. Temeljne premaze i međusloj drugog sustava čine epoksidni premazi, dok su završni premazi poliuretanski. Priprema površine za nanošenje premaza u oba je slučaja zahtijevala srednji profil hrapavosti (G) prema normi HRN EN ISO 8503-1 i stupanj pripreme površine minimalno 2,5 prema normi HRN EN ISO 8501-1.

Premazi sušeni IC zračenjem nanoseni su na pločice debljine 4 mm, dok su premazi koji su se sušili na zraku nanosili na pločice debljine 2 mm. Za potrebe ispitivanja otpornosti premaza na udar, korištena je jedna pločica debljine 0,8 mm za svaku kombinaciju sustava i metode sušenja. Nanošenje premaza odrađeno je spiralnim aplikatorom što je donijelo za posljedicu neravnomjernost DSF. Premazi sušeni IC zračenjem bili su suhi u rasponu od 7,5 do 16 minuta, ovisno o vrsti premaza, debljini mokrog filma te debljini podloge na koju se premaz nanosio. Premazi koji su bili nanoseni na pločice za ispitivanje na udar najbrže su se osušili te su ti uzorci poprimali najviše temperature. Nijedan premaz nije prešao temperaturu višu od 120 °C što je granična temperatura prema tehničkim listovima proizvođača premaza. S druge strane, premazima koji su bili sušeni na zraku trebalo je nekoliko sati do nekoliko dana da se u potpunosti osuše i umreže kako bi se mogao nanijeti idući sloj ili provesti ispitivanje. Premazi su postigli propisanu RAL boju iz tehničkih listova te nije došlo do odstupanja od nijansa između IC sušenih premaza i onih sušenih na zraku.

Vrijednosti debljine suhog filma značajno odstupaju od prosječnih vrijednosti zbog brjegovia i dolova koji su nastali uslijed nanošenja premaza spiralnim aplikatorom. IC sušeni premazi pokazuju nešto više vrijednosti odstupanja jer je došlo i do razlijevanja premaza niz pločicu radi gravitacijskog djelovanja tijekom sušenja te se iz tog razloga na nekim uzorcima mogu uočiti „curki“. Zbog isparavanja otpala iz prethodnog sloja premaza, na nekim se uzorcima mogu vidjeti mjehurići, odnosno pore u sloju premaza, što znači da je naredni premaz prerano nanijet. Na pločicama namijenim za ispitivanje otpornosti na udar izmjerene su najmanje vrijednosti DSF.

Ispitivanje tvrdoće olovkama pokazalo je da IC sušeni premazi imaju za jedan stupanj višu vrijednost tvrdoće u odnosu na premaze sušene na zraku. S druge strane, ispitivanje tvrdoće Shore D metodom mjereno u 5 točaka pokazalo je da kod prvog sustava premaza bolju tvrdoću ima premaz sušen na zraku, a kod drugog je sustava veću vrijednost pokazao IC sušen. S obzirom da je razlika u tvrdoći prvog sustava između IC sušenog premaza i premaza sušenog

na zraku 1,4 %, a drugog sustava 4 %, premazi imaju približno jednaku tvrdoću te spadaju u premaze visoke tvrdoće.

Ispitivanje prionjivosti prevlaka vlačnom metodom pokazalo je da uglavnom IC sušeni premazi imaju višu prionjivost u odnosu na premaze sušene na zraku. Uzorci nakon ispitivanja u klima komori pokazuju najviše vrijednosti, zatim uzorci nakon ispitivanja u slanoj komori, a najmanju vrijednost imaju uzorci nakon sušenja. Iznimka je premaz drugog sustava sušen na zraku kod kojeg je najviša vrijednost postignuta nakon ispitivanja u slanoj komori, a najmanja nakon ispitivanja u klima komori.

Ispitivanje otpornosti na udar pokazalo je da kod prvog sustava bolju otpornost ima premaz sušen IC zračenjem, dok je drugi sustav pokazao suprotno. Sve četiri vrijednosti pokazuju nisku otpornost na udar.

Određivanjem potencijala strujnog kruga dobiveno je da se potencijal premaza stabilizirao oko šestog dana jer su vrijednosti šestog i osmog dana približno jednake, odnosno njihova je razlika zanemarivo mala.

Elektrokemijskom impedancijskom spektroskopijom dobiveno je da nakon 24 sata izloženosti u elektrolitu svi premazi pokazuju otpornost na koroziju, s time da prvi sustav premaza (A i B) i IC sušeni uzorak drugog sustava (C) imaju dobru otpornost (logaritam impedancije je 8), a uzorak drugog sustava sušen na zraku (D) ima djelomično dobru zaštitu (logaritam impedancije je 6). Nakon 8 dana izlaganja u elektrolitu najbrže propadanje pokazuju IC sušeni premazi (A i C). Svim premazima smanjila se otpornost na koroziju, no prvi sustav premaza (A i B) još uvijek pokazuje dobru otpornost. Uzorak drugog sustava sušen na zraku (D) ima djelomičnu otpornost, dok IC sušeni uzorak drugog sustava premaza (C) pokazuje lošu zaštitu.

Ocjene ispitivanja nakon izlaganja u slanoj komori pokazuju da premazi imaju odličnu korozijsku otpornost iz razloga što ni na jednom uzorku nije došlo do mjehuranja, pucanja ni ljuštenja. Na većini uzoraka postoji neznatna količina hrđe (Ri 1) zbog lokalnih nečistoća na površini premaza. Stupanj korozije oko ureza na svim je uzorcima manji od 1,5 mm što je uvjet iz norme HRN EN ISO 12944-6.

Prilikom ispitivanja u klima komori nije došlo ni do mjehuranja, hrđanja, pucanja ni ljuštenja premaza što znači da su oba sustava premaza neovisno o načinu sušenja vrlo dobro otporna na velike oscilacije u vrijednostima temperature i udjela vlage u zraku.

7. ZAKLJUČAK

Korozija je vrlo štetan proces trošenja materijala koji se u industriji najčešće sprečava korištenjem organskih premaza. Postoje razne metode nanošenja istih koje se primjenjuju ovisno o uvjetima rada i vrsti predmeta na kojeg se premaz treba nanijeti. Danas industrija zahtjeva što brži, što jeftiniji i što produktivniji način proizvodnje pa se tako u industriji proizvodnje energetskih transformatora sve više primjenjuje IC sušenje premaza čime se smanjuje period sušenja, a time se može skratiti i vrijeme čekanja da premaz umreži i period prije pakiranja i isporuke predmeta.

U eksperimentalnom dijelu rada ispitana su dva sustava premaza koji se koriste za zaštitu transformatora. Sušenje pomoću IC zraka višestruko je ubrzalo proces sušenja premaza u odnosu na atmosfersko sušenje. Dobiveni rezultati pokazuju da ne dolazi do značajnijih odstupanja u svojstvima IC sušenih premaza i premaza sušenih na zraku. IC sušeni premazi uglavnom su pokazali nešto bolja mehanička svojstva (prionjivost i tvrdoća) u odnosu na premaze koji su se sušili na zraku. Što se tiče korozijskih svojstava, određivanje otpora premaza elektrokemijskom impedancijskom spektroskopijom, ali i rezultati nakon ispitivanja u slanoj i klima komori pokazali su da oba sustava premaza imaju vrlo dobru otpornost na uvjete kojima su bili izloženi, te su postojani za uvjete koji su predloženi na tehničkom listu.

IC metoda sušenja još uvijek nije našla široku primjenu zbog složenosti parametara poput debljine stijenke predmeta koji se suši, udaljenosti IC panela od predmeta, vrste premaza, kuta dopiranja do teško dostupnih mjesta i mnogih drugih, no za jednostavne geometrije može postići ogromnu uštedu vremena i novaca. Potrebno je provesti još mnoga ispitivanja kako bi se našla točna korelacija između kritičnih parametara i optimizirao proces sušenja, ali i potaknuo razvoj brzосуšećih premaza čiji bi sastav bio prilagođeniji svim zahtjevima koje ovakav način sušenja premaza iziskuje.

LITERATURA

- [1] Stupnišek-Lisac, Ema. 2007. *Korozija i zaštita konstrukcijskih materijala*. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije. Zagreb.
- [2] <http://impact.nace.org/economic-impact.aspx>, pristupljeno 21.6.2023.
- [3] Juraga, Ivan; Alar, Vesna; Stojanović, Ivan. 2014. *Korozija i zaštita premazima*. Fakultet strojarstva i brodogradnje. Zagreb.
- [4] Jones, Denny A. 1996. *Principles nad prevention of corrosion*. Prentice Hall. New Yereesy. SAD.
- [5] Fontana, Mars. 1987. *Corrosion engineering*. McGrae-Hill Book Company. Singapur. Australija.
- [6] HRN EN ISO 8501-1:2007: *Priprema čeličnih podloga prije nanošenja boja i srodnih proizvoda -- Vizualna procjena čistoće površine -- 1. dio: Stupnjevi hrđanja i stupnjevi pripreme nezaštićenih čeličnih površina i čeličnih površina nakon potpunog uklanjanja prethodnih prevlaka*
- [7] Juraga, Ivan; Linardon, Lorena; Šimunović, Vinko; Stojanović, Ivan. 2005. *Zaštita od korozije u brodogradnji*. EGE: energetika, gospodarstvo, ekologija, etika. 2. 133-141.
- [8] Croll, S. G. 2020. *Surface roughness profile and its effect on coating adhesion and corrosion protection*: Progress in Organic Coatings, 148
- [9] Munger, Charles G. 1999. *Corrosion Prevention by Protective Coatings*. Second Edition. NACE International. Houston. SAD
- [10] Esih, Ivan. 2003. *Osnove površinske zaštite*. Fakultet strojarstva i brodogradnje. Zagreb.
- [11] <https://www.teknos.com/globalassets/teknos.com/industrial-coatings/metal-wet-paints-general/handbook-for-corrosion-protection.pdf>, pristupljeno 27.6.2023.
- [12] <https://www.hempelyacht.com/hr-hr/-/media/images/hempelyacht/files/downloads/brochures-and-manuals-all-lang/2022/pm-2022/paint-manual-cro-2022.pdf>, pristupljeno 27.6.2023.
- [13] https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2006_04_39_958.html, pristupljeno 27.6.2023.
- [14] <https://www.promat.com/-/dam/promapaint-sc3-upute-za-nanoenje-promat/pi12397/original/reaktivni-protupozarni-premaz-promapaint-sc3-upute-za-nanosenje-promat-hr-2018-05.pdf?v=-857795459>, pristupljeno 27.6.2023.

- [15] Bartley, Ian. 1999. *Coating curing – the role of infrared*. Pigment & Resin Technology. Vol 28.
- [16] https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/a743968a-901e-4aa4-9117-d7d5dedac0d5/html/14444_Razlaganje_svetlosti_na_boje.html, pristupljeno 27.6.2023.
- [17] ISO 20473:2007: Optics and photonics – Spectral bands
- [18] <https://www.pfonline.com/articles/understanding-infrared-curing>, pristupljeno 27.6.2023.
- [19] Mujumdar, A.S. 2006. *Handbook of Industrial Drying*, Taylor & Francis Group,
- [20] <https://carbit.com/infrared-ovens-cure-coatings-quickly/>, pristupljeno 27.6.2023.
- [21] Nienhuis, J.G. Review on drying and curing techniques of coatings
<http://virtual.vtt.fi/virtual/proj6/coste18/nienhuisdryingpaper.pdf>, pristupljeno: 27.6.2023.
- [22] <https://www.drbeasleys.com/blog/2015/07/24/ir-curing>, pristupljeno 27.6.2023.
- [23] Roberge, Pierre. 1999. *Handbook of Corrosion Engineering*. Mc-Graw-Hill. New York
- [24] https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Iron_pillar?uselang=hr, pristupljeno 27.6.2023.
- [25] https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Iron_pillar?uselang=hr, pristupljeno 27.6.2023.
- [26] HRN EN ISO 12944-2:2018 *Boje i lakovi -- Zaštita čeličnih konstrukcija od korozije zaštitnim sustavom boja -- 2. dio: Razredba okoliša*
- [27] HRN EN ISO 12944-5:2019 *Boje i lakovi -- Zaštita od korozije čeličnih konstrukcija zaštitnim sustavima boja -- 5. dio: Zaštitni sustavi boja*
- [28] HRN EN ISO 12944-1:2018 *Boje i lakovi -- Zaštita čeličnih konstrukcija od korozije zaštitnim sustavom boja -- 1. dio: Opći uvod*
- [29] H. van Droffleaar; Von Jim A. Atkinson. 1995. *Corrosion and its control*. NACE International. Houston
- [30] Tehnički list Hempaprime Multi 500
- [31] Tehnički list Hempthane HS 55610
- [32] Tehnički list ESD 182
- [33] Tehnički list EMS 30
- [34] Tehnički list ASD 47

- [35] Loveday, David; Peterson, Pete; Rodgers, Bob. 2004. *Evaluation of organic coatings with electrochemical impedance spectroscopy. Part 2: application of EIS to coatings*, J. Coat. Technol. 10 str. 88-93
- [36] HRN EN ISO 4628-2:2016 *Boje i lakovi -- Procjena propadanja prevlaka -- Označivanje količine i veličine grešaka i intenzivnosti jednoličnih promjena izgleda -- 2. dio: Ocjena stupnja mjehuranja*
- [37] HRN EN ISO 4628-3:2016 *Boje i lakovi -- Procjena propadanja prevlaka -- Označivanje količine i veličine grešaka i intenzivnosti jednoličnih promjena izgleda -- 3. dio: Ocjena stupnja hrđanja*
- [38] HRN EN ISO 4628-4:2016 *Boje i lakovi -- Procjena propadanja prevlaka -- Označivanje količine i veličine grešaka i intenzivnosti jednoličnih promjena izgleda -- 4. dio: Ocjena stupnja raspucavanja*
- [39] HRN EN ISO 4628-5:2016 *Boje i lakovi -- Procjena propadanja prevlaka -- Označivanje količine i veličine grešaka i intenzivnosti jednoličnih promjena izgleda -- 5. dio: Ocjena stupnja ljuštenja*
- [40] HRN EN ISO 4628-8:2013 *Boje i lakovi -- Procjena propadanja prevlaka -- Označivanje količine i veličine grešaka i intenzivnosti jednoličnih promjena izgleda -- 8. dio: Ocjenjivanje stupnja raslojavanja i korozije oko ogrebotine ili drugog umjetnog oštećenja*