

Svojstva IC vodorazrjeđivih premaza

Cindrić, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:183276>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-30**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Ivan Cindrić

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Profesor:

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

Student:

Ivan Cindrić

Zagreb, 2020.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu, pod nadzorom i uz stručnu pomoć izv. prof. dr. sc. Ivana Stojanovića.

Zahvaljujem se svojem mentoru izv. prof. dr. sc. Ivanu Stojanoviću na dostupnosti, usmjeravanju, korisnim savjetima, vodstvu i pomoći pri izradi ovog rada.

Zahvaljujem se gospođi Danieli Rakeli – Ristevski iz tvrtke Končar – Metalne Konstrukcije na pomoći, strpljenju, savjetima i vođenju pri izvedbi eksperimentalnog dijela rada.

Zahvaljujem se svim djelatnicima Laboratorija za zaštitu materijala na Fakultetu strojarstva i brodogradnje na srdačnoj i ugodnoj atmosferi.

Zahvaljujem se zaposlenicima tvrtke Končar – Metalne Konstrukcije, posebno Marku Grgiću i Josipu Šijakoviću, na strpljenju, volji i vremenu prilikom izrade rada.

Hvala svim mojim prijateljima što su me motivirali i učinili godine studiranja zanimljivim i zabavnim.

Posebno se zahvaljujem svojoj djevojci Petri na strpljenju i podršci tijekom pisanja rada.

Najveće hvala ide mojoj obitelji, posebno mami i tati, koji su mi omogućili školovanje i bili najveća podrška tijekom čitavog studiranja.

Ivan Cindrić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602 - 04 / 20 - 6 / 3	
Ur. broj: 15 - 1703 - 20 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **IVAN CINDRIĆ**

Mat. br.: 0035195945

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Svojstva IC vodorazrjedivih premaza**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Protection properties of IR water-based coatings**

Opis zadatka:

Zaštitno djelovanje premaza ovisi o vrsti veziva, debljini premaza, stupnju poroznosti i prijanjanju. U industrijskoj zaštiti vrlo je bitno vrijeme sušenja premaza, zbog čega se premazi stalno unapređuju i uvode novi načini otvrdnjavanja.

U teorijskom dijelu rada obraditi zaštitu od korozije premazima koji suše pri atmosferskim uvjetima i premazima koji suše infracrvenim zračenjem (IC) s naglaskom na vodorazrjedive premaze. Usporedno prikazati njihova svojstva, te prednosti i nedostatke. Posebno obraditi mogućnosti industrijske primjene. Opisati opremu za IC sušenje.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je pripremiti uzorke IC sušenjem. Odrediti utjecaj udaljenosti od IC izvora zračenja na brzinu sušenja. Osmisliti i provesti laboratorijska ispitivanja korozijske otpornosti premaza nanijetih na čelične ispitne uzorke. Analizirati rezultate i izvesti zaključke.

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

Zadatak zadan:
24. rujna 2020.

Rok predaje rada:
26. studenog 2020.

Predviđeni datum obrane:
30. studenog do 4. prosinca 2020.

Zadatak zadao:

doc. dr. sc. Ivan Stojanović

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	IV
POPIS TABLICA.....	IX
POPIS OZNAKA I KRATICA	XI
SAŽETAK.....	XIII
SUMMARY	XIV
1. UVOD	1
2. ZAŠTITA ORGANSKIM PREVLAKAMA	2
2.1. Komponente premaza.....	2
2.2. Mehanizmi sušenja organskih premaza.....	4
2.2.1. Fizikalno sušenje	5
2.2.2. Kemijsko sušenje	7
2.3. Sustav premaza.....	9
2.3.1. Temeljni premaz.....	9
2.3.2. Međupremaz.....	14
2.3.3. Završni premaz.....	15
2.4. Mehanizam zaštitnog djelovanja premaza	15
2.4.1. Učinak barijere	15
2.4.2. Učinak inhibitora.....	16
2.4.3. Galvanski učinak	17
3. VODORAZRJEDIVI PREMAZI.....	18
3.1. Svojstva vodorazrjedivih premaza	18
3.2. Vrste vodorazrjedivih premaza	19
3.3. Prednosti i nedostaci vodorazrjedivih premaza.....	21
4. INFRACRVENO (IC) SUŠIVI PREMAZI	22

4.1. Mehanizam rada IC zračenja	23
4.2. Vrste IC emitera	25
4.3. Razvoj tehnologije.....	28
4.3.1. NIR (eng. <i>Near infrared</i>) sušenje.....	29
4.4. Primjena IC lampi	30
4.4.1. Proizvodnja plastičnih posuda.....	30
4.4.2. Ugljične IC lampe srednjih valnih duljina u automobilske industriji	32
4.5. Prednosti i nedostaci IC sušenja premaza	34
5. EKSPERIMENTALNI RAD	36
5.1. Mikroklimatski uvjeti	37
5.2 Priprema površine	38
5.2.1. Određivanje hrapavosti površine.....	39
5.2.2. Određivanje čistoće površine	40
5.3. Nanošenje premaza	41
5.4. IC sušenje	42
5.4.1. „Flash-off“ vrijeme	43
5.4.2. Utjecaj parametara na brzinu IC sušenja.....	45
5.4.3. Kombinacija sušenja: IC i sobna temperatura.....	48
5.5. Mjerenje debljine suhog filma.....	50
5.6. Ispitivanje prionjivosti u tvrtki Končar MK.....	51
5.7. Ispitivanja u tvrtki CHING.....	53
5.8. Ispitivanja u Laboratoriju za zaštitu materijala na FSB-u	56
5.8.1. Ispitivanje u vlažnoj komori.....	58
5.8.2. Ispitivanje u slanoj komori	60
5.8.1. Ispitivanje prionjivosti urezivanjem mrežice („Cross-cut“ test).....	62

5.8.2. Ispitivanje tvrdoće premaza olovkama.....	66
5.8.3. Ispitivanje tvrdoće po Buchholzu.....	68
5.8.4. Ispitivanje prionjivosti vlačnom metodom.....	69
5.8.5. Elektrokemijska impedancijska spektroskopija	72
6. REZULTATI I RASPRAVA	78
6.1. IC sušenje	78
6.1.1. Analiza utjecaja parametara na vrijeme sušenja	78
6.1.2. Analiza kombiniranog sušenja sustava premaza.....	83
6.2. Analiza ispitivanja u Laboratoriju za zaštitu materijala.....	85
6.2.1. Ispitivanje u vlažnoj komori.....	86
6.2.2. Ispitivanje u slanoj komori.....	86
6.2.3. Ispitivanje prionjivosti urezivanjem mrežice („Cross-cut“ test).....	87
6.2.4. Ispitivanje prionjivosti vlačnom metodom („Pull-off“ test).....	87
6.2.5. Ispitivanje tvrdoće olovkama	88
6.2.6. Ispitivanje tvrdoće prema Buchholzu.....	88
6.3. EIS analiza.....	89
6.3.1. Etalon	89
6.3.2. Vlažna komora	92
6.3.3. Slana komora.....	93
6.3.4. Suma otpora	94
7. ZAKLJUČAK	95
8. LITERATURA.....	98
PRILOZI.....	100

POPIS SLIKA

Slika 1.	Komponente premaza.....	2
Slika 2.	Podjela premaza prema načinu sušenja [4]	5
Slika 3.	Formiranje filma kod boja na bazi otapala [6]	6
Slika 4.	Formiranje filma kod boja na bazi vode [6]	6
Slika 5.	Formiranje filma kod oksidacijskog sušenja [6]	7
Slika 6.	Formiranje filma pri dvokomponentnom sušenju [6].....	8
Slika 7.	Peteroslojni sustav premaza [4].....	9
Slika 8.	SEM slika prikazuje svojstvo samoobnavljanja aktiviranog cink-epoksi temeljnog premaza [7].....	12
Slika 9.	SEM slika aktiviranog cink-epoksi temeljnog premaza u kojemu staklene kuglice blokiraju širenje mikropukotine [7].....	12
Slika 10.	Standardni (lijevo) i aktivirani (desno) cink-epoksi temeljni premaz nakon 1259 sati ispitivanja u slanoj komori prema normi ISO 9227 [7].....	13
Slika 11.	Rezultati EDS snimanja pokazuju cinkove soli (obojane zeleno) oko staklenih kuglica i prisutnost atoma klora u cinkovim solima (crveno) [7]	14
Slika 12.	Učinak nepropusnih listićavih pigmenata u premazu [6]	16
Slika 13.	Učinak inhibitora [6]	16
Slika 14.	Galvanski efekt zaštite premazima [6]	17
Slika 15.	Spektar elektromagnetskog zračenja [11]	22
Slika 16.	Podjela IC spektra [13].....	24
Slika 17.	Proces otvrdnjavanja IC zračenjem [18]	24
Slika 18.	Električni IC emiteri [19]	25
Slika 19.	Dijelovi katalitičkog IC emitera korištenog za provođenje eksperimentalnog dijela rada s ispitivanim uzorcima u Končar MK [13].....	27
Slika 20.	Cjelokupan sustav za provođenje IC ispitivanja korišten u Končar MK	27

Slika 21.	Dijelovi IC emitera za sušenje premaza korištenog u Končar MK	28
Slika 22.	Otvrdnjavanje boje na posudama IC ugljičnim lampama [22].....	31
Slika 23.	IC kabina za sušenje lisnatih zavojnih opruga [23].....	32
Slika 24.	IC kabina za sušenje premaza nanesenih na branike automobila [24]	33
Slika 25.	IC kabina za sušenje praškastih premaza nanesenih na felge automobila [24].....	33
Slika 26.	Korištenje reflektirajućih podloga za pristup površinama koje nisu direktno izložene IC zračenju	35
Slika 27.	Elcometer 319.....	38
Slika 28.	Kabina za sačmarenje u AKZ odjelu tvrtke Končar MK (lijevo) i oprema za sačmarenje (lijevo)	38
Slika 29.	Ispitni uzorci prije (lijevo) i poslije (desno) sačmarenja	39
Slika 30.	Komparator hrapavosti	39
Slika 31.	Usporedba pripremljene površine s komparatorom hrapavosti prema HRN EN ISO 8503-1:2012.....	40
Slika 32.	Usporedba pripremljene površine s fotografijom iz standarda HRN EN ISO 8501-1:2007	40
Slika 33.	Priprema boje za zračno prskanje.....	41
Slika 34.	Nanošenje premaza na uzorke zračnim prskanjem	41
Slika 35.	Mjerenje debljine mokrog filma (DMF) češljem	42
Slika 36.	Pojava mjehurića nakon IC sušenja vodorazrjedivih premaza uslijed nedovoljnog „flash-offa“ odnosno sušenja na zraku prije korištenja IC lampe	44
Slika 37.	Postolje za IC sušenje ispitnih uzoraka s različitim udaljenostima (40, 60, 80 i 100 mm) od IC lampe.....	46
Slika 38.	Mjerenje debljine suhog filma (DSF) premaza uređajem Elcometer 456.....	51
Slika 39.	Ispitni uzorci nakon testa prionjivosti vlačnom metodom („pull-off“) s pripadajućim rezultatima	52

Slika 40.	Referentni ispitni uzorci prije (lijevo) i poslije (desno) 1440 h slane komore te pripadajuće „pull-off“ vrijednosti prionjivosti	54
Slika 41.	IC sušeni ispitni uzorci poslani iz Končara u CHING, prije (gore) i poslije (dolje) 1440 h slane komore te pripadajuće „pull-off“ vrijednosti prionjivosti	55
Slika 42.	Ispitni uzorci nakon 21 dan sušenja na sobnoj temperaturi za ispitivanja u laboratoriju	57
Slika 43.	Vlažna komora u Laboratoriju za zaštitu materijala i ispitni uzorci u njoj	59
Slika 44.	Ispitni uzorci nakon provedenih 30 dana u vlažnoj komori	59
Slika 45.	Slana komora u Laboratoriju za zaštitu materijala i ispitni uzorci u njoj.....	60
Slika 46.	Ispitni uzorci nakon 60 dana provedenih u slanoj komori	61
Slika 47.	Ocjenjivanje stupnja korozije oko ureza	62
Slika 48.	Set za ispitivanje prionjivosti urezivanjem mrežice.....	63
Slika 49.	Skala za ocjenjivanje prionjivosti po normi HRN EN ISO 2409.....	63
Slika 50.	Urezivanje mrežice i lijepljenje trake za test prionjivosti	64
Slika 51.	Uređaj za ispitivanje tvrdoće premaza olovkama prema normi HRN EN ISO 15184	66
Slika 52.	Ispitivanje tvrdoće premaza olovkama.....	67
Slika 53.	Utisno tijelo za ispitivanje tvrdoće po Buchholzu.....	68
Slika 54.	Izmjerena duljina otiska na premazu pod stereomikroskopom	69
Slika 55.	Postupak ispitivanja prionjivosti vlačnom metodom	70
Slika 56.	Ekvivalentni krug korišten za opisivanje impedancijskih spektara u eksperimentu [25]	72
Slika 57.	Mjerna oprema za EIS.....	73
Slika 58.	Nyquistov dijagram – etalon nakon 60 dana u 5%-tnoj otopini NaCl	76
Slika 59.	Nyquistov dijagram – ispitni uzorak nakon 720 h ispitivanja u vlažnoj komori .	76
Slika 60.	Nyquistov dijagram – ispitni uzorak nakon 1440 h ispitivanja u slanoj komori...	77

Slika 61.	Utjecaj debljine lima i udaljenosti ispitnih uzoraka od direktnog IC zračenja na vrijeme sušenja, za premaz EMD 156 HS.....	79
Slika 62.	Utjecaj debljine lima i udaljenosti ispitnih uzoraka od indirektnog IC zračenja na vrijeme sušenja, za premaz EMD 156 HS.....	79
Slika 63.	Utjecaj debljine lima i udaljenosti ispitnih uzoraka od direktnog IC zračenja na vrijeme sušenja, za premaz HV 186.....	80
Slika 64.	Utjecaj debljine lima i udaljenosti ispitnih uzoraka od indirektnog IC zračenja na vrijeme sušenja, za premaz HV 186.....	81
Slika 65.	Utjecaj debljine lima i udaljenosti ispitnih uzoraka od direktnog IC zračenja na vrijeme sušenja, za premaz HV 43.....	82
Slika 66.	Utjecaj debljine lima i udaljenosti ispitnih uzoraka od indirektnog IC zračenja na vrijeme sušenja, za premaz HV 43.....	82
Slika 67.	DSF ispitnih uzoraka sušenih kombinacijom IC i sobne temperature za ispitivanja u Končaru i CHING-u.....	83
Slika 68.	Rezultati testova prionjivosti kombinirano sušenih ispitnih uzoraka, provedenih u Končaru i CHING-u.....	84
Slika 69.	Rezultati testova prionjivosti ispitnih uzoraka u CHING-u: prije i poslije ispitivanja u slanoj komori (1440 h).....	84
Slika 70.	Debljine suhog filma ispitnih uzoraka ispitivanih u Laboratoriju za zaštitu materijala.....	86
Slika 71.	„Pull-off“ test na ispitnim uzorcima sušenim na sobnoj temperaturi i ispitivanim u Laboratoriju za zaštitu materijala.....	87
Slika 72.	Izmjerene vrijednosti tvrdoće po Buchholzu na ispitnim uzorcima iz Laboratorija za zaštitu materijala.....	88
Slika 73.	Potencijal otvorenog strujnog kruga ispitivan kroz 60 dana – etalon.....	90
Slika 74.	Izmjerene vrijednosti otpora premaza pri 0,1 Hz praćenih kroz 60 dana – etalon.....	90
Slika 75.	Bodeov prikaz impedancije u funkciji frekvencije – etalon nakon 60 dana u 5%-tnoj otopini NaCl.....	91

Slika 76.	Bodeov prikaz faznog kuta u funkciji frekvencije – etalon nakon 60 dana u 5%-tnoj otopini NaCl	91
Slika 77.	Bodeov prikaz impedancije u funkciji frekvencije – ispitni uzorak nakon 720 h ispitivanja u vlažnoj komori	92
Slika 78.	Bodeov prikaz faznog kuta u funkciji frekvencije – ispitni uzorak nakon 720 h ispitivanja u vlažnoj komori	92
Slika 79.	Bodeov prikaz impedancije u funkciji frekvencije – ispitni uzorak nakon 1440 h ispitivanja u slanoj komori	93
Slika 80.	Bodeov prikaz faznog kuta u funkciji frekvencije – ispitni uzorak nakon 1440 h ispitivanja u slanoj komori	93
Slika 81.	Suma otpora ispitnih uzoraka	94

POPIS TABLICA

Tablica 1. Kemijska i fizikalna svojstva veziva premaza [4].....	3
Tablica 2. Testovi traženja dovoljnog vremena predušenja, koje je potrebno vodorazrjedivom premazu na zraku, prije korištenja IC lampe.....	44
Tablica 3. Brzine IC sušenja premaza EMD 156 HS ovisno o udaljenosti od izvora zračenja, debljini ispitnih uzoraka i načinu zračenja (direktno ili indirektno)	47
Tablica 4. Brzine IC sušenja premaza HV 186 ovisno o udaljenosti od izvora zračenja, debljini ispitnih uzoraka i načinu zračenja (direktno ili indirektno)	47
Tablica 5. Brzine IC sušenja premaza HV 43 ovisno o udaljenosti od izvora zračenja, debljini ispitnih uzoraka i načinu zračenja (direktno ili indirektno)	48
Tablica 6. Kombinacija sušenja sustava premaza IC zračenjem i sušenjem na sobnoj temperaturi te pripadajuća vremena sušenja slojeva premaza.....	50
Tablica 7. Izmjerene vrijednosti dobivene „pull-off“ testom te vrste odvajanja od površine .	52
Tablica 8. Debljine suhog filma (DSF) referentnih uzoraka B1 i B2 nanesenih u CHINGU	53
Tablica 9. Izmjerene vrijednosti „pull-off“ testova ispitnih uzoraka prije i nakon 1440 h slane komore te vrste odvajanja čunjića od površine	54
Tablica 10. Ocjene stupnja mjehuranja i hrđanja ispitnih uzoraka nakon 1440 h slane komore te komentar o pojavi korozije ispod filma.....	56
Tablica 11. Debljina suhog filma ispitnih uzoraka 1-7	58
Tablica 12. Ocjene prionjivosti etalona te uzoraka iz vlažne i slane komore	65
Tablica 13. Ocjene tvrdoće etalona te uzoraka iz vlažne i slane komore.....	67
Tablica 14. Izmjerene duljine otiska na premazu pod stereomikroskopom.....	69
Tablica 15. Izmjerene vrijednosti odvajanja valjčića (sa i bez kružnog ureza oko njih) od površine premaza.....	71
Tablica 16. Izmjerene vrijednosti i vrsta odvajanja valjčića od površine premaza na uzorku koji nije išao u komore te uzorcima iz vlažne i slane komore.....	71

Tablica 17. Potencijali otvorenog strujnog kruga i vrijednosti otpora premaza pri 0,1 Hz praćeni kroz 60 dana za ispitni uzorak koji nije ispitan u komorama tj. etalon s 5%-tnom NaCl otopinom kao elektrolitom	74
Tablica 18. Izmjerene vrijednosti kapaciteta i otpora ispitnih uzorka	75

POPIS OZNAKA I KRATICA

IC	Infracrveno	/
DSF	Debljina suhog filma	mm
UV	Ultraljubičasto (eng. <i>Ultraviolet</i>)	/
PUR	Poliuretan	/
eng.	Engleski	/
SEM	Skenirajući elektronski mikroskop	/
EDS	Energijski disperzivna spektroskopija	/
HOS	Hlapljivi organski spojevi	/
KIR	Katalitička infracrvena radijacija	/
UNP	Ukapljeni naftni plin	/
njem.	Njemački	/
MK	Metalne Konstrukcije	/
AKZ	Antikorozivna zaštita	/
CHING	njem. <i>Chemische Industrie Erlangen GmbH</i>	/
2K	Dvokomponentni	/
1K	Jednokomponentni	/
EIS	Elektromagnetska impedancijska spektroskopija	/
RH	Relativna vlažnost (eng. <i>relative humidity</i>)	/
DMF	Debljina mokrog filma	/
DSF	Debljina suhog filma	/
H	Visoko (eng. <i>high</i>)	/
VH	Jako visoko (eng. <i>very high</i>)	/
M	Ocjena stupnja korozije	mm
c	Širina zone korozije	mm

w	Širina reza skalpela	mm
AC	izmjenična struja (eng. <i>alternating current</i>)	/
DC	istosmjerna struja (eng. <i>direct current</i>)	/
T	Vrijeme	u danima
R1	Otpor elektrolita	Ωcm^2
R2	Otpor premaza	Ωcm^2
R3	Polarizacijski otpor (otpor prijenosu naboja)	Ωcm^2
C1	Kapacitet premaza	F/cm^2
C2	Kapacitet dvosloja	F/cm^2
ΣR	Zbroj otpora	Ωcm^2

SAŽETAK

Rad se sastoji od teorijskog i eksperimentalnog dijela.

U teorijskom dijelu rada obrađena je zaštita od korozije premazima koji suše pri atmosferskim uvjetima i premazima koji suše infracrvenim (IC) zračenjem. Opisani su mehanizmi sušenja, zaštitnog djelovanja i sustavi premaza. Naglasak je stavljen na vodorazrjedive premaze zbog njihovog pozitivnog utjecaja na okoliš i smanjene količine hlapivih organskih spojeva (HOS) u atmosferi. Usporedno su prikazana njihova svojstva, prednosti i nedostaci te su nabrojane vrste. Također, objašnjen je mehanizam rada IC zračenja, a opisana je i oprema za IC sušenje. Poseban naglasak stavljen je na mogućnosti industrijske primjene.

U eksperimentalnom dijelu rada provedena je priprema ispitne površine, nanošenje premaza te IC sušenje. Izmjerena je debljina mokrog i suhog filma. Cilj ispitivanja bilo je utvrditi kako na brzinu IC sušenja utječu parametri poput udaljenosti od IC zračenja, debljine lima i načina zračenja. Osmišljena su i provedena ispitivanja korozijske otpornosti premaza. U tu svrhu provedena su ispitivanja otpornosti prema koroziji u slanoj i vlažnoj komori te ispitivanja tvrdoće, testovi prionjivosti premaza i elektrokemijska impedancijska spektroskopija. Napravljena je analiza i izvedeni su zaključci.

Ključne riječi: korozija, zaštita organskim premazima, vodorazrjedivi premazi, infracrveno (IC) sušenje i otvrdnjavanje, hlapivi organski spojevi (HOS), slana komora, vlažna komora, elektrokemijska impedancijska spektroskopija (EIS)

SUMMARY

The thesis consists of a theoretical and an experimental part.

In the theoretical part of the thesis, corrosion protection with coatings that dry under atmospheric conditions and coatings that dry with infrared (IR) radiation is elaborated. Drying and protective mechanisms, along with the coating systems are described. Emphasis is placed on water-based coatings due to their positive impact on the environment and reduced amounts of volatile organic compounds (VOCs) in the atmosphere. Their properties, advantages and disadvantages are shown comparatively, and the existing types are listed. Also, the mechanism of IR radiation is explained, and the equipment for IR drying is described. Special emphasis was placed on the possibilities of industrial application.

In the experimental part of the thesis, the surface test preparation, coating application and IR drying were performed. The wet and dry film thickness was measured. The aim of the study was to determine how the speed of IR drying is affected by parameters such as distance from IR radiation, sheet thickness and radiation mode. Corrosion resistance tests of coatings have been designed and performed. For this purpose, corrosion resistance tests in salt and wet chambers, hardness tests, coating adhesion tests and electrochemical impedance spectroscopy were performed. An analysis was made and conclusions were drawn.

Key words: corrosion, protection with organic coatings, water-based coatings, infrared (IR) drying and curing, volatile organic compounds (VOCs), salt chamber, humidity chamber, electrochemical impedance spectroscopy (EIS)

1. UVOD

Korozija kao fenomen pogađa veliki broj materijala koji se svakodnevno koriste te svijest o njoj kao izrazito razornom i štetnom djelovanju postaje sve jača. S jačanjem svijesti sve značajnija postaje primjena metoda zaštite od korozije i razvoj novih načina za njeno usporavanje, smanjivanje i suzbijanje.

Kako bi se smanjio ili izbjegao trošak uzrokovan korozijom važan je i pravilan izbor materijala, ne samo sa stajališta mehaničkih svojstava, nego i korozijske postojanosti. Konstrukcije su sve lakše jer se izrađuju od sve tanjih materijala, dok je okoliš kojemu su izložene sve agresivniji i stoga izbor materijala postaje pravi izazov za inženjere kako bi se izbjegli iznenadni, dodatni troškovi koji smanjuju radni vijek konstrukcije te dovode u opasnost ljude i okoliš u kojem oni rade. Zaštita korozije premazima jedan je od najrasprostranjenijih postupaka zaštite u tehnici, a jedan od osnovnih razloga tome je relativno niska cijena premaza u odnosu na druge metode zaštite od korozije.

Vodorazrjedivi premazi pronalaze sve veću primjenu u različitim granama industrije, kao što su prehrambena ili automobilska, jer pomažu u smanjenju štetnog utjecaja lakiranja na okoliš. Postoje ipak neki čimbenici koje treba uzeti u obzir prilikom prskanja. Vrijeme otvrdnjavanja (umrežavanja) vodorazrjedivog premaza može biti od kritične važnosti, ovisno o opsegu posla kojem se treba prilagoditi. Bilo da se radi o autolakireru koji svakodnevno popravljajući značajne količine automobila ili ako se radi o proizvođaču koji će trebati proizvesti više proizvoda u određenom periodu, vrijeme otvrdnjavanja će biti važno. Spomenuto vrijeme kod vodorazrjedivih premaza često može biti i do 24 h, osim ako se ne odaberu rješenja koja će ubrzati proces i pritom izbjeći stvaranje mjehuranja.

Jedan od načina kako se takvo sušenje može ubrzati, a da se pritom sačuvaju svojstva premaza, je i IC sušenje. Za dobar rezultat je neophodno pažljivo prilagođavanje IC emitera u pogledu valne duljine, oblika i izlazne snage svojstvima proizvoda koji se zagrijava. Zračenje prilagođeno apsorpcijskim svojstvima boje brzo se pretvara u toplinu unutar boje, a voda i druga otapala isparavaju, dok materijal i okolina ostaju hladniji i pošteđeni zagrijavanja. Na taj način IC sušenje ubrzava proizvodnju, poboljšava kvalitetu, a istovremeno štedi energiju i troškove. Infracrveno (IC) sušenje vodorazrjedivih premaza još uvijek je nedovoljno istraženo pa su i sami teoretski i eksperimentalni izvori podataka rijetki.

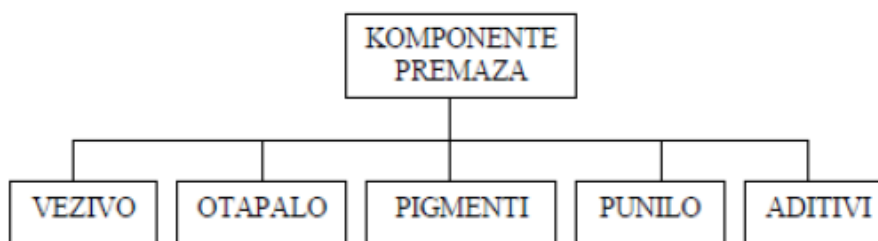
2. ZAŠTITA ORGANSKIM PREVLAKAMA

Organske prevlake imaju nezamjenjivu ulogu u zaštiti metalnih konstrukcija od korozije. Pritom, učinkovitost zaštite ne ovisi isključivo samo o svojstvima prevlake već i o karakteru same metalne osnove, pripremi površine i tehnologiji nanošenja prevlake. U praksi je stoga neophodno uzeti u obzir cijeli sustav i tehnologiju izvođenja zaštite uključujući i najčešće kompliciran sastav same prevlake [1].

Organskim se prevlakama smatraju sve one koje čini kompaktnima organska tvar tvorbom opne. Takvi se slojevi dobiju nanošenjem organskih premazanih sredstava (bojenjem i lakiranjem), uobičajenim podmazivanjem, plastifikacijom, gumiranjem i bitumenziacijom [2].

2.1. Komponente premaza

Sva organska premazna sredstva sadržavaju vezivo koje čini opnu prevlake, i otapalo/razrjeđivač koji obično otapa vezivo, a regulira viskoznost. Osim toga, premazna sredstva mogu sadržavati netopljive praškove (pigmente i punila) koji daju nijansu i čine premaze neprozirnim, kao i različite dodatke (aditive) [2]. Komponente premaza vidljive su na slici 1.



Slika 1. Komponente premaza [1]

1. **Vezivo** je smjesa jednostavnih ili složenih prirodnih ili sintetičkih smola i drugih kemijskih komponenata te kao takva čini neisparljivi dio medija boje. To su organske tvari u tekućem ili praškastom stanju koje povezuju sve komponente premaza, a nakon sušenja stvaraju tvrdi zaštitni sloj. Funkcija dodanih sastojaka jest poboljšanje performansi premaza, odnosno postizavanje trajnih i čvrstih, ujedno i fleksibilnih filmova dobre adhezije [2]. U tablici 1 prikazana su kemijska i fizikalna svojstva veziva premaza.

2. **Otapala** (vodena ili organska) daju viskozitet premazu te omogućavaju postizavanje točne debljine suhog filma premaza (DSF). Otapala su jedini faktor odnosa debljine mokrog i suhog filma premaza [3].
3. **Pigment** je bitan sastojak premaza koji daje pokrivnu moć, pojačava film premaza, daje mu boju, utječe na postojanost filma i štiti od UV zračenja [3].
4. **Punila** se u premaze dodaju zbog poboljšavanja mehaničkih svojstava, mazivosti i svojstva tečenja, zbog povišenja i sniženja sjaja i zbog poboljšanja svojstva barijere filma tj. zbog otpornosti prema difuziji vode i agresivnih plinova [2].
5. **Aditivi** imaju funkciju kontroliranja sušenja premaza. Funkcija sušila jest intervencija u intermedijarnim reakcijama vezanja kisika iz zraka na reaktivne molekule premaza (oksidacija ili površinsko sušenje), nakon čega slijedi polimerizacija premaza (proces unutrašnjeg sušenja filma) [3].

Tablica 1. Kemijska i fizikalna svojstva veziva premaza [4]

Vezivno sredstvo premaza	Svojstva							
	Postojanost nijanse i sjaja u atmosferijama	Mehanička postojanost	Toplinska postojanost	Otpornost na vodu	Otpornost na sol za otapanje leda (poledice)	Kemijska postojanost		
						- na kiseline	- na lužine	- na pare otapala
Alkid	±	±	-	±	-	±	-	±
Epoksidester	±	±	±	±	±	-	-	±
Uretanalkid	±	±	±	±	-	±	±	±
Poliakrilat	+	±	-	±	-	-	-	-
Polivinil	±	±	-	+	-	+	+	-
Klorkaučuk	±	±	-	+	+	+	+	-
Silikon	+	±	+	+	-	-	-	-
Silikat	±	+	+	+	+	-	-	+
2K-epoksid	-	+	±	+	+	±	+	+
2K-Poliurean	+	+	+	+	+	+	±	+
1K-Poliuretan FH	±	+	+	+	+	+	±	+
2K-Katran/Epoksid	-	+	±	+	+	+	+	-
1K-Katran/Poliuretan FH	-	+	±	+	+	+	+	-
+ visoka, ± srednja, - mala 2K – dvokomponenta veziva, 1K – jednokomponenta veziva, FH – veziva koja otvrdnjavaju pomoću vlage iz zraka								

Premazi djeluju na dva načina i to: aktivno i pasivno. Samim svojim prisustvom između površine i okoline stvaraju zonu koja odvaja površinu od utjecaja okoline. Pigmenti i vezivo će uvjetovati prijanjanje premaza za površinu i pasivnu ulogu premaza. Aktivna uloga premaza je u svojstvima koje premazi imaju. Tako aktivno djelovanje može biti [3]:

- pasivizirajuće: stvaranje dodatnog pasivnog zaštitnog filma – oksida,
- inhibitorsko: stvaranje inhibitorskog učinka korozije reakcijom između pigmenta i veziva ili okoline,
- neutralizirajuće: pigment posjeduje lužnata svojstva i neutralizira kiseline,
- katodno: sprječava koroziju galvanskim učinkom tako da propada pigment u premazu, a ne površina.

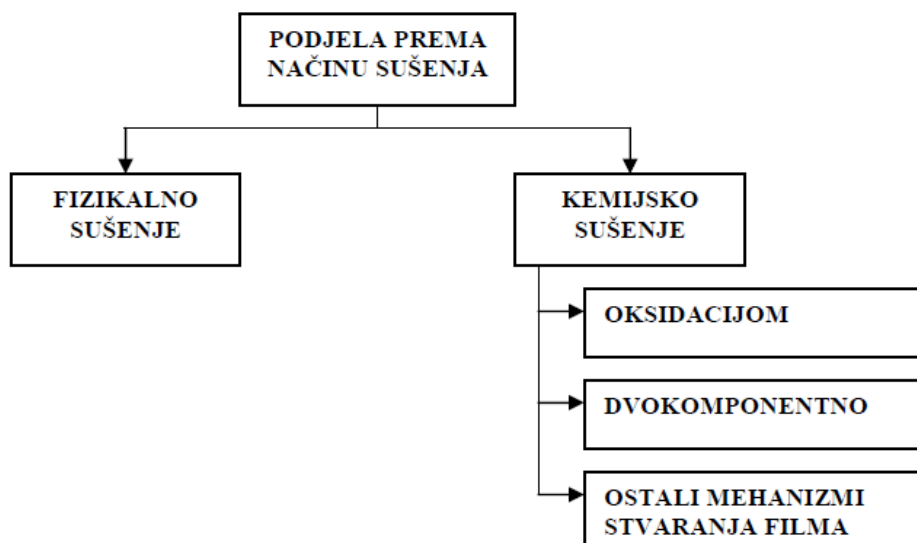
2.2. Mehanizmi sušenja organskih premaza

Glavni načini razvrstavanja premaznih sredstava su:

- prema sastavu, pri čemu se podjela obično osniva na vrsti veziva, ali katkad i na vrsti pigmenta, odnosno razrjeđivača otapala,
- prema osnovnoj svrsi (sredstva za zaštitu od korozije, od mehaničkog oštećivanja, od požara, od biološkog obraštanja, sredstva za dekoraciju, za električnu izolaciju, itd.),
- prema izgledu (bezbojne i različito obojane, mutne i sjajne),
- prema podlogama na koje se nanose (crni i obojeni metali, beton, drvo, itd.),
- prema broju sastojaka koji se miješaju prije nanošenja (jednokomponentna, dvokomponentna, višekomponentna sredstva),
- prema ulozi u premaznom sustavu (temeljna, međuslojna i pokrivna premazna sredstva, kitovi, itd.)
- prema mehanizmu sušenja (fizikalno isparavanje razrjeđivača/otapala, odnosno kemijsko otvrdnjavanje reakcijama u vezivu ili s vezivom).

S tehničkog aspekta najzanimljivija je podjela prema mehanizmu sušenja kako je prikazana na slici 2.

Isto tako valja naglasiti da postoji razlika između sušenja i otvrdnjavanja. Premaz može biti suh na dodir, ali ne i u potpunosti otvrdnut.



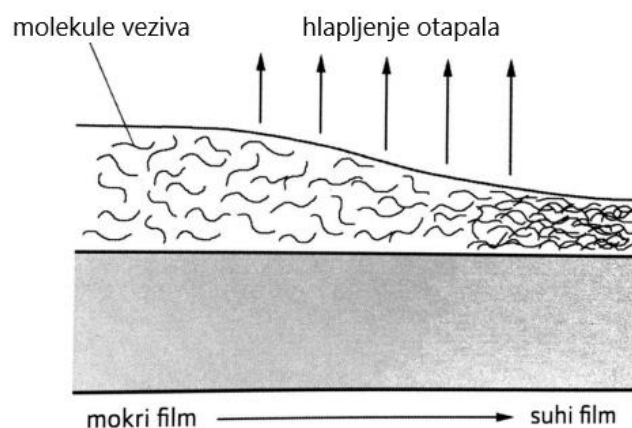
Slika 2. Podjela premaza prema načinu sušenja [4]

2.2.1. Fizikalno sušenje

Kada je prisutno fizikalno sušenje premaza, film se formira hlapljenjem otapala. Budući da je hlapljenje otapala fizička pojava, takve premaze onda nazivamo fizikalno sušenim. Fizikalno sušenje odvija se u tri faze [2, 5]:

1. Brzo hlapljenje otapala s površine. To za posljedicu ima povećanje koncentracije polimera, a u skladu s tim smanjenje aktivne površine isparavanja.
2. Hlapljenje otapala difuzijom kroz slojeve koncentrirane polimerne otopine. Rezultat toga je daljnje povećanje koncentracije polimera, a u skladu s tim prisutne makromolekule postaju sve više nepokretne.
3. Hlapljenje preostalog otapala u filmu.

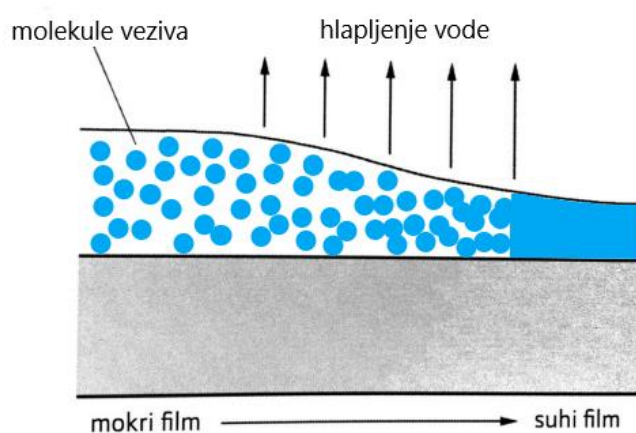
Nakon završetka procesa sušenje stvara se polimer koji je suh na prašinu. Izbor otapala je jako bitan budući da se cijeli postupak stvaranja filma vodio isključivo hlapljenjem otapala. Fizikalnim načinom suše visokomolekularni termoplastični polimeri: vinilne smole, klorkaučuk, bitumeni, nitroceluloza, termoplastične akrilne smole. Fizikalno suše boje na bazi otapala (slika 3) i boje na bazi vode (slika 4).



Slika 3. Formiranje filma kod boja na bazi otapala [6]

Svojstva boja na bazi otapala [4]:

- Reverzibilnost tj. premaz je godinama nakon nanošenja topiv u vlastitom ili jačim otapalima. Molekule otapala prodiru između molekula veziva, razdvajaju ih te rastvaraju vezivo.
- Osjetljivost na otapala (vlastita ili jača), prema gore navedenom.
- Temperaturna neosjetljivost za formiranje filma.
- Termoplastičnost tj. pri povišenim temperaturama postaju mekani.
- Odlična svojstva boje kao podloge pri nanošenju novog sloja.



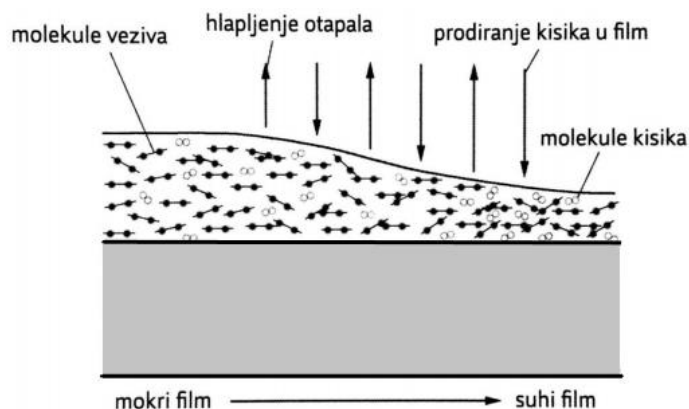
Slika 4. Formiranje filma kod boja na bazi vode [6]

Svojstva boja na bazi vode [4]:

- Reverzibilnost do određenog stupnja. Pomoćna veziva na bazi otapala, jednake ili veće moći otapanja, mogu ponovno otopiti film boje, dok samo dodavanje vode neće rezultirati ponovnom disperzijom filma boje.
- Osjetljivost na otapala (slična ili jača od vezivnih sredstava), prema gore navedenom.
- Temperaturna osjetljivost na formiranje filma: minimalna temperatura stvaranja filma je 5 °C, a minimalna temperatura aplikacije je 10 °C.
- Odlična svojstva boje kao podloge pri nanošenju novog sloja.

2.2.2. Kemijsko sušenje

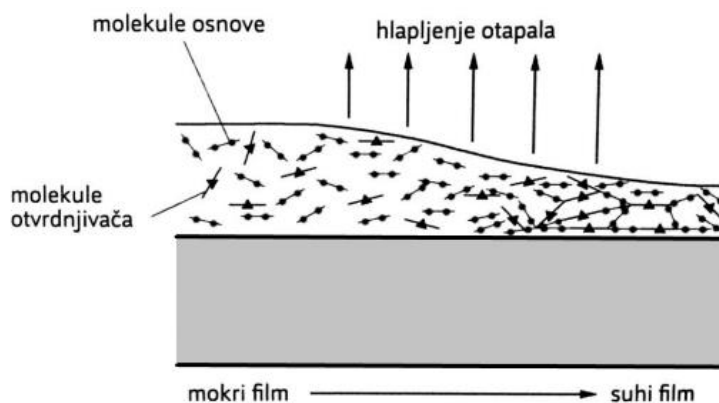
Oksidacijskim sušenjem (slika 5) konačan film se stvara hlapljenjem organskog ili vodenog otapala i reakcijom kisika i veziva. Ulja bilo kao samostalna veziva ili kao modifikacija u nekim složenijim vezivima su podvrgnuta ovoj vrsti sušenja. Vrijeme sušenja ovisi o temperaturi zato što je reakcija kisika i veziva pri nižim temperaturama puno sporija nego kod normalnih temperatura pa se u svrhu ubrzavanja, zbog sporosti reakcije, koriste katalizatori. Oksidacijski suše alkidi, uretan-alkidi i epoksi-esteri [2, 5].



Slika 5. Formiranje filma kod oksidacijskog sušenja [6]

Dvokomponentno sušenje (slika 6) koriste boje koje se sastoje od osnove (baze) i sredstva za otvrdnjivanje (komponente). Reakcijom između veziva i sredstva za otvrdnjivanje te hlapljenjem otapala ako je ono prisutno dolazi do stvaranja filma.

Osnova i sredstvo za otvrdnjivanje zamiješaju se neposredno prije upotrebe. Ovim postupkom otvrdnjuju epoksidi, epoksi-akrili, epoksi-vinili, PUR epoksi smole, PUR akrilne smole, PUR poliesteri, PUR polieteri [2, 5].



Slika 6. Formiranje filma pri dvokomponentnom sušenju [6]

Postoje i druge polimerizirajuće reakcije kod kojih film nastaje reakcijom veziva s vlagom u zraku (jednokomponentni poliuretan), s ugljičnim dioksidom u zraku (silikati) ili lančanom reakcijom polimerizacije nekoliko sati pri povišenim temperaturama od otprilike 200 °C [2, 5].

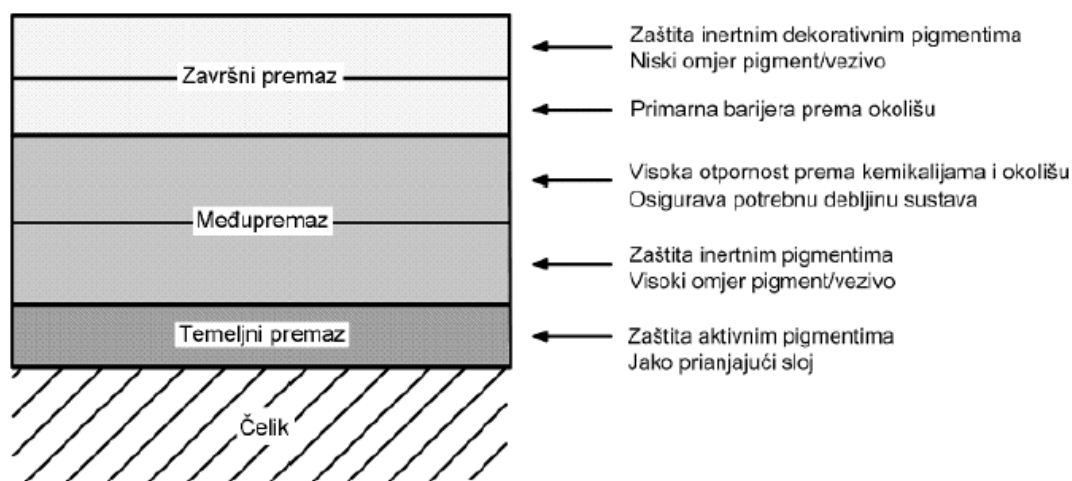
Svojstva boja koje kemijski otvrdnjavaju [4]:

- Nereverzibilnost, npr. suhi-kemijsko otvrdnjeni premaz nije topiv.
- Otpornost na otapala (direktna posljedica nereverzibilnosti).
- Ovisnost formiranja filma o temperaturi aplikacije, tj. postoji temperaturna granica ispod koje ne dolazi do polimerizirajuće reakcije.
- Postojanost na visoke temperature što znači da se film boje ne deformira pri višim temperaturama (otvrdnjeni film nije termoplastičan).
- Nanošenje novog sloja boje mora se izvršiti prije nego se završi potpuno otvrdnjavanje prijašnjeg sloja. Ako je otvrdnjavanje bilo završeno, potrebno je mehanički ohrapaviti površinu radi boljeg prijanjanja novog sloja boje.

U praksi se sušenje boja i lakova (osim kod fizikalnog sušenja) ne događa samo jednom metodom. Fizikalno sušenje (isparavanje otapala) uvijek prethodi kemijskom pri sušenju otapalnih i vodenih sustava na višim temperaturama [3].

2.3. Sustav premaza

Organski se premazi nanose na metalne površine obično u dva ili više slojeva te tako čine sustav premaza. Temeljni premazi osiguravaju adheziju na podlogu i sprječavaju koroziju, međupremazi čine vezu između temeljnog i završnog premaza te daju neprozirnost, povećavaju debljinu filma i poboljšavaju zaštitni učinak sustava, a završni premazi zadovoljavaju zahtjeve u vezi s nijansom boje, sjajem, lakoćom čišćenja, otporom na abraziju te štite prethodne premaze od utjecaja okoline [1]. Primjer jednog sustava premaza dan je na slici 7.



Slika 7. Peteroslojni sustav premaza [4]

2.3.1. Temeljni premaz

U ovom poglavlju više je pažnje posvećeno dvokomponentnom epoksidnom temelju koji se sastoji od pigmenta cinkovog praha u koncentraciji 92 – 94 % na osušeni film, u vezivu od epoksidne smole i poliamida kao ubrzivača, budući da se takav temelj koristio i u eksperimentalnom dijelu rada.

Takvi temeljni premazi cinkovog epoksida (eng. *zinc rich primer*) koriste se od 1960-ih i ustaljena su praksa u zaštiti čelika od korozije. Ovi sustavi koriste visoke koncentracije cinkovog praha kao pigmenta u organskom vezivu (epoksidu) kako bi stvorili galvanski učinak koji, nakon prodora elektrolita, štiti temeljnu čeličnu podlogu od korozije.

Čestice cinka aktivnije su od čelika i djeluju kao žrtvovana anoda u premazu koji korodira umjesto čelika kada je on izložen vodi, kisiku i/ili kloridima. Djelovanje galvanskog članka ovisi o pripremi podloge, jer i najmanja nečistoća prekida električni krug zaštite i deaktivira sistem. Iskustva na terenu, međutim, pokazuju da primeri cinkovog epoksida možda neće pružiti razinu korozijske zaštite koja se može dobiti pocinčavanjem vrućim uranjanjem ili anorganskim prevlakama od cinkovog silikata, te mogu doživjeti prerano pucanje zbog stvaranja mjehura i formiranja hrđe. Uz to, primeri cinkovog epoksida mogu pucati ako se predebelo nanose na podlogu, što dovodi do oštećenja premaza koji se često vide na zavarima [7].

Istraživači iz tvrtke Hempel A/S (Lyngby, Danska) razvili su novu tehnologiju organskih cink-epoksi temeljnih premaza koja se oslanja na kombinaciju cinkove prašine, šupljih staklenih kuglica i vlastitog aktivatora koji aktivira cink i pruža izvrsnu katodnu zaštitu s poboljšanim mehaničkim svojstvima (otpornost na pucnje) i prijanjanjem. Ova tehnologija aktivira cink tako da se on u premazu može u potpunosti iskoristiti da djeluje kao anoda. Korištenje staklenih kuglica omogućuje da premaz ima nižu volumnu koncentraciju pigmenta i više epoksidnog veziva, što poboljšava prijanjanje premaza. Jedinstveni nusprodukt korozije aktiviranog cinka ima samoobnavljajući učinak na premaz. Staklene kuglice blokiraju mikropukotine, a također stvaraju inhibitorni učinak prikupljanjem netopivih spojeva kisika, cinka i klorida na svojim površinama i zarobljavanjem tih spojeva u prevlaku kako ne bi dospjele na površinu čelika [7].

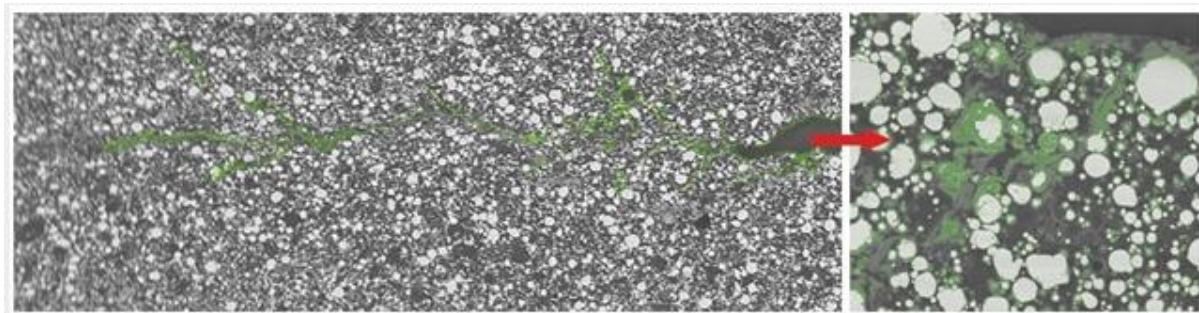
Električna vodljivost i djelotvorna katodna zaštita ovise o količini cinkove prašine koja se koristi u cink-epoksi temeljnih premaza. Ako je sadržaj cinka prenizak, organsko vezivo potpuno će zatvoriti cinkovu prašinu. To rezultira ograničenim ili nikakvim kontaktom između čestica cinka i, nakon toga, električna vodljivost je ograničena, što smanjuje ili uklanja katodnu zaštitu čelika. Količina cinkove prašine također utječe na fizička svojstva premaznog filma kao što su prijanjanje, kohezijska čvrstoća i mehanički integritet - svi važni čimbenici u određivanju vijeka trajanja sustava premaza. Pokušaji poboljšanja katodne zaštite premaza upotrebom viših razina cinka mogu negativno utjecati na mehanička i adhezijska svojstva premaza i rezultirati preuranjenim propuštanjem u premazu. Iako prekomjerni cink u prevlaci pruža izvrsnu katodnu zaštitu jer postoji dobar kontakt između čestica cinka i dobra vodljivost, prijanjanje na čelik, kohezijska čvrstoća i mehanička svojstva obično će biti nedostatni jer je udio organskog veziva prenizak u odnosu na sadržaj cinka.

Zbog toga je formulacija cink-epoksi temeljnog premaza toliko važna ako želi cjelokupni sustav premaza biti uspješan u pružanju zaštite od korozije pomoću katodne zaštite. S gledišta proizvođača premaza, vrlo je važno uravnotežiti formulaciju premaza, tako da ima odgovarajuću adheziju i najbolja moguća mehanička svojstva, a zadržava galvansku zaštitu od korozije od cinka [7].

Hempelov istraživački i razvojni tim proučavao je načine za poboljšanje učinkovitosti konvencionalnih epoksidnih prevlaka bogatih cinkom i 2007. godine došao do važnog otkrića - dok tipična standardna organska epoksidna prevlaka bogata cinkom sadrži otprilike 80 % cinka, samo jedna trećina njega zapravo doprinosi zaštiti od korozije. Istraživanje je pokazalo da je galvanskom reakcijom u premazu debljine suhog filma (DSF) od 60 do 80 μm utrošen samo cink smješten u 20 do 30 μm od čelika. Otprilike 60% cinka dodanog temeljnom premazu nije upotrijebljeno u galvanskoj reakciji [7].

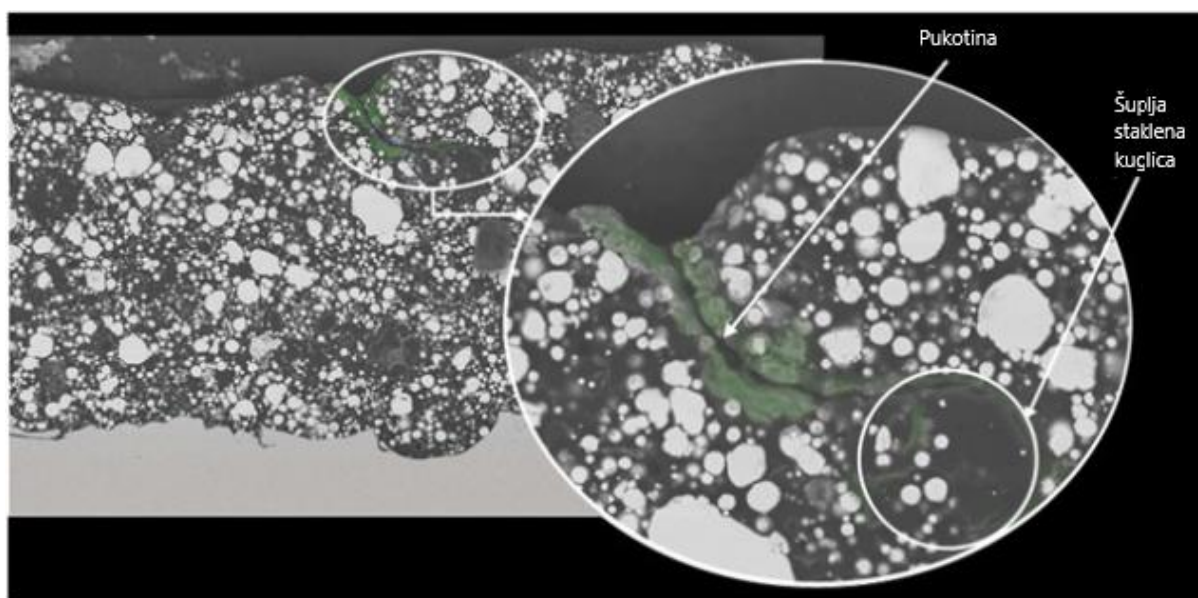
Njihovi naponi doveli su do razvoja tehnologije aktivatorskog cink-epoksi temeljnog premaza koja uključuje male šuplje staklene kuglice (veličine oko 40 μm) i poseban aditiv nazvan aktivator. Dodavanjem staklenih kuglica i aktivatora koji poboljšava vodljivost cijele matrice premaza, smanjuje se količina cinkove prašine (u odnosu na epoksidnu smolu) za učinkovitu katodnu zaštitu, a istovremeno održava težinski postotak cinkove prašine u suhom filmu u skladu s važećim standardima. S manjim volumenom cinka u prevlaci, dostupno je više epoksidnog veziva, što promiče bolja svojstva prijanjanja i mehaničke performanse. Zbog sinergije ovih komponenata, premaz pruža tri metode zaštite od korozije: galvansku, barijernu i inhibitorску [7].

Za galvansku zaštitu, aktivator povećava sposobnost cinka da provodi korozijsku struju kroz cijeli premaz, iako čestice cinka nisu u izravnom međusobnom kontaktu, što uvelike poboljšava katodnu zaštitu čelika. Svojstva barijere premaza i svojstva samoobnavljanja dobivaju se korozijskim produktom cinka. Uobičajeno je to cinkov oksid (ZnO), ali u aktiviranom cink-epoksi temeljnom premazu taj korozijski produkt je netopiva sol - cink klorid hidroksid hidrat. Ova netopiva sol tvori jednoliki zaštitni sloj na površini temeljnog premaza, koji djeluje kao prepreka koja blokira vodu, kisik i kloride da dođu do površine čelika. Uz to, nusproizvod brzo korodirajućeg aktiviranog cinka ispunjava sve mikropukotine u premazu, što u osnovi omogućava da se obloga sama zacjeljuje [7]. Karakteristika samoobnavljanja prikazana je na slici 8.



Slika 8. SEM slika prikazuje svojstvo samoobnavljanja aktiviranog cink-epoksi temeljnog premaza [7]

Dodatak šupljih staklenih kuglica poboljšava fizikalna svojstva premaza. Kuglice poboljšavaju otpornost filma na pukotine blokirajući širenje mikropukotina (slika 9), a pridonose i niskoj propusnosti premaza. Korozijski produkt cinka stvoren tijekom galvanske korozije djeluje kao čistač okoliša hvatanjem kloridnih iona koji difundiraju u premaz iz okoline [7].



Slika 9. SEM slika aktiviranog cink-epoksi temeljnog premaza u kojemu staklene kuglice blokiraju širenje mikropukotine [7]

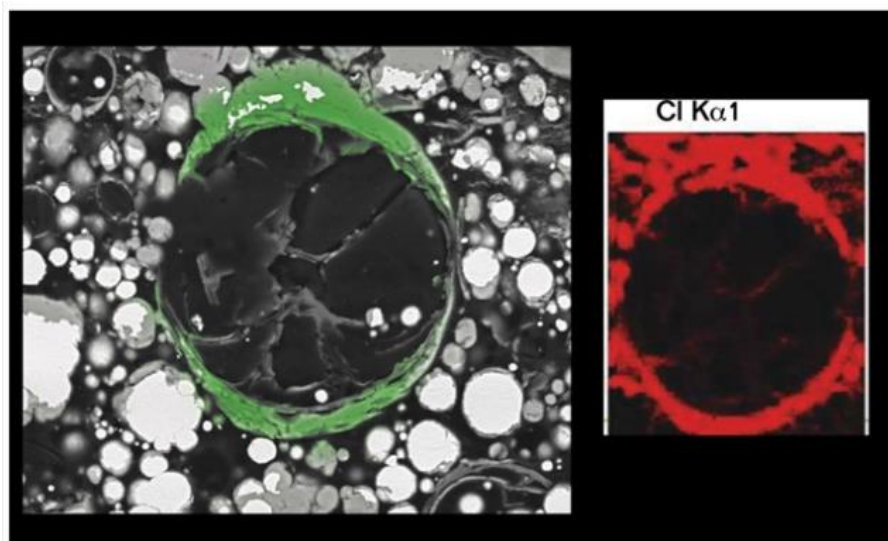
Aktivirani epoksidni premazi bogati cinkom obično se primjenjuju kao dio zaštitnog sustava s tri sloja koji također uključuje epoksidni međusloj i poliuretanski (PUR) završni premaz, koji je standard za zaštitu premazima na vanjskim čeličnim konstrukcijama poput mostova, naftnih platformi, obalnih elektrana i rafinerija u industrijskim i morskim okruženjima s visokom relativnom vlagom i agresivnom atmosferom kao što su obalna područja s visokim salinitetom (opisano u normi ISO 12944 kao okruženje C5). Uzorci premazani aktiviranim epoksidnim temeljnim premazom bogatim cinkom s DSF-om od oko 100 μm bili su izloženi ubrzanom ispitivanju u slanoj komori (prema normi ISO 9227) tijekom 1259 sati i prošli bez znakova hrđe što se može vidjeti na slici 10 [7].

Premaz je također pokazao dobre rezultate pri ispitivanju na prijanjanje (ISO 4624) i otpornost na pukotine (NACE TM0304). Snimke elektroničkim mikroskopom (SEM) snimljene su kako bi se procijenio stupanj pucanja i samoobnavljanja u njemu.



Slika 10. Standardni (lijevo) i aktivirani (desno) cink-epoksi temeljni premaz nakon 1259 sati ispitivanja u slanoj komori prema normi ISO 9227 [7]

Kako bi se kvalitativno procijenio kemijski sastav naslaga formiranih oko staklenih kuglica u temeljnom premazu, provedena su ispitivanja energijski disperzivne (razlučujuće) rendgenske spektroskopije (EDS). Atomi klorida otkriveni su u cinkovim solima koje su okruživale šuplje staklene kugle, što sugerira da kuglice djeluju kao površina za taloženje soli, a to pruža inhibitorski učinak [7]. Prikaz rezultata EDS snimanja vidljiv je na slici 11.



Slika 11. Rezultati EDS snimanja pokazuju cinkove soli (obojane zeleno) oko staklenih kuglica i prisutnost atoma klora u cinkovim solima (crveno) [7]

2.3.2. Međupremaz

Međupremaz predstavlja vezu između temeljnog i završnog premaza i može se sastojati od jednog ili više slojeva. Mora dobro prijanjati na temeljni premaz, a isto tako činiti dobru osnovu za prijanjanje završnog premaza. Zaštitno svojstvo ostvaruje se uglavnom preko listićavih pigmenata koji se slažu paralelno s površinom i otežavaju prodor vlage i kisika do podloge [4].

Među premaz mora osigurati [4]:

- potrebnu debljinu sustava premaza,
- jaku kemijsku otpornost,
- nepropusnost na vlagu,
- povećani električni otpor,
- jaku koheziju,
- jaku vezu između temeljnog i završnog sloja.

2.3.3. Završni premaz

Završni premaz se nanosi na ranije nanesene površine i daje tražene karakteristike površine kao što su nijansa boje, stupanj sjaja, izgled i otpornost na vanjske utjecaje. Manje je debljine od međupremaza, ali ima veću gustoću i tvori čvrsti sloj zbog većeg udjela veziva. Osim zaštitne funkcije, završni premazi mogu imati i specijalnu namjenu, kao što je sprječavanje obraštanja podvodnih dijelova konstrukcija, širenja požara ili onemogućavanje sklizanja [4].

Glavne funkcije završnog premaza su [4]:

- osigurati otpornost sustava premaza,
- tvoriti prvu barijeru prema utjecajima okoline,
- osigurati otpornost na kemikalije, vodi i različite vremenske uvjete,
- osigurati otpornost na trošenje,
- osigurati lijepi izgled.

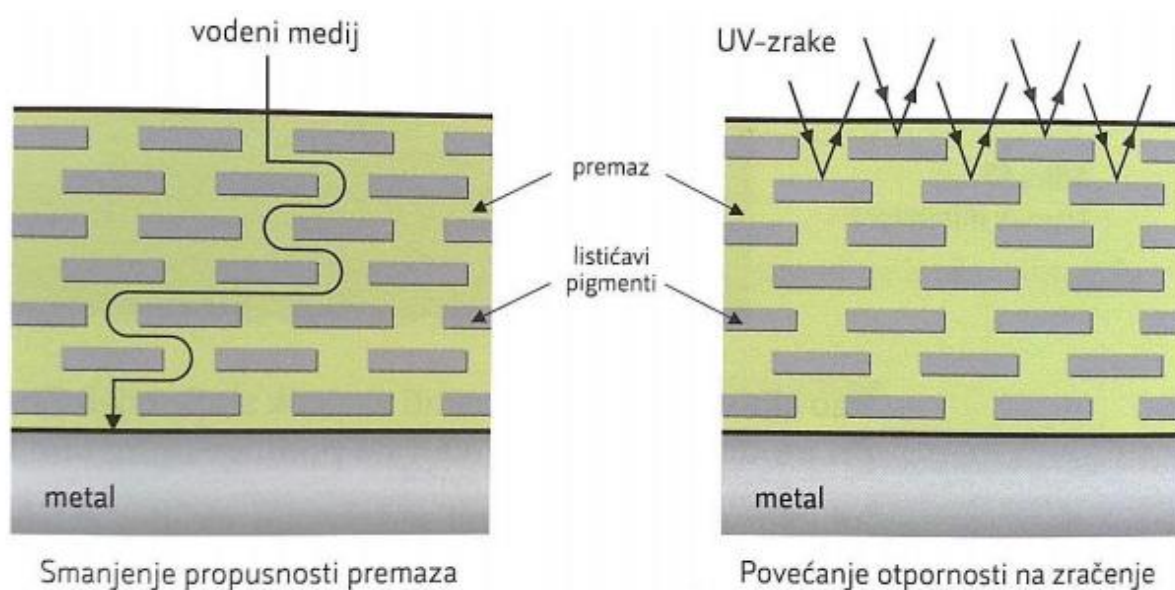
O međupremazima i završnim premazima više će govora biti u poglavlju o vodorazrjedivim premazima budući da u eksperimentalnom dijelu rada upravo se oni koriste za zaštitu ispitnih površina.

2.4. Mehanizam zaštitnog djelovanja premaza

Korozijska zaštita koju pružaju premazi kompliciran je i funkcionalan mehanizam i svoju zaštitnu funkciju ostvaruje bilo preko barijernog djelovanja zaštitnog sloja, inhibiranja korozijske pomoću aktivnog djelovanja pojedinih pigmenata u prevlaci ili galvanskog djelovanja pigmenata [1].

2.4.1. Učinak barijere

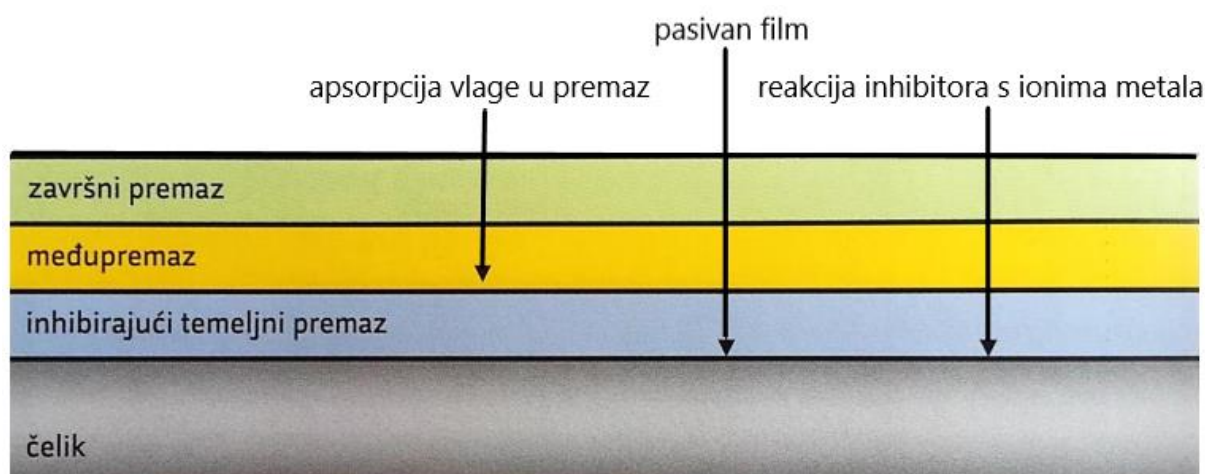
Učinak barijere (slika 12) se postiže primjenom debelih premaza (od 250 do 500 μm) vrlo niske propusnosti na vodu, čime se stvara barijera. Dodavanjem pigmenata u listićima, npr. aluminijska u listićima, može se postići učinak barijere i pri manjim debljinama zaštitnog filma. Pigmenti u listićima orijentirani su paralelno s površinom čelika, tako da medij ima duži i kompliciraniji prolaz oko pigmenata do površine koja se štiti. Zbog svojih svojstava nepropusnosti, učinak barijere je prvi i često jedini izbor zaštite premazima za čelik koji je neprekidno uronjen [1].



Slika 12. Učinak nepropusnih listićavih pigmenta u premazu [6]

2.4.2. Učinak inhibitora

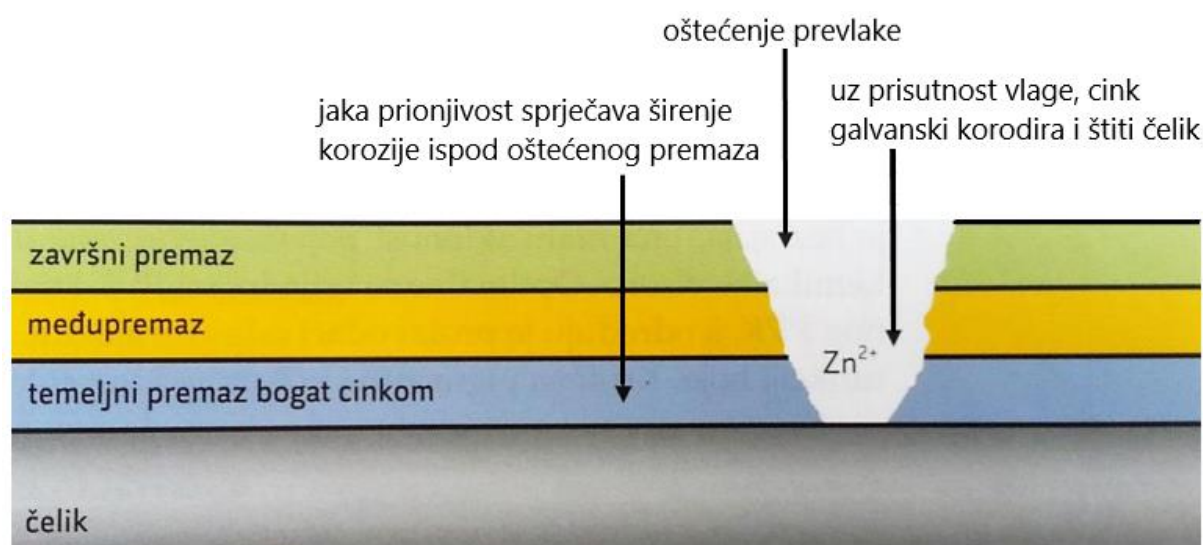
Učinak inhibitora (slika 13) postiže se uporabom temeljnih boja koje sadrže inhibitore što usporavaju ili sprečavaju proces korozije. Zbog toga što su topivi u vodi, nisu pogodni za zaštitu površina koje su duže vrijeme uronjene. Takvo izlaganje bi rezultiralo pojavom mjehurića i ranom uništavanju zaštitnog premaza [1].



Slika 13. Učinak inhibitora [6]

2.4.3. Galvanski učinak

Galvanski učinak (slika 14) može se postići bojama koje sadrže velike količine metalnog cinka. U ovom slučaju cink je neplemenitiji materijal i on će biti izložen koroziji, dok će čelik biti zaštićen. Kako su produkti korozije cinka malo topivi u vodi, prevlake s cinkovim prahom nisu pogodne za površine koje su neprestano uronjene u vodi, ali cinkov silikat se zbog svoje dobre otpornosti na otapala primjenjuje kao zaštita u spremnicima za otapala [1].



Slika 14. Galvanski efekt zaštite premazima [6]

3. VODORAZRJEDIVI PREMAZI

Ekološka osviještenost za zdrav i čisti okoliš ima danas značajan utjecaj i na proizvođače boja i premaza. Sastojci štetni za okoliš nestaju iz uporabe, a zamjenjuju ih okolišu i čovjeku prijateljski sastojci. Proizvođači stalno razvijaju nove tehnologije i proizvode koji poštuju najviše ekološke standarde i smjernice.

Okolišu prijateljske boje i premazi su izrađeni na bazi veziva koja se razrjeđuju vodom. Proizvođači takve proizvode različito deklariraju odnosno označuju pa na ambalaži možemo naći karakteristične nazive (npr. akril) ili simbole (npr. ribica).

Isparavanje u okolinu prilikom sušenja je osnovna značajka organskih otapala. Industrija premaza neprestano se suočava sa sve strožim zahtjevima za niskim emisijama te izazovima poput povećanja produktivnosti i smanjenjem troškova uz održavanje visokih performansi premaza. Tehnološki napredak opremio je industriju ekološki prihvatljivijim vodorazrjedivim sustavima koji nalaze sve više mjesta u zaštiti od korozije premazima. Postoje još uvijek čimbenici poput vremena sušenja koja su velika i zbog kojih se traže rješenja koja bi ubrzala proces.

3.1. Svojstva vodorazrjedivih premaza

Vodorazrjedivi premazi sadrže minimalni udio organskih otapala koja zagađuju okoliš, a kao otapalo i razrjeđivač koriste vodu. Primjenom vode smanjuje se emisija štetnih otapala u atmosferu. Utvrđeno je da je korištenjem vodorazrjedivih premaza godišnje smanjena emisija štetnih otapala za više od 50 g/l. Još jedna prednost vodorazrjedivih premaza je u tome što koriste antikorozivne pigmente koji ne sadrže teške metale (olova i kroma) koji su otrovni [8].

Vodorazrjedivi premazi nisu zapaljivi i ne podržavaju gorenje, kako u nanesenom, suhom stanju, tako niti u tekućem stanju. Upotrebom vode kao otapala, ne samo da se sadržaj hlapljivih organskih spojeva (HOS) smanjuje, nego se također pridodaje značaj biološkoj važnosti vode za sve žive organizme. Iako je kod vodorazrjedivih premaza HOS značajno smanjen, on svakako nije u potpunosti uklonjen te je i dalje nužno korištenje nekih organskih otapala radi (najčešće) otapanja polimernih čestica, doduše, u vrlo malim količinama. Ti dodatci organskih otapala nazivaju se koalescentima, a iz premaza isparuju nakon vode kako bi stigli otopiti disperzirane polimerne čestice, prije nego i oni ispare i stvori se tvrdi film [9].

Za isparavanje vodenog otapala, odnosno vode, potrebna je veća energija nego kod standardnih organskih otapala. Isto tako, bitnu ulogu ima relativna vlažnost okoline. Ako je previsoka relativna vlažnost okoline (gornja granica je 85 %), sušenje premaza je presporo. U slučaju da nema pomicanja i cirkulacije zraka, relativna vlažnost može doseći i razinu od 100%, pa u tom slučaju voda ne isparava iz premaza te ne može doći do sušenja, odnosno stvrdnjivanja. Štoviše, pri niskim temperaturama, sposobnost preuzimanja vlage vanjskog zraka je izrazito smanjena. Pri niskim temperaturama, ispod 10 °C, isparavanje vode je vrlo usporeno pa mnogi premazi na bazi vode nisu u stanju stvoriti tvrdi film [9].

Tri su faze postupka stvaranja filma [9]:

1. Hlapljenje vode i vodotopivih otapala koji ostavljaju gusto pakirani sloj lateks čestica.
2. Deformacija čestica iz njihovog sfernog oblika što ima za posljedicu kontinuirani, ali slabi film.
3. Koalescencija – relativno spor proces u kojem se polimerne molekule raspršuju i stvaraju mrežu čime se jača film. Veoma je važna minimalna temperatura stvaranja filma, tj. najniža temperatura pri kojoj koalescent dovoljno djeluje da stvori film. Najvažniji čimbenik kontrole minimalne temperature stvaranja filma T_s (temperatura staklenja) polimera u česticama. Većina boja ovog tipa formira filmove koalescencijom pri sobnoj temperaturi.

3.2. Vrste vodorazrjedivih premaza

Podjela vodorazrjedivih premaza može se temeljiti na načinu prevođenja veziva u tekuće stanje te na osnovu veličine polimernih čestica koje sadrže.

Po načinu provođenja veziva u tekuće stanje imamo [9, 10]:

1. **Vodotopljive smole.** Vodotopljivi sustavi kod kojih su individualne molekule veziva potpuno topljive u vodi. Ove vrste vodorazrjedivih premaza proizvedene su u organskom otapalu, koalescentu (pomoćnom organskom otapalu), najčešće u alkoholu, glikol- eteru i drugim otapalima koji su topljivi u vodi, postupcima polimerizacije ili polikondenzacije. Reducirane su vodom kako bi se dobila disperzija veziva u vodi. Radi povećanja hidrofilnosti dodaju se najčešće funkcionalne grupe na bazi amina, koje imaju svojstvo da se dobro otapaju u vodi. Hlapivost amina vrlo je važna za premaze. Postoji li manjak amina, može doći do separacije faza u premazu.

Dodatkom većeg udjela amina poskupljuje premaz i povećava se HOS. Najčešća veziva korištena kod ovog tipa vodorazrjedivog premaza su alkidi, poliesteri, poliakrilati, epoksidi i epoksi-esteri. Ove boje karakteriziraju visok sjaj, dobra korozijska postojanost, dobre pigmentacija i stabilnost.

2. **Vodene disperzije.** Vodorazrjedivi sustavi sastavljeni od disperzija krutih, netopljivih polimernih čestica u vodi. Da bi se izbjeglo nakupljanje polimernih čestica u veće nakupine preporuča se mehaničko miješanje boje. Polimerne čestice proizvedene su emulzijskom polimerizacijom najčešće poliakrilatnog veziva. Dodatak koalescenata (obično manje od 5 % mase) olakšava stapanje polimernih čestica. Isparavanjem vode, koncentracija koalescenta je sve veća te postaje dovoljna da otapa čestice veziva. Voda u procesu sušenja isparava prije koalescenata. Površinski aktivatori omogućuju disperziju polimera u vodi. Najzastupljenije vodene disperzije su akrilne boje koje se široko upotrebljavaju za vanjsku i unutrašnju zaštitu. Akrilne boje su brzosušive, otporne su na lužine, imaju izvrsnu prionjivost, otporne su na UV svjetlo te posjeduju dugotrajnu i izvrsnu elastičnost i čvrstoću. Vodene disperzije koriste se za zaštitu premazima poroznih materijala.
3. **Vodene emulzije.** Vodorazrjedivi sustavi sastavljeni od fino raspršenih polimernih čestica u vodi. Po sastavu su slične vodenim disperzijama. Glavna razlika je u veličini disperziranih čestica - u vodenim emulzijama one su veće. Emulzijski premazi sastavljeni su od disperzija tekućih polimera proizvedenih emulzijskom polimerizacijom. Kao i kod disperzija, polimerne čestice ne tope se u vodi. Njihovim netopljenjem u vodi omogućeno je povećanje njihove molekulske mase i na taj način povećanje njihove postojanosti, bez utjecaja na viskoznost premaza. Upravo zbog tog svojstva, emulzijski premazi pokazuju najbolja mehanička svojstva, osobito čvrstoću, kemijska svojstva te najveću otpornost od svih triju grupa vodorazrjedivih premaza. Uz to, emulzijski premazi imaju i najveću trajnost. Kao i prethodne dvije skupine, i vodenim emulzijama se dodaju koalescenti koji pospješuju topljivost odnosno spajanje veziva. Najčešće se koriste emulzije na bazi epoksidnog veziva. Od sva tri tipa premaza na bazi vode, vodene emulzije se upotrebljavaju najviše.

Podjela na osnovi veličine polimernih čestica je identična prije navedenoj podjeli, pa su tako kod potpunog topljenja veziva (vodotopljive smole) čestice manje od 0,01 μm , kod vodenih disperzija veličina čestica je u rasponu 0,01-0,1 μm , a kod vodenih emulzija veličina čestica je u rasponu 0,1-1,0 μm .

3.3. Prednosti i nedostaci vodorazrjedivih premaza

Glavni nedostaci za vodorazrjeđive premaze u industrijskoj zaštiti jesu klimatski uvjeti, temperatura $> 5^{\circ}\text{C}$ i relativna vlažnost $< 85\%$, te da nisu za zaštitu uronjenih konstrukcija, dok je njihova glavna prednost ekološka prihvatljivost.

Prednosti [8, 9]:

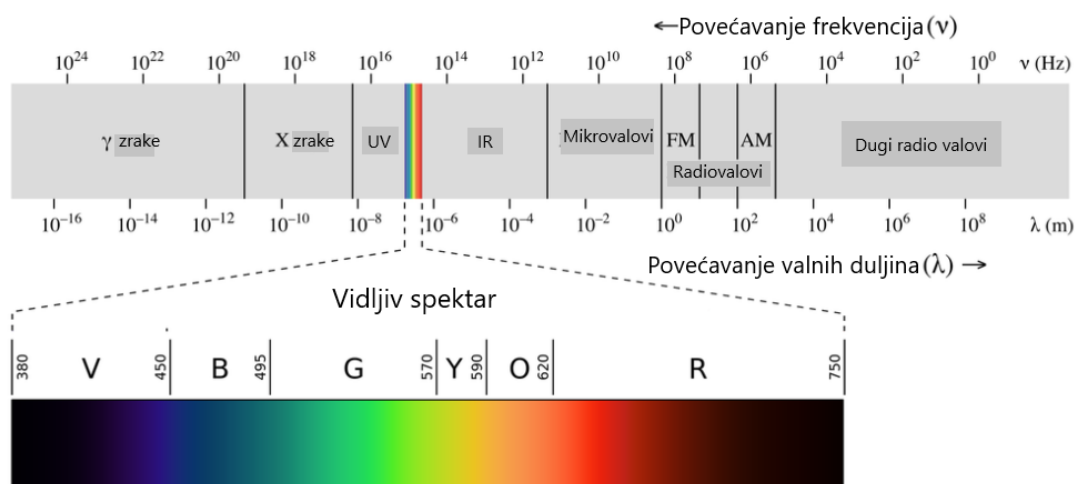
- smanjena emisija hlapivih organskih spojeva (HOS),
- mogu se rabiti konvencionalni primjenski postupci,
- mogućnost primjene na različitim materijalima,
- kraći međupremazni interval,
- manja otrovnost i miris,
- manja zapaljivost,
- povećana sigurnost radnika,
- lako čišćenje alata vodom i
- manji troškovi zbrinjavanja opasnog otpada.

Nedostaci [8, 9]:

- osjetljivi su na temperaturu nanošenja (minimalna temperatura aplikacije je 5°C),
- osjetljivi na visoku vlagu (nepodobni za uronjene dijelove konstrukcija),
- sklonost pjenjenju (tijekom proizvodnje i prilikom nanošenja),
- osjetljivost na slabiju pripremu površine,
- ograničeno dobivanje visokosjajnih dijelova površine,
- smanjena korozijska otpornost prema agresivnim medijima,
- manja temperaturna otpornost,
- linije za proizvodnju i posude za skladištenje trebaju biti od plastike ili nehrđajućeg čelika te
- viša cijena.

4. INFRACRVENO (IC) SUŠIVI PREMAZI

Infracrvena (IC) energija je vrsta radijacije, a spada između područja vidljive svjetlosti i mikrovalova u elektromagnetskom spektru (slika 15). Kao i drugi oblici elektromagnetske energije, IC putuje u valovima i postoji poznata veza između valne duljine, frekvencije i razine energije, a to je sljedeće: kako se energija (u ovom slučaju toplina) povećava, tako valna duljina pada.



Slika 15. Spektar elektromagnetskog zračenja [11]

Otvrdnjavanje premaza pokriva širok spektar tehnologije, od konvencionalnog grijanja do stvrdnjavanja elektronskim snopom, a uključuje dvije dobro utvrđene tehnologije, infracrvene i ultraljubičaste (UV), djelujući na suprotnim krajevima vidljivog spektra. Mehanizam otvrdnjavanja pomoću UV zraka oslanja se na aktivaciju fotoinicijatora u posebno formuliranim bojama i lakovima [12].

Infracrveno zračenje u industrijskom sektoru nalazi se od kasnih 1930-ih, u početku koristeći komercijalne žarulje za osvjetljenje opremljene posebnim vanjskim reflektorima. Tehnika se pokazala vrlo uspješnom za pečenje emajla (eng. *enamels*) od sintetičkih smola na karoserije automobila i uspješno je prebačena na proizvodnu liniju. U Drugom svjetskom ratu, infracrveno zračenje postalo je šire prepoznato kao tehnika za ubrzavanje završne obrade metala, posebno za vojnu opremu i, iako su žarulje koje su se koristile bile izrazito niskih intenziteta snage prema današnjim standardima, nudili su mnogo brže sušenje i otvrdnjavanje od konvekcijskih peći tog vremena [12].

Sredinom 1950-ih industrija motornih vozila je opet bila pokretačka snaga iza sve većeg broja infracrvenih instalacija, ali stare su žarulje sada bile zamijenjene novim kvarcnim cijevima, koje su mnogo manje i nudile su mnogo veći intenzitet zračenja [12].

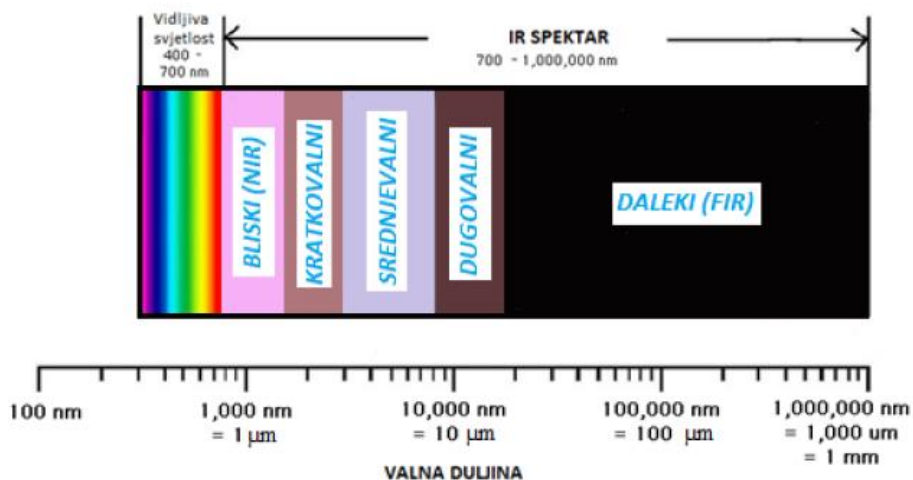
Danas su infracrvene lampe/emiteri dostupni u najrazličitijim oblicima i konfiguracijama, a uključuju keramičke emitere, emitere s metalnom oblogom i lampe s ugljičnim vlaknima, iako su najpopularniji i dalje oni kvarcni. Međutim, najvažniji napredak u infracrvenoj tehnologiji vjerojatno je bio način na koji su iskorištene razne korisne valne duljine infracrvenog zračenja da bi njihova primjena bila maksimalna [12].

4.1. Mehanizam rada IC zračenja

Infracrveno zračenje zauzima onaj dio elektromagnetskog spektra koji se nalazi neposredno uz vidljivo svjetlo, a proteže se od 0,78 μm do 200 μm . Tehnički prikladni dio ovog spektra proteže se od 0,8 μm do 10 μm , a zatim se dalje dijeli na zračenje kratkog, srednjeg i dugog vala. U praksi, vršna valna duljina emitiranog zračenja regulirana je radnom temperaturom niti emitera, s tim da emiteri većih valnih duljina imaju temperaturu žarne niti između 500 °C i 750 °C, a srednjevalni emiteri imaju temperaturu žarne niti između 850 °C i 1200 °C, dok kratkovalni emiteri imaju temperaturu žarne niti između 2000 °C i 2500 °C [12].

Za optimalne performanse je važno da je valna duljina emitiranog zračenja usklađena s apsorpcijskim karakteristikama materijala koji se zrači. Na primjer, dugovalno zračenje manje je osjetljivo na razliku u boji i široko se koristi za plastiku. Srednjevalno zračenje lako apsorbira vodu, čineći ga pogodnim za uklanjanje vlage. Lako ga apsorbiraju mnoge plastike i boje, visoko je energetski učinkovit i idealan je za postupke otvrdnjavanja boja i prahova. Srednje valne brzine poznate su kao vrlo produktivne za ubrzavanje isparavanja otapala. Kratki val ima visok intenzitet radijacije, a samim time je i prodorniji nego dugi val i može pružiti izuzetno brzo stvrdnjavanje. Kratke valne duljine IC spektra se ne koriste za sušenje iz jednostavnog razloga prevelikog gubitka energije [12].

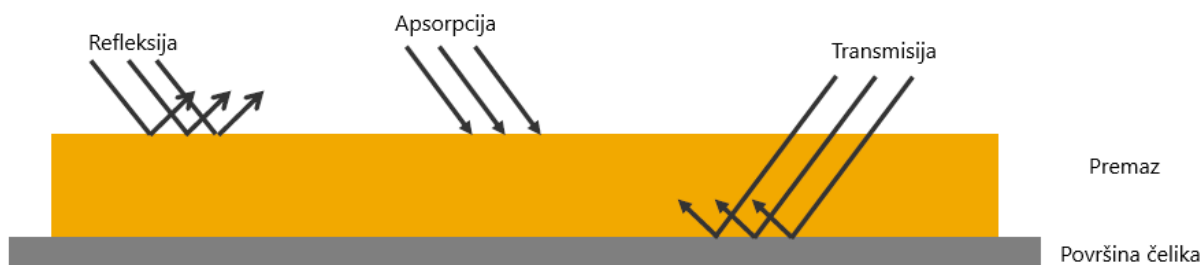
U novije vrijeme postoji i još jedna dodatna podjela, koja dodaje još i bliski (eng. *Near*, NIR) IC te daleki (eng. *Far*, FIR) IC spektar elektromagnetskih valova. Danas se najčešće koriste emiteri NIR spektra. Podjela elektromagnetskog infracrvenog spektra prikazana je na slici 16.



Slika 16. Podjela IC spektra [13]

Najčešće se IC emiteri kombiniraju s konvekcijskim sušenjem. IC emiteri mogu biti električni (ugljični i volframovi emiteri) ili se temelje na zagrijavanju keramičkih ploča sagorijevanjem plina. Za razliku od konvekcije, koja prvo grije zrak kako bi prenijela energiju do dijela zaštićenog organskim premazom, IC energija može biti apsorbirana direktno na premaz, a naknadno može biti transmitirana odnosno prenesena i do podloge [14, 15].

Kada je oprema za IC sušenje ispravno podešena za upotrebu, i apsorpcija (zagrijavanje premaza) i transmisija odnosno prijenos (u obliku radijacije) mogu postati primarne vrijednosti za postizanje ubrzanog sušenja (slika 17). Upravo iz tog razloga, razni pigmenti koji se dodaju u organske premaze koje će biti ubrzano sušeni IC emiterima služe upravo da bi povećali apsorpciju i transmisiju [16, 17].



Slika 17. Proces otvrdnjavanja IC zračenjem [18]

4.2. Vrste IC emitera

IC radijacija može biti dobivena iz električnih ili plinskih „izvora“ s time da će se ovdje veća pozornosti dati plinskom katalitičkom IC emiteru budući da se s takvim radilo u eksperimentalnom dijelu rada.

U slučaju **električnog IC emitera** (slika 18), volframova vlakna uglavnom proizvode kratke valove (temperature površine 1500 – 2200 °C), a nikromova vlakna proizvode valove srednje valne dužine (od 450 do 650 °C). Vlakna se najčešće nalaze u kvarcnim cijevima. Svjetiljke i vlakna tvore IC emiter koji je najčešće združen i s nekom vrstom reflektora koji služi za fokusiranje energije. Također, i zidovi odnosno oplata komore za sušenje koriste se kao sekundarni reflektor. Reflektori mogu biti načinjeni od plemenitih metala kao što je zlato kako bi se postigla optimalna refleksija i čistoća IC zraka. [14, 15].



Slika 18. Električni IC emiteri [19]

Plinski IC emiteri koriste plamen da bi zagrijale keramički emiter koji stvara IC radijaciju. Postoje i sistemi koji rade bez plamena, tzv. „*flameless systems*“ koji katalitički oksidiraju plin. Plinski IC emiteri mogu emitirati valove srednje i duge valne dužine, a emisijski spektar je često širi nego kod IC emitera električnih izvedbi.

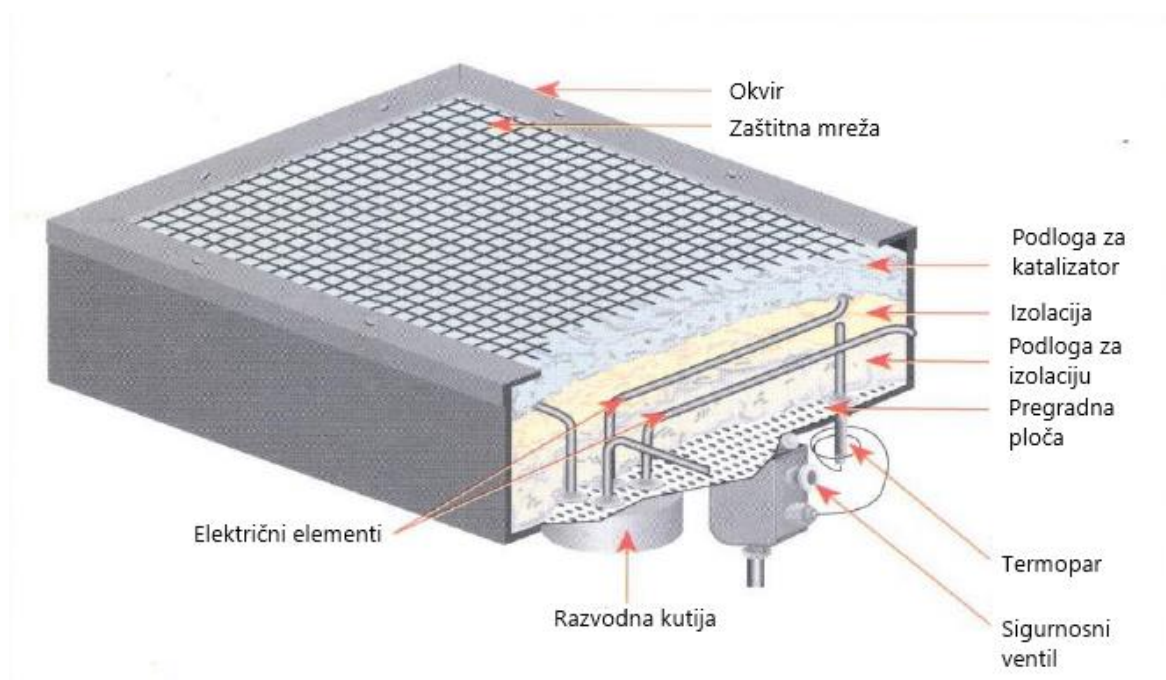
Plinski IC emiteri obično se uparaju s grijalicama koje rade na principu plinske konvekcije da bi bilo moguće postići ubrzanu sušenje koje konvekcija sama ne može postići [14, 15].

Posebna vrsta plinskih IC emitera su katalitički IC emiteri koji rade na principu plinski pogonjene (UNP ili prirodni plin) katalitičke infracrvene radijacije (KIR) s valnim duljinama između 2 i 10 μm . Plinsko katalitičko IC sušenje je tehnologija bez plamena. Dolazi do egzotermnog kemijskog procesa (izgaranje) plina koji se pretvara u energiju, odnosno katalitičkim procesom postaje energija IC vala. Materijali od kojih se izrađuju katalizatori su najčešće platina i paladij. Tipične emisivnosti (učinkovitosti zračenja) većine boja, lakova, plastičnih materijala, vode itd. rezultiraju mogućnošću primanja valnih duljina između 6 i 8 μm . Zbog podudarnosti između valnih duljina koje primaju i zrače, energija se prenosi vrlo učinkovito [13].

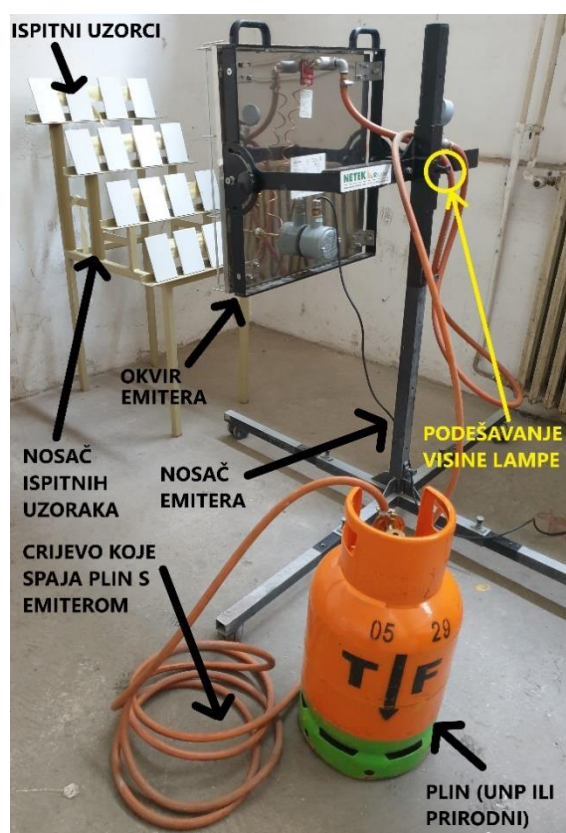
Katalizator je potrebno prethodno zagrijati, prije uvođenja plina, na minimalno 110 °C. Predgrijavanje se obično vrši električnim grijacim elementima u razdoblju od 10 do 15 minuta. Tada se može uvesti gorivi plin, isključiti električnu energiju i u roku od 5 minuta stabiliziranja površina katalizatora emitira IC zrake, ravnomjerno raspoređene po površini. Točna valna duljina i intenzitet IC zračenja mogu se kontrolirati ulaznim tlakom plina (obično moduliranim u rasponu od 3 do 30 mbar). Prije ponovnog korištenja uređaj se mora u potpunosti ohladiti [13].

Na slici 19 prikazan je model katalitičkog plinskog IC emitera koji je korišten pri provođenju eksperimentalnog dijela rada u tvrtki Končar MK sa označenim dijelovima, a na slici 20 je cjelokupan sustav za provođenje IC sušenja koji se nalazi u pogonu.

Netek kao proizvođač prikazanog plinskog IC emitera, dimenzija 60 cm x 60 cm, od karakteristika navodi sušenje premaza iznutra prema van, brzo vrijeme sušenja koje je za 70-80% manje nego kod konvencionalnih načina, značajnu uštedu energije (do 80%), uštedu proizvodnog prostora, poboljšanu kvalitetu premaza te smanjenje HOS-a sagorijevanjem (do 70%). Također, njihov proizvod je u skladu s ATEX direktivom što znači da se uređaj može koristiti u potencijalno eksplozivnom okruženju [13].

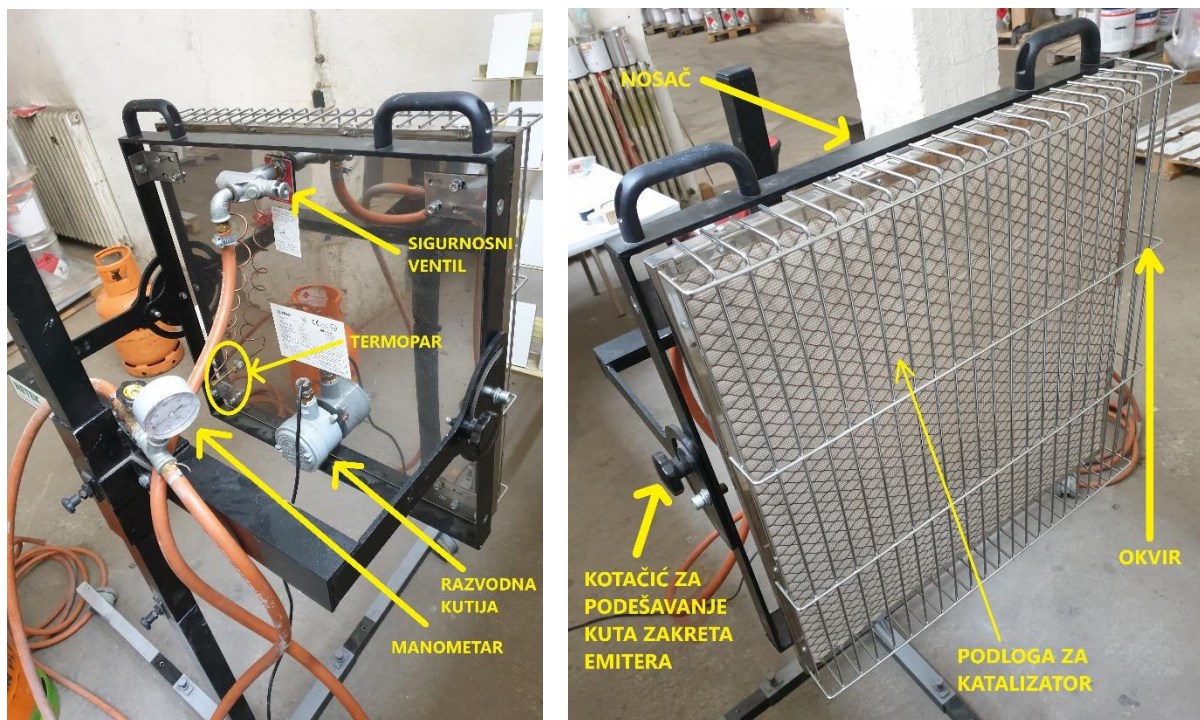


Slika 19. Dijelovi katalitičkog IC emitera korištenog za provođenje eksperimentalnog dijela rada s ispitivanim uzorcima u Končar MK [13]



Slika 20. Cjelokupan sustav za provođenje IC ispitivanja korišten u Končar MK

Na slici 21 pobliže su prikazani svi dijelovi koji osiguravaju rad emitera prema naputcima proizvođača.



Slika 21. Dijelovi IC emitera za sušenje premaza korištenog u Končar MK

4.3. Razvoj tehnologije

Glavni razvoj u infracrvenoj tehnologiji posljednjih godina usredotočen je na poboljšanje vremena odziva srednjevalnog emitera. Za razliku od kratkovalnih emitera koji imaju gotovo trenutnu kontrolu uključivanja / isključivanja, emiterima srednjih valnih duljina treba od 30 sekundi do minute da se zagriju i ohlade. U okruženju proizvodne linije ili kada se rukuje s podlogama osjetljivim na toplinu, to je očito nedostatak. Jedan od odgovora na to bio je srednjevalni emiter brzog odziva, koja radi na temperaturi niti od između 1500 °C i 1800 °C, kombinirajući tako sve prednosti i karakteristike srednji val s brzim djelovanjem kratkog vala [12].

Jedna od inovacija bio je i razvoj ugljične IC lampe srednjih valnih duljina. Ovo je proizvod zajedničkog ulaganja između *EA Technology* iz Capenhursta i *Heraeus Noblelighta* iz Bromborougha, i predstavlja novu klasu kvarcnih infracrvenih svjetiljki s niskom toplinskom masom, elementima od ugljičnih vlakana, koji rade na temperaturi od oko 1200 °C. Kao rezultat, energetska učinkovitost srednjeg vala sada se može kombinirati s vrlo brzim odzivom i preciznom upravljivošću [12].

4.3.1. NIR (eng. *Near infrared*) sušenje

Danas se dosta koriste NIR emiteri te zaštitni organski premazi minimalno modificirani za sušenje takvim emiterima. Ovom vrstom ubrzanog sušenja mogu se sušiti otapalni zaštitni premazi (bez obzira dali je otapalo neko od standardnih ili je otapalo voda) te premazi s vrlo malim i nikakvim udjelom otapala (npr. praškasti premazi) [17].

Često se, uslijed loše formulacije premaza ili uslijed lošeg rukovanja emiterima, na osušenim premazima dešavaju greške. Energija NIR zračenja nije dovoljna da mijenja strukturu materijala. Srednje i kratkovalna IC radijacija godinama se koristila za ubrzavanje sušenja premaza. Iako sušenje takvim emiterima traje samo nekoliko minuta, i dalje je neusporedivo s NIR emiterima koje premaz suše u roku od nekoliko sekundi. Većina materijala koja se koristi u formulacijama standardnih premaza je polu-propusna za NIR spektar radijacije. To dopušta zrakama da prolaze kroz premaz i dolaze do podloge. Mnoge metalne podloge reflektiraju NIR zračenje te preusmjeravaju energiju u zaštitni sloj premaza. Nadalje, mnogi organski materijali pokazuju izrazito veliku apsorpciju u kratkovalnom i srednjevalnom IC zračenju, ali ne i u NIR zračenju. Iako se mnogi inženjeri slažu da NIR emiteri puno brže suše premaz nego konvekcijske grijalice, mehanizmi stvrdnjavanja premaza i ključni parametri za stabilno sušenje i stvrdnjavanje i dalje su kontroverzni i nedovoljno istraženi [9].

Za bolje razumijevanje mehanizma stvrdnjavanja i energijskih okolnosti u uvjetima visoke radijacije, ključno je poznavanje uloge granice između premaza i podloge, te utjecaja optičkih svojstava premaza na utjecaj temperature. NIR apsorpcija u premazu ovisi o izboru anorganskih ili/i organskih pigmenata. Svjetlije nijanse pigmenata apsorbiraju malu količinu IC radijacije.

Neka istraživanja su pokazala da se dodatkom NIR apsorbera, kao što su TiO_2 i ugljen u originalnu formulaciju premaza, povećava apsorpcija svjetla, a samim time, premaz se suši brže. U istraživanju se nije raspravljalo o tome kako apsorpcija utječe na finalna, zaštitna svojstva premaza, na hrapavost, pore i površinsku adheziju. Čak štoviše, dokazano je da apsorpcija svjetla uzrokovana dodatkom određenih pigmenata uzrokuje lokalna oštećenja na površini premaza. U tom slučaju, kod prevelike apsorpcije svjetlosti, procesi polimerizacije i formacije filma događaju se brže od isparavanja otapala. Boja (pigmentacija) premaza uvelike ovisi o apsorpciji svjetlosti, a samim time i o brzini sušenja [16, 20, 21].

4.4. Primjena IC lampi

Primjena ove vrste ubrzanog sušenja (sušenje IC emiterima, sušenje NIR emiterima) te premaza koji se modificiraju baš za tu vrstu sušenja u zadnje vrijeme raširila se u skoro sve grane industrije. Velika je upotreba ovih postupaka u grafičkoj i tiskarskoj industriji. U strojarскоj industriji ove tehnologije i dalje su ograničene uglavnom na postupke sušenja dijelova ravnih, pločastih geometrija, zbog gore navedenih nedostataka. Primjenjuju se kod sušenja plastičnih dijelova te kod sušenja mjesta zaštićenih premazima koji su bili reparirani [17].

IC lampe se danas intenzivno koriste u industriji kako bi se postigli pozitivni učinci poput povećane produktivnosti, uklanjanje uskih grla (eng. *bottlenecks*), bolje kvalitete proizvoda, bržih vremena ciklusa i smanjene potrošnje energije.

4.4.1. Proizvodnja plastičnih posuda

Tvrtka *Mono Containers* proizvodi plastične posude, uglavnom za prehrambenu industriju. Ti su spremnici ukrašeni prema njihovim eventualnim sadržajima postupkom sitotiska, a tvornica *Durham* ima 16 namjenskih linija na njihovo oblikovanje, tiskanje i sušenje [12].

Prije se sušenje tiskarskih boja na bazi otapala vršilo pomoću dugovalnih IC keramičkih lampi na svih 16 linija, što se pokazalo izuzetno energetski neučinkovito. Osim što je svakoj liniji bilo potrebno 20 kW IC energije za sušenja, *Mono* su također doživljavali probleme s dugim vremenima zagrijavanja i isključenja dugovalnih lampi. Tijekom prekida i zaustavljanja strojeva, bilo je potrebno da odašiljači budu uključeni, ali elektromehanički uvučeni iz linija, jer bi obično trebalo 15 minuta da se temperature sušenja ponovo uspostave na ponovnom pokretanju [12].

Situacija se dramatično popravila otkad su uvedene ugljične IC lampe srednjih valnih duljina umjesto keramičkih. Na svaku liniju ugrađeno je četiri ili pet infracrvenih kutija (eng. *cassettes*), ovisno o pojedinoj liniji, od kojih svaka sadrži po jedan odašiljač snage 2 kW, odmah prepolovivši potrebnu snagu. Međutim, to predstavlja samo dio ukupne uštede energije, jer više nije bilo potrebno ostavljati grijalice trajno uključanima jer je isključivanje gotovo trenutno, kada se linija isključi [12].

Daljnja ušteda energije također je omogućena načinom na koji su odašiljači ugrađeni. Dvije kutije postavljene su na početak linije sušenja, nakon čega su kutni reflektori okrenuti prema svakom od preostalih emitera kako bi se osiguralo da se maksimalna toplina učinkovito prenosi na tiskane posude kada prolaze transporterom. Međutim, ušteda energije nije jedina korist od ugljičnih IC lampi. Brzina linije se može povećavati budući da sušenje više nije kontrolni faktor nad izlazom. Štoviše, poboljšana je kvaliteta jer praktički nema odbijenica zbog izobličenja te su troškovi održavanja uvelike smanjena, jer nema kompliciranih sustava da se pokvare [12].

Na slici 22 prikazane su posude na kojima se boje otvrdnjavaju IC ugljičnom lampom.



Slika 22. Otvrdnjavanje boje na posudama IC ugljičnim lampama [22]

4.4.2. Ugljične IC lampe srednjih valnih duljina u automobilskoj industriji

Ugljični infracrveni emiteri intenzivno se koriste u automobilskoj industriji, naročito zbog uštede proizvodnog prostora kao i minimiziranja potrošnje energije. *Weweler Colaert*, sa sjedištem u Belgiji, proizvodi čelične lisnate opruge i parabolične opruge za teretna vozila.

Za proizvode različitih dimenzija i zakrivljenosti potrebne su različite brzine proizvodnje. Tijekom proizvodnje, čelične lisnate opruge zaštićene su od korozije lakom na bazi vode. Lak treba efikasno osušiti, ali čelik ne smije biti potpuno zagrijan tako da opruge budu brzo spremne za daljnje faze proizvodnje. To je izazov za sušenje laka, dok istodobno peć za sušenje mora sušiti širok raspon opruga, bez trošenja nepotrebne energije [23].

Provedeni su proračuni za razne mogućnosti i ustanovilo se da je IC kabina puno manja od 10 metara duge kabine s vrućim zrakom, koja je bila alternativa. Odlučeno je bilo postaviti infracrveni sustav s individualno podesivim zonama emitera. Nova kabina (slika 23) sadrži IC modul nominalne snage 108 kW i sadrži srednjevalne ugljične IC lampe [23].

Infracrvene lampe prenose energiju bez kontakta i njima se lako može upravljati. Lampe u kabini rade paralelno s proizvodnom linijom tako da se pojedinačno mogu uključiti prema potrebi, ovisno o širini opruge. Slijedom toga, IR modul se aktivira samo kada je potrebna toplina. Kao rezultat, zahvaljujući pametnoj regulaciji snage, potrošnja energije sustava može se svesti na najmanju moguću mjeru [23].



Slika 23. IC kabina za sušenje lisnatih zavojskih opruga [23]

Razne su primjene korištenja kabina i peći za infracrveno sušenje poput one u tvornici Honde u Velikoj Britaniji kod prevlačenja branika automobila (slika 24) ili kod sušenja praškastih premaza nanesenih na felge automobila (slika 25).



Slika 24. IC kabina za sušenje premaza nanesenih na branike automobila [24]



Slika 25. IC kabina za sušenje praškastih premaza nanesenih na felge automobila [24]

4.5. Prednosti i nedostaci IC sušenja premaza

Kod sušenja premaza konvekcijom mnogo se energije troši kako bi se podigla i zadržala temperatura u „pećnici“, što donosi visoke proizvodne troškove. S druge strane, IC emiteri koriste energijske valove kako bi podigli temperaturu i gotovo odmah kreće sušenje. Za to je potrebno puno manje energije što posljedično umanjuje proizvodne troškove [17].

Dodatna prednost IC sušenja izražava se u mogućnosti sušenja određenih dijelova premazima zaštićenih površina. Kako IC emiteri odašilju valove, moguće je sušiti samo određena mjesta. To može biti korisno kod reparacija oštećenih dijelova premaza, kada se želi ubrzati sušenje [17].

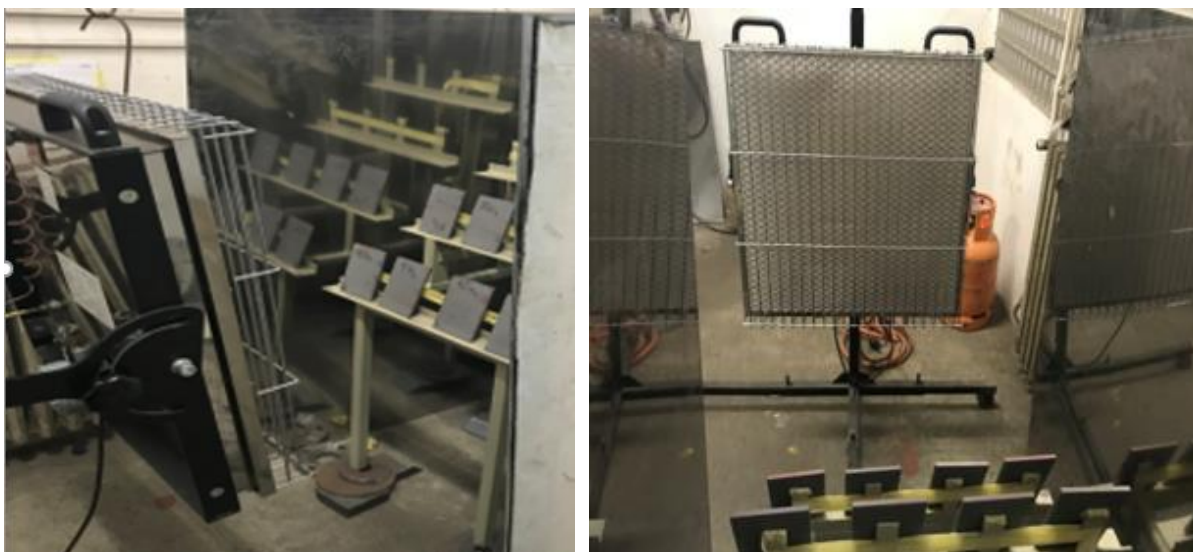
Podloge osjetljive na toplinu, poput plastike i kompozita, također imaju potencijalne koristi od IC otvrdnjavanja, jer se sam premaz može zagrijati, a vrijeme zadržavanja u pećnici može biti dovoljno kratko da spriječi oštećenje podloge [14].

IC sustavi ne zahtijevaju velike protoke zraka uobičajene u konvekcijskim pećnicama. Kao rezultat, onečišćenje prašinom i prljavštinom može se svesti na najmanju moguću mjeru. Nedostatak nusproizvoda izgaranja kod električnog IC emitera čini i ovaj postupak čistijim [14].

S druge strane, mnogi potencijalni problemi se također moraju istražiti. IC sušenje je moguće primijeniti samo na nekim vrstama premaza. Razlog je tomu sposobnost prolaska IC valova kroz određeni tip premaza i refleksija od podloge. Ako premaz ima visok sjaj i time se od njegove površine reflektiraju IC valovi, tada IC valovi nisu u mogućnosti prodrijeti kroz premaz te samim time sušenje neće biti uspješno. Isto tako, neke podloge će apsorbirati IC valove, odnosno smanjiti refleksiju IC vala nazad kroz premaz, što može značajno smanjiti efektivnost IC sušenja [17].

Razlike u masi na jednom proizvodu također mogu biti problem. Sustavi dizajnirani za stvrdnjavanje praha u 60 sekundi na čeliku debljine 10 mm mogu pružiti manje nego adekvatno stvrdnjavanje na udvostručenoj debljini i zavaru zbog efekta potonuća topline (eng. *heat sink effect*). To je, na primjer, uobičajeno na području "zvona" na uljnim filtrima. Toplinska energija se odvaja od tanke podloge i ostaje nedovoljno energije za stvrdnjavanje premaza [14].

Isto tako, složene oblike može biti teško umrežiti u IC pećnicama/kabinama. Zračenje putuje ravnim linijama i ne skreće u zavoјima bez pomoći refleksije. Skrивene unutarnje površine teško će otvrdnuti bez pomoći provođenja ili konvekcije. Drugi način kako doći do skrivenih ili teško dostupnih mjesta na nekim proizvodima mogu biti reflektirajuće podloge koje se postavljaju oko njih kao što se to radilo u eksperimentalnom dijelu ovog rada s ispitivanim uzorcima, a prikazano je na slici 26.



Slika 26. Korištenje reflektirajućih podloga za pristup površinama koje nisu direktno izložene IC zračenju

5. EKSPERIMENTALNI RAD

Cilj eksperimentalnog dijela rada bilo je utvrditi kako na brzinu IC sušenja utječu definirani parametri. Promatrani parametri bili su udaljenost uzoraka od IC izvora zračenja, debljina uzoraka i način sušenja ispitne površine: direktnim IC zračenjem ili indirektnim preko reflektirajućih podloga. Isto tako, osmišljena su i provedena ispitivanja korozijske otpornosti premaza nanijetih na čelične ispitne uzorke.

Eksperimentalni dio rada sastojao se od dva dijela. Prvi dio odrađen je u tvrtki Končar – Metalne Konstrukcije (MK), u odjelu antikorozivne zaštite (AKZ), gdje se vršila priprema površine ispitnih uzoraka, nanošenje sustava premaza proizvođača CHING (njem. *Chemische Industrie Erlangen GmbH*), kontroliranog sušenja IC lampom te testovi prionjivosti. Uzorci su zatim poslani u tvrtku CHING koja je vršila svoju neovisnu kontrolu i čiji su rezultati također prikazani i analizirani.

Drugi dio odrađen je u Laboratoriju za zaštitu materijala na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Na ispitne uzorke nanesen je hibridni sustav premaza koji se sušio na sobnoj temperaturi, a nakon čega su provedena daljnja ispitivanja korozijske otpornosti kako bi ih se moglo usporediti s uzorcima sušenim IC lampom te utvrditi postoje li kakve razlike u fizikalnim i kemijskim svojstvima između njih. Dobiveni rezultati su se analizirani te su na kraju izvedeni zaključci koji mogu poslužiti u svrhu daljnjih istraživanja na tome području.

Na uzorcima je nanesen hibridni sustav premaza tvrtke CHING:

1. temeljni sloj: EMD 156 HS – dvokomponentni (2K) cink-epoksi temelj na bazi otapala za zaštitu čeličnih konstrukcija u izrazito korozivnim okolinama (Prilog),
2. međusloj: HV 186 – jednokomponentni (1K) akrilni premaz na bazi vode koji ima sposobnost brzog sušenja te aktivne zaštite od korozije čelika, pocinčanih čelika i obojanih metala (Prilog),
3. međusloj: HV 186,
4. završni sloj: HV 43 – jednokomponentni (1K) akrilni premaz na bazi vode koji ima sposobnost brzog sušenja te visoku otpornost na atmosferilije (Prilog).

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je:

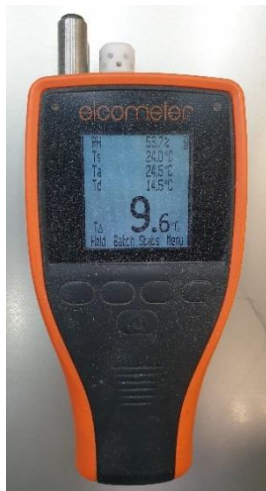
- mjerenje mikroklimatskih uvjeta,
- priprema površine pjeskarenjem u AKZ pogonu tvrtke Končar – Metalne Konstrukcije,
- određivanje čistoće površine (HRN EN ISO 8501-1:2007),
- određivanje hrapavosti površine (HRN EN ISO 8503-1:2012),
- zračno prskanje premaza na ispitne uzorke,
- mjerenje debljine mokrog filma češljem (HRN EN ISO 2808:2008),
- sušenje premaza IC lampom i pri sobnim uvjetima,
- određivanje vremena sušenja premaza,
- mjerenje debljine suhog filma (HRN EN ISO 2808:2008),
- ispitivanje tvrdoće premaza olovkama (HRN EN ISO 15184:2020) i po Buchholzu (HRN EN ISO 2815:2003),
- ispitivanje otpornosti prema koroziji u slanoj komori (HRN EN ISO 9227:2012) te ispitivanje korozije oko ureza (HRN EN ISO 12944-6:2018),
- ispitivanje otpornosti prema koroziji u vlažnoj komori (HRN EN ISO 6270-2:2007),
- ocjenjivanje stupnja mjehuranja (HRN EN ISO 4628-2:2016),
- ocjenjivanje stupnja hrđanja (HRN EN ISO 4628-3:2016),
- ispitivanje prionjivosti premaza: urezivanjem mrežice ili „Cross-cut“ test (HRN EN ISO 2409:2013) i vlačnom metodom ili „Pull-off“ test (HRN EN ISO 4624:2016) te
- ispitivanje otpora premaza elektrokemijskom impedancijskom spektroskopijom (EIS).

5.1. Mikroklimatski uvjeti

Prije nanošenja premaza na čelične ispitne uzorke, izmjereni su klimatski uvjeti koji vladaju u pogonu. Podaci dobiveni mjerenjem su:

- RH (relativna vlažnost, eng. *relative humidity*) = 53,7 %,
- Temperatura zraka $T_a = 24,5$ °C,
- Temperatura površine $T_s = 24$ °C,
- Temperatura rosišta $T_d = 14,5$ °C.

Mjerenje je provedeno uređajem Elcometer 319 koji je prikazan na slici 27.

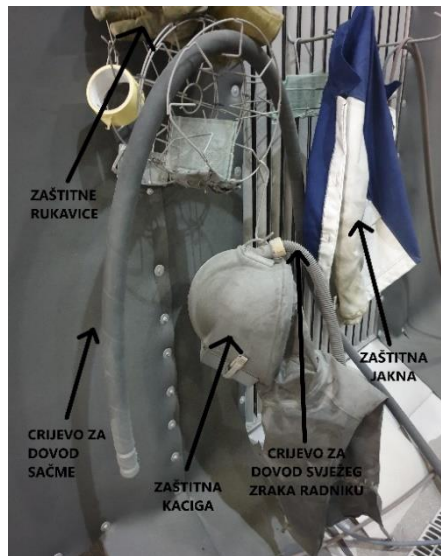
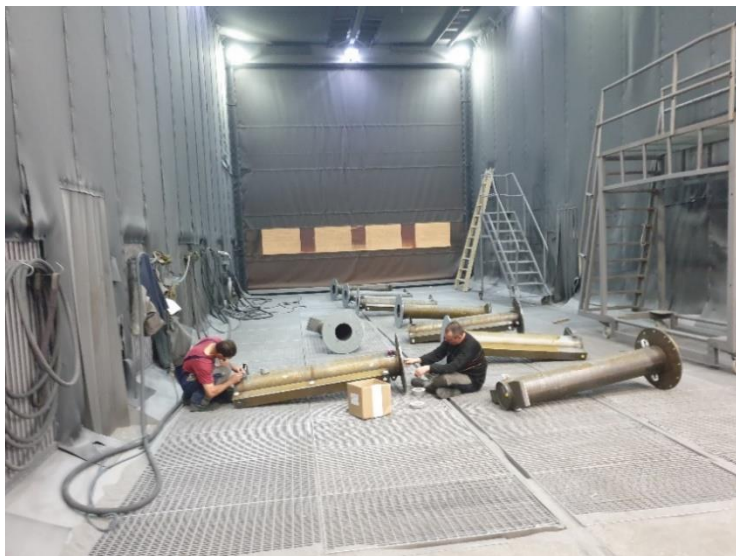


Slika 27. Elcometer 319

5.2 Priprema površine

Ispitne uzorke osigurala je tvrtka Končar MK u svrhu provedbe eksperimentalnog dijela ovog diplomskog rada. Ispitni uzorci su izrađeni od općeg konstrukcijskog čelika dimenzija 15 cm x 10 cm te dolaze u više različitih debljina: 4 mm, 8 mm, 10 mm i 15 mm.

Sačmarenje se vršilo u AKZ odjelu tvrtke Končar MK, u kabini imena *FSRA – WHEELABRATOR GROUP* koja je prikazana na slici 28. Prikazana je i oprema koju svaki radnik mora imati kada se nalazi unutar kabine za sačmarenje.



Slika 28. Kabina za sačmarenje u AKZ odjelu tvrtke Končar MK (lijevo) i oprema za sačmarenje (lijevo)

Ispitni uzorci prije i nakon sačmarenja prikazani su na slici 29.



Slika 29. Ispitni uzorci prije (lijevo) i poslije (desno) sačmarenja

5.2.1. Određivanje hrapavosti površine

Hrapavost pripremljene površine određena je prema normi HRN EN ISO 8503-1:2012. Ispitivanje se provodi usporedbom pripremljene površine i komparatora hrapavosti koji je prikazan na slici 30.



Slika 30. Komparator hrapavosti

Komparator hrapavosti je podijeljen u tri područja:

1. Fina površina: uključuje segment 1 i 2,
2. Srednje hrapava površina: uključuje segment 2 i 3,
3. Jako hrapava površina: uključuje segment 3 i 4.

Usporedbom pripremljene površine s komparatorom hrapavosti zaključeno je da uzorci spadaju u srednje hrapavu površinu, što je i prikazano slikom 31.



Slika 31. Usporedba pripremljene površine s komparatorom hrapavosti prema HRN EN ISO 8503-1:2012

5.2.2. Određivanje čistoće površine

Vizualnim uspoređivanjem pripremljene površine i fotografija iz norme HRN EN ISO 8501-1:2007 utvrđeno je da pripremljena površina ispitnih uzoraka odgovara stupnju čistoće Sa 2,5 kako je prikazano slikom 32.



Slika 32. Usporedba pripremljene površine s fotografijom iz standarda HRN EN ISO 8501-1:2007

5.3. Nanošenje premaza

Nanošenje premaza je provedeno u lakirnici tvrtke Končar MK u Zagrebu. Budući da je temeljni premaz dvokomponentni, bilo je potrebno zamiješati dvije komponente (bazu i otvrdnjivač) prema uputama proizvođača. Miješanje dviju komponenti prikazano je na slici 33.



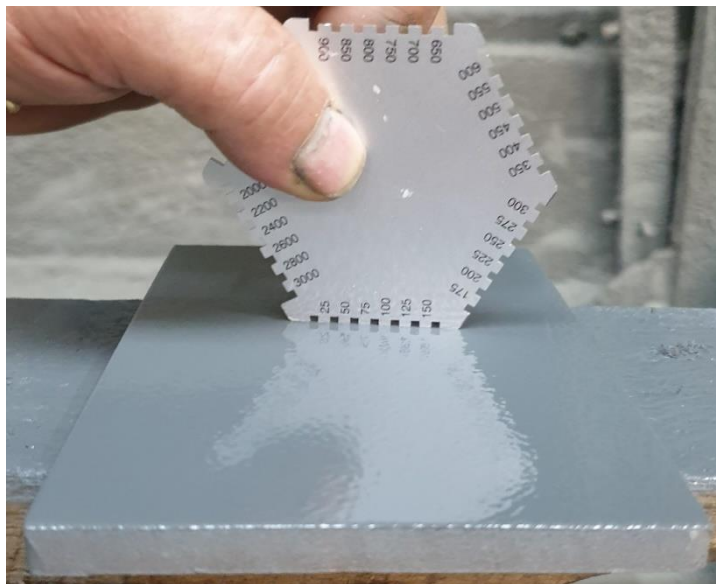
Slika 33. Priprema boje za zračno prskanje

Na čelične ispitne uzorke premaz je nanijet zračnim prskanjem (slika 34). Premazno sredstvo nalazi se u spremniku montiranom iznad raspršivača, iz kojeg se stlačenim zrakom tlači do pištolja. Prednosti zračnog prskanja su postizanje ravnomjerne debljine prevlake, visokog estetskog dojma i visoke produktivnosti.



Slika 34. Nanošenje premaza na uzorke zračnim prskanjem

Tražena debljina mokrog filma (DMF) može se, prema normi HRN EN ISO, provjeriti češljem kako je prikazano na slici 35.



Slika 35. Mjerenje debljine mokrog filma (DMF) češljem

5.4. IC sušenje

Kao što je rečeno u uvodu u eksperiment, potrebno je bilo pripremiti uzorke IC sušenjem. Cilj je bio ispitati i odrediti kako određeni parametri u tome procesu utječu na brzinu sušenja hibridnog sustava premaza. Tako sušeni premazi uspoređeni su s onim koji se suše konvencionalnim metodama, i to u pogledu njihovih fizikalnih i kemijskih svojstava, a sve u svrhu da se utvrdi kakav je potencijal IC sušenja u industrijskoj primjeni.

IC sušenje provodilo se u pogonu tvrtke Končar MK koja je ustupila svoju IC lampu opisanu u poglavlju 4.2. i prikazanu na slikama 19 – 21. Lampa punog imena NETEC katalitički plinski IC emiter ima sljedeće karakteristike:

- dimenzije grijaćeg panela: 60 cm x 60 cm,
- valne duljine: 2 – 10 μm ,
- snaga: 6 kW.

Kriterij kada je nešto bilo suho prilikom IC sušenja bio je pregled s drvenom olovkom. Ukoliko olovka nije oštetila premaz prilikom prolaza, uzorak je stavljen u vodu kako bi se ubrzalo hlađenje te ako je i nakon toga vizualnom kontrolom sve bilo u redu, premaz se smatrao umrežen. U tome trenutku je to značilo da se može ići u nanošenje drugih slojeva na uzorak.

Priprema uzoraka IC sušenjem je podijeljena u nekoliko dijelova. Tako su se u prvom dijelu pripremali uzorci kod kojih se promatralo kako na brzinu sušenja premaza koji su na njih nanесeni utječe udaljenost od izvora IC zračenja, debljina ispitnih uzoraka i način zračenja (direktno ili indirektno preko reflektirajućih podloga). U drugom dijelu na ispitne uzorke nanесen je hibridni sustav koji je naveden u uvodu eksperimenta i koji je sušen različitim kombinacijama IC i konvencionalnog sušenja dok se u trećem dijelu isti takvi sustavi slali u CHING koji je radio svoja neovisna istraživanja i zatim vratio dobivene rezultate na analizu.

Kao četvrti dio mogu navesti i ispitivanja provedena na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Laboratoriju za zaštitu materijala gdje je na uzorke nanесen hibridni sustav premaza koji se sušio na sobnoj temperaturi 21 dan te su na njima rađena ispitivanja korozijske otpornosti za usporedbu s IC sušenim premazima.

5.4.1. „Flash-off“ vrijeme

Testovi su se provodili kako bi se otkrilo koje je potrebno vrijeme sušenja vodorazrjedivih premaza na zraku, tzv. „flash-off“, prilikom kojeg neće doći do pojave mjehurića nakon što ih osušimo IC lampom. Na slici 36 prikazana je pojava mjehurića nakon jednog takvog sušenja.



Slika 36. Pojava mjehurića nakon IC sušenja vodorazrjedivih premaza uslijed nedovoljnog „flash-offa“ odnosno sušenja na zraku prije korištenja IC lampe

Postupak je bio sljedeći: nanošenje prvog sloja vodorazrjedivog premaza, zadani „flash-off“, IC sušenje 10 min te ponavljanje postupka ovisno o broju nanošenja kojih je u ovom slučaju bilo tri. Tablicom 2 prikazani su testovi kojima se tražilo dovoljno vrijeme sušenja vodorazrjedivog premaza na zraku nakon kojeg se može ići s IC sušenjem.

Tablica 2. Testovi traženja dovoljnog vremena predsušenja, koje je potrebno vodorazrjedivom premazu na zraku, prije korištenja IC lampe

	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4
	Sušenje na zraku: 1 h	Sušenje na zraku: 1:30 h	Sušenje na zraku: 1:45 h	Sušenje na zraku: 2 h
	IC sušenje: 10 min	IC sušenje: 10 min	IC sušenje: 10 min	IC sušenje: 10 min
HV 186 / cca. 100 μm	OK	OK	OK	OK
HV 186 / cca. 70-75 μm	Mjehurići	Mjehurići	OK	OK
HV 186 / cca. 90-100 μm			OK	OK
Ukupno DSF:	cca. 260 - 280 μm			

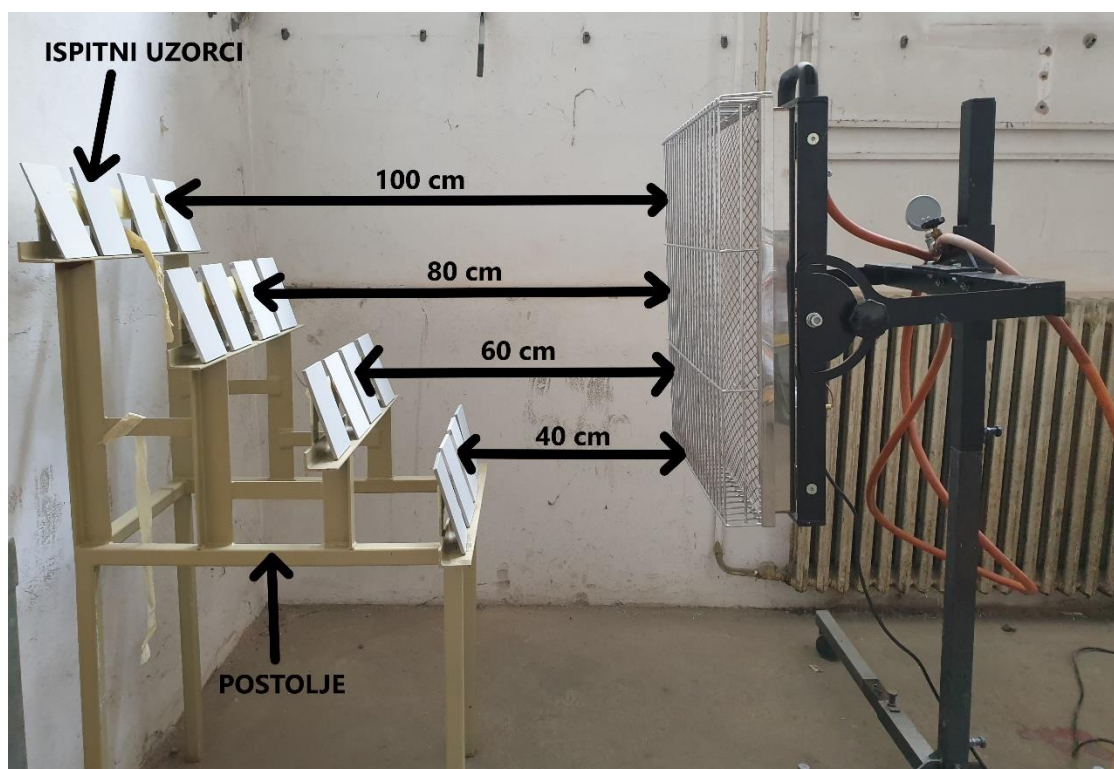
Prva dva testa pokazala su nedovoljno vrijeme predušenja („*flash-off*“) jer je prilikom nanošenja drugog sloja, zatim sušenja na zraku 1 h ili 1:30 h min te IC sušenja od 10 min došlo do pojave mjehurića. Tek se na 3. testu pokazalo da vrijeme od 1:45 h sušenja na zraku dovoljno kako, nakon IC sušenja od 10 minuta, ne bi došlo do pojave mjehurića. Četvrti test pokazao je da svako vrijeme iznad 1:45 h zadovoljava i neće doći do pojave mjehurića.

5.4.2. Utjecaj parametara na brzinu IC sušenja

Brzina sušenja jedna je od glavnih prednosti IC sušenja u odnosu na konvencionalno te razlog zašto se sve više pojavljuje u industriji. Nastojalo se ispitati postoje li ograničenja koja brzinu sušenja kod IC zračenja približavaju brzini konvencionalnog sušenja te ako da koje su to krajnje vrijednosti kojima se smijemo približiti.

Parametri koji su se proučavali su sljedeći:

1. **Udaljenost ispitnih uzoraka od IC izvora zračenja.** Promatrala se brzina sušenja tj. umrežavanja premaza te kako se ona mijenja s promjenom udaljenosti. Minimalna udaljenost koju je zadao proizvođač IC lampe bila je 40 cm, a uz nju uzorci su bili postavljeni na 60 cm, 80 cm i 100 cm. U tu svrhu izrađeno je postolje na koje su mogli biti postavljeni uzorci na zadanim udaljenostima i ono je prikazano na slici 37.
2. **Debljina ispitnih uzoraka.** Problem debljine ispitnih uzoraka opisan je u teorijskom dijelu, a odnosi se na svojstvo materijala (u ovom slučaju čelika) da apsorbira IC valove i onemogućiti njihovu refleksiju nazad kroz premaz čime se smanjuje efektivnost IC sušenja. Što je materijal deblji, veća će biti njegova sposobnost apsorpcije i zato su se za ovaj dio promatrale četiri debljine ispitnih uzoraka: 4 mm, 8 mm, 10 mm i 15 mm.
3. **Direktno ili indirektno zračenje podloge.** Svojstvo svakog vala je njegova pravocrtna putanja te je stoga jedan od nedostataka IC sušenja svakako njegova nemogućnost dolaska do skrivenih unutarnjih površina bez pomoći. Ispitivanjem se htjelo provjeriti dolazili li i koliko brzo do sušenja kada oko postolja postavimo reflektirajuću podlogu i omogućimo valovima da dođu do stražnje površine uzorka. Takva reflektirajuća podloga prikazana je na slici 26, u poglavlju 4.2.



Slika 37. Postolje za IC sušenje ispitnih uzoraka s različitim udaljenostima (40, 60, 80 i 100 mm) od IC lampe

Na pripremljene površine ispitnih uzoraka nanesen je jedan sloj premaza. Premazi koji se koriste detaljnije su opisani u uvodu u eksperiment, a oni su: EMD 156 HS (2K cink-epoksi temeljni premaz), HV 186 (1K akrilni međupremaz) i HV 43 (1K akrilni završni premaz). opisanim parametrima.

U tablicama 3-5 prikazane su brzine IC sušenja premaza EMD 156 HS, HV 186 i HV 43 ovisno o prethodno nabrojanim parametrima. Isto tako, prikazane su i najveće postignute temperature na površini ispitnih uzoraka te srednja vrijednost debljine suhog filma (DSF).

Tablica 3. Brzine IC sušenja premaza EMD 156 HS ovisno o udaljenosti od izvora zračenja, debljini ispitnih uzoraka i načinu zračenja (direktno ili indirektno)

EMD 156 HS		DIREKTNO			INDIREKTNO		
debljina lima / mm	udaljenost / cm	DSF / μm	vrijeme sušenja / min	T / $^{\circ}\text{C}$	DSF / μm	vrijeme sušenja / min	T / $^{\circ}\text{C}$
4	40	95	10	46	85	15	57
	60	94	11	43	69	15	52
	80	87	14	43	92	20	49
	100	83	18	38	77	20	44
8/10	40	77	10	45	99	15	53
	60	78	12	42	70	17	48
	80	103	17	38	50	20	44
	100	74	22	34	65	22	39
15	40	102	20	43	101	20	50
	60	75	14	34	86	20	44
	80	81	20	32	60	25	40
	100	82	22	30	68	25	37

Tablica 4. Brzine IC sušenja premaza HV 186 ovisno o udaljenosti od izvora zračenja, debljini ispitnih uzoraka i načinu zračenja (direktno ili indirektno)

HV 186		DIREKTNO			INDIREKTNO		
debljina lima / mm	udaljenost / cm	DSF / μm	vrijeme sušenja / min	T / $^{\circ}\text{C}$	DSF / μm	vrijeme sušenja / min	T / $^{\circ}\text{C}$
4	40	86	12	58	74	20	58
	60	96	12	50	78	25	51
	80	94	12	43	88	25	45
	100	90	12	39	70	38	39
8/10	40	111	12	58	88	20	57
	60	107	12	50	89	28	51
	80	123	12	42	73	35	44
	100	108	12	38	95	42	37
15	40	90	12	56	98	25	52
	60	101	12	47	82	33	44
	80	100	12	39	86	40	39
	100	123	12	36	79	50	34

Tablica 5. Brzine IC sušenja premaza HV 43 ovisno o udaljenosti od izvora zračenja, debljini ispitnih uzoraka i načinu zračenja (direktno ili indirektno)

HV 43		DIREKTNO			INDIREKTNO		
debljina lima / mm	udaljenost / cm	DSF / μm	vrijeme sušenja / min	T / $^{\circ}\text{C}$	DSF / μm	vrijeme sušenja / min	T / $^{\circ}\text{C}$
4	40	130	10	56	108	15	56
	60	132	10	46	95	15	47
	80	124	10	36	87	20	40
	100	119	10	28	101	20	30
8/10	40	109	10	57	111	15	54
	60	109	10	46	96	15	46
	80	124	10	33	96	20	35
	100	137	10	29	87	25	30
15	40	124	10	58	100	15	50
	60	131	10	45	90	20	46
	80	117	10	32	88	20	32
	100	122	10	28	91	25	28

5.4.3. Kombinacija sušenja: IC i sobna temperatura

U ovom dijelu eksperimenta na ispitne uzorke nanesen je sustav premaza:

- temeljni premaz: EMD 156 HS,
- međupremaz: HV 186,
- međupremaz: HV 186,
- završni premaz: HV 43.

Sustav se sušio na dvije različite udaljenosti (40 mm i 60 mm) te kombinacijama IC i sušenja na sobnoj temperaturi, i to na način da bi jedan sloj premaza bio osušen na sobnoj temperaturi, a ostatak IC zračenjem. Pritom se nakon svakog nanosa vodorazrjedivog premaza koji se planirao sušiti s IC zračenjem, moralo uzeti u obzir i „flash-off“ vrijeme kako ne bi došlo do pojave mjehurića.

Principi sušenja kakvi su se ispitivali u ovom poglavlju vrlo lako se mogu naći i u industriji, npr. kada je pred kraj radnog vremena lampa ugašena i neće se paliti do idućeg dana pa se premazi ostave sušiti preko noći na sobnoj temperaturi ili prilikom zauzetosti IC lampe premaz se ostavi sušiti na zraku.

Uvedene su i oznake kako bi se lakše moglo pratiti navedene kombinacije, kome su namijenjeni uzorci i koji je način zračenja. Stoga imamo:

- početnim brojevima od 7 do 10 označeni su sustavi koji su se sušili različitim kombinacijama IC i sušenja na sobnoj temperaturi,
- slovima „a“ i „b“ označuje se način zračenja ispitnih uzoraka, pri čemu slovo „a“ označuje direktno zračenje, a slovo „b“ indirektno,
- krajnjim brojevima 1 ili 2 označavala su se mjesta gdje su se uzorci kasnije ispitivali; tako broj 1 predstavlja Končar, dok broj 2 predstavlja CHING.

Tablica 6 prikazuje principe sušenja i vremena koja su pritom postignuta, a uz to daje i debljine suhog filma svakog sloja premaza te temperature površine ispitnih uzorka nakon IC sušenja određenog sloja.

Tablica 6. Kombinacija sušenja sustava premaza IC zračenjem i sušenjem na sobnoj temperaturi te pripadajuća vremena sušenja slojeva premaza

udaljenost /cm	princip sušenja sloja	DIREKTNO				INDIREKTNO			
		broj uzorka	t /min	T /°C	DSF / μm	broj uzorka	t /min	T /°C	DSF / μm
40	IR	7a1/7a2	25	58	170/105	7b1/1b2	25	54	140
	IR		20	59	199/135		20	56	185/175
	IR		17	52	240/168		17	48	226/208
	sobna		/	/	278/244		/	/	275/267
60	IR	8a1/8a2	20	57	85	8b1/8b2	20	52	80
	sobna		/	/	160		/	/	167
	IR		17	59	230/243		17	56	218/236
	IR		20	56	290		20	53	265/292
60	IR	9a1/9a2	25	59	101/109	9b1/9b2	25	54	105/110
	IR		20	56	150/138		20	52	134/142
	IR		20	56	199/176		20	45	190/216
	IR		20	57	272/238		20	52	246/278
40	sobna	10a1/10a2	/	/	104/112	10b1/10b2	/	/	104/122
	IR		20	57	135/153		20	53	130/156
	IR		20	59	192/205		20	45	192/227
	IR		20	57	250/263		20	51	252/292

5.5. Mjerenje debljine suhog filma

Nakon nanošenja svakog sloja premaza i njegovog IC ili sušenja na sobnoj temperaturi, izmjerena je debljina suhog filma (DSF). Mjerenje je provedeno uređajem Elcometer 456 prikazanom na slici 38, a sukladno normi HRN EN ISO 2808:2019.

U tablicama 3-6, u prethodnim potpoglavljima, prikazane su vrijednosti DSF-a koje predstavljaju srednju vrijednost izračunatu nakon deset mjerenja na premazu.

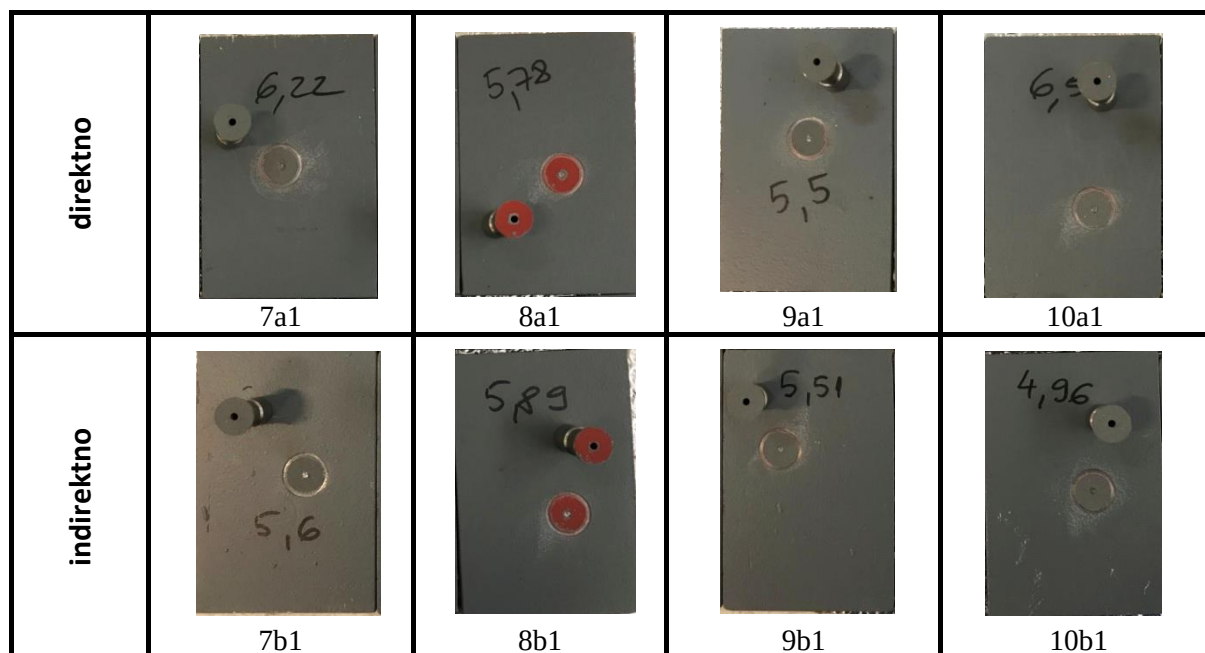


Slika 38. Mjerenje debljine suhog filma (DSF) premaza uređajem Elcometer 456

5.6. Ispitivanje prionjivosti u tvrtki Končar MK

Ispitivanje prionjivosti provedeno je vlačnom metodom („Pull-off“ metoda), sukladno normi HRN EN ISO 4624:2016. Ispitivanja se provode tako što se metalni valjčići (eng. *dolly*) lijepe na premaz specijalnim ljepilom, nakon čega treba proteći 45 minuta dok se ono ne osuši i ne stvrdne. Posebnim alatom kroz sredinu čunjića uklanja se ljepilo koje se našlo unutar njega kako se vrh mjernog uređaja ne bi zaljepio za površinu uzorka. Nakon što se ljepilo osušilo u potpunosti, mjerni uređaj se pričvršćuje na nalijepljene valjčiće te se postupnim povećanjem sile odvajaju od površine ispitnog uzorka. Očitava se numerička vrijednost adhezije izražena kao vrijednost u N/mm^2 ili MPa.

Uzorci koji su se ispitivali u Končaru, a prikazani u tablici 6 su: 7a1 – 10a1 i 7b1 – 10b1. Slika 39 prikazuje ispitne uzorke nakon „pull-off“ testa, a tablica 7 rezultate provedenog testa te vrstu odvajanja (unutar sloja ili između više slojeva).



Slika 39. Ispitni uzorci nakon testa prionjivosti vlačnom metodom („pull-off“) s pripadajućim rezultatima

Tablica 7. Izmjerene vrijednosti dobivene „pull-off“ testom te vrste odvajanja od površine

„Pull-off“ test		Vrsta odvajanja
Uzorak	MPa	
7a1	6,22	100% B
7b1	5,6	100% B
8a1	5,78	100% C
8b1	5,89	100% C
9a1	5,5	100% B
9b1	5,51	100% B
10a1	6,5	100% B
10b1	4,96	100% B

Ukoliko je kod vrste odvajanja navedeno samo jedno slovo (A, B, C, itd.), znači da je došlo do kohezivnog odvajanja, odnosno odvajanja unutar jednog sloja. Ako su kod vrste odvajanja navedena dva slova (A/B, B/C, itd.) znači da je došlo do adhezivnog odvajanja tj. odvajanja između dva sloja.

5.7. Ispitivanja u tvrtki CHING

Nakon ispitivanja u Končaru, uzorci su poslani na dodatna testiranja u tvrtku CHING čiji su sustavi premaza nanесeni na čelične ispitne uzorke, a sve u svrhu kasnije usporedbe i analize te donošenje relevantnijih zaključaka.

Podaci o uzorcima koji su se ispitivali u CHINGU, a IC sušeni su u Končaru nalaze se u tablici 6 i označeni su: 7a2 – 10a2 i 7b2 – 10b2. Uz njih, CHING je u svojem pogonu napravio referentne uzorke (B1 i B2) na koje je nanесen hibridni sustav identičan onima iz Končara te je sušen dva tjedna na sobnoj temperaturi u zatvorenom prostoru. Debljine suhog filma svakog sloja, kao i konačna debljina prikazani su u tablici 8.

Tablica 8. Debljine suhog filma (DSF) referentnih uzoraka B1 i B2 nanесenih u CHINGU

Sloj	Debljine suhog filma	
	B1	B2
EMD 156 HS	72 μm	77 μm
HV 186	72 μm	77 μm
HV 186	60 μm	55 μm
HV 43	75 μm	82 μm
Ukupno	279 μm	295 μm

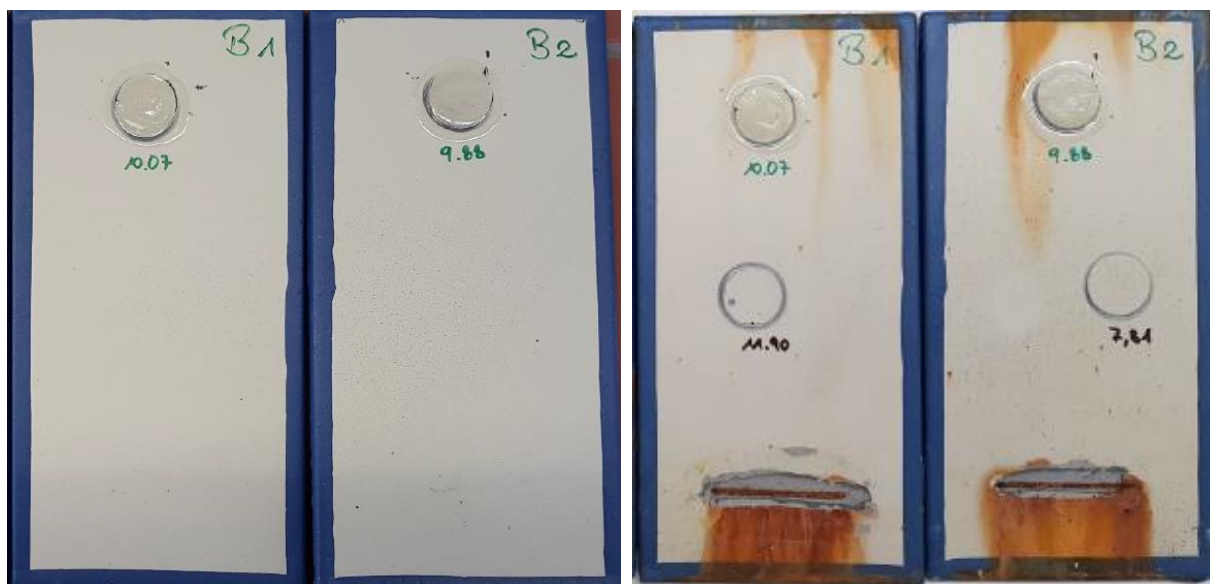
Uzorci iz Končara i CHINGA su potom podvrgnuti testovima prionjivosti vlačnom metodom prema normi HRN EN ISO 4624:2016 i ispitivanjima u slanoj komori prema normi HRN EN ISO 9227:2012. Ispitivanjem u slanoj komori simulira se izlaganje morskoj atmosferi pri čemu se razrijeđena otopina NaCl raspršuje u vidu magle na ispitne uzorke. Za kategoriju korozivnosti okoliša i trajnost C5 – H (od 15 do 25 godina), sukladno normi HRN EN ISO 12944:2018, uzorci su ispitivani u slanoj komori 1440 h (60 dana). „Pull-off“ testovi napravljeni su prije i poslije stavljanja u slanu komoru na referentnim uzorcima i na onima poslanim iz Končara.

U tablici 9 prikazani su rezultati „pull-off“ testova prije i nakon stavljanja u slanu komoru. Isto tako, u tablici se nalaze dvije DSF-a: jedne mjerene u Končaru, a druge CHINGU. Uz svaki uzorak vezana je i vrsta odvajana premaza (kohezivno ili adhezivno odvajanje).

Tablica 9. Izmjerene vrijednosti „pull-off“ testova ispitnih uzoraka prije i nakon 1440 h slane komore te vrste odvajanja čunjića od površine

Uzorci	DSF, μm (Končar)	DSF, μm (CHING)	Izmjerene vrijednosti prije slane komore, MPa	Vrsta odvajanja	Izmjerene vrijednosti poslije 1440 h slane komore, MPa	Vrsta odvajanja
B1	-	279	10,07	100% B/C	11,90	100% -/Y
B2	-	295	9,88	100% B/C	7,81	100% Y
7a2	244	243	13,64	60% B, 40% B/C	10,76	60% B, 40% B/C
7b2	267	261	12,21	90% B, 10% B/C	8,09	60% B, 40% B/C
8a2	290	287	12,55	100% B/C	8,81	100% B/C
8b2	292	289	13,63	5% B, 95% B/C	7,77	5% B, 95% B/C
9a2	238	233	13,01	70% B, 30% B/C	10,76	10% B, 90% B/C
9b2	278	285	13,87	70% B, 30% B/C	10,52	40% B, 60% B/C
10a2	263	264	14,79	70% B, 30% B/C	8,76	100% B/C
10b2	292	290	12,94	95% B, 5% B/C	7,88	100% B/C

Slika 40 prikazuje referentne ispitne uzorke B1 i B2 prije i poslije slane komore te pripadajuće „pull-off“ testove odrađene na njima. Oznaka A predstavlja površinu ispitnog uzorka, oznake B, C, D svaki sloj sustava premaza, Y označuje ljepilo, a Z površinu valjčića.



Slika 40. Referentni ispitni uzorci prije (lijevo) i poslije (desno) 1440 h slane komore te pripadajuće „pull-off“ vrijednosti prionjivosti

Slikom 41 prikazani su IC sušeni ispitni uzorci prije i poslije 1440 h slane komore te pripadajući „pull-off“ testovi na njima, a prikazani u tablici 8.



Slika 41. IC sušeni ispitni uzorci poslani iz Končara u CHING, prije (gore) i poslije (dolje) 1440 h slane komore te pripadajuće „pull-off“ vrijednosti prionjivosti

Tijekom ispitivanja u slanoj komori, u određenim vremenskim intervalima ocjenjivao se stupanj mjehuranja, prema normi HRN EN ISO 4628-2:2016 i stupanj hrđanja, prema normi HRN EN ISO 4628-3:2016. Rezultati su sljedeći:

- 240 h (10 dana): 0 (S0) stupanj mjehuranja i Ri 0 stupanj hrđanja,
- 480 h (20 dana): 0 (S0) stupanj mjehuranja i Ri 0 stupanj hrđanja,
- 720 h (30 dana): 0 (S0) stupanj mjehuranja i Ri 0 stupanj hrđanja.

Konačno, tablicom 10 dane su ocjene stupnja mjehuranja i hrđanja za svaki od ispitnih uzoraka nakon 1440 h (60 dana) slane komore te komentar o pojavi korozije ispod filma.

Tablica 10. Ocjene stupnja mjehuranja i hrđanja ispitnih uzoraka nakon 1440 h slane komore te komentar o pojavi korozije ispod filma

Uzorci	DSF, μm Končar	DSF, μm CHING	Stupanj mjehuranja	Stupanj hrđanja	Korozija ispod filma
B1	-	279	0 (S0)	Ri 0	nema
B2	-	295	0 (S0)	Ri 0	nema
7a2	244	243	0 (S0)	Ri 0	nema
7b2	267	261	0 (S0)	Ri 0	nema
8a2	290	287	0 (S0)	Ri 0	nema
8b2	292	289	0 (S0)	Ri 0	nema
9a2	238	233	0 (S0)	Ri 0	nema
9b2	278	285	0 (S0)	Ri 0	nema
10a2	263	264	0 (S0)	Ri 0	nema
10b2	292	290	0 (S0)	Ri 0	Nema

5.8. Ispitivanja u Laboratoriju za zaštitu materijala na FSB-u

Cilj je bio ispitati korozijsku otpornost hibridnog sustava premaza sušenog na sobnoj temperaturi 21 dan te usporediti njihova fizikalna i kemijska svojstva s IC sušenim uzorcima iz Končara. Rađena su ispitivanja otpornosti prema koroziji u slanoj i vlažnoj komori te ispitivanja tvrdoće (olovke i Buchholz), testovi prionjivosti premaza („Cross-cut“ i „Pull-off“) i elektrokemijska impedancijska spektroskopija (EIS) prije i poslije obiju komora.

Ukupno je bilo 7 uzoraka označenih brojevima od 1 do 7. Dva su stavljena u slanu komoru, dva u vlažnu i tri nisu testirana u komorama odnosno poslužili su kao etaloni na kojima su ispitana fizikalna svojstva. Pripremljeni ispitni uzorci, nakon sušenja na sobnoj temperaturi prikazani su na slici 42.



Slika 42. Ispitni uzorci nakon 21 dan sušenja na sobnoj temperaturi za ispitivanja u laboratoriju

Uzorcima je prije daljnjih ispitivanja izmjerena debljina suhog filma (DSF) kako je opisano u poglavlju 5.5.

U tablici 11 prikazani su rezultati mjerenja vrijednosti debljine suhog filma kod uzoraka 1 – 7. Isto tako, prikazane su minimalne i maksimalne debljine, standardna devijacija (σ) i srednje vrijednosti ($\bar{x}$).

Tablica 11. Debljina suhog filma ispitnih uzoraka 1-7

Uzorci	min. DSF, μm	max. DSF, μm	σ , μm	$\bar{x}$, μm
1	266	305	13,5	283,1
2	230	285	16,9	262,3
3	189	242	17,9	217,9
4	275	368	26,5	322,4
5	328	394	19,9	355,2
6	333	408	24,6	363,6
7	293	397	33,2	348

Uzorci 1 i 4 odabrani su za slanu komoru, 2 i 5 za vlažnu, a 3, 6 i 7 su služili kao etaloni tj. za usporedbu stanja prije i poslije komore. Izmjerene debljine uzoraka koji idu u slanu i vlažnu komoru zadovoljavaju normu HRN EN ISO 12944:2018 koji za kategoriju korozivnosti okoliša C4 i C5 i trajnost H (eng. *high*) propisuju minimalne debljine suhog filma 240 μm odnosno 260 μm .

5.8.1. Ispitivanje u vlažnoj komori

Ispitivanjem u vlažnoj komori simulira se ponašanje materijala u vlažnoj i toploj atmosferi uz kondenziranje vode. Ispitivanje je provedeno u Laboratoriju za zaštitu materijala, sukladno normi HRN EN ISO 6270-2:2007. Temperatura ispitivanja je 40 ± 3 °C, a relativna vlažnost zraka je oko 100 % s orošavanjem uzoraka. Ispitivanje je provedeno u vlažnoj komori proizvođača C&W, *Humidity Cabinet Model AB6* te je zajedno s ispitivanim uzorcima prikazan na slici 43. Za kategoriju korozivnosti okoliša C4 (obuhvaća industrijske sredine i obalna područja s umjerenim salinitetom) i trajnost VH (eng. *very high*, više od 25 godina), a prema normi HRN EN ISO 12944-6:2018, uzorci su ispitivani 720 h (30 dana).

Uzorci su nakon 30 dana izvađeni iz komore te je analizirano njihovo stanje koje se može vidjeti na slici 44. Izvan komore su proveli još tjedan dana te se nakon toga krenulo u ispitivanja prionjivosti premaza vlačnom metodom i urezivanjem mrežice, kao i ispitivanje njegove tvrdoće s Buchholz metodom i olovkama. Na kraju je napravljena i elektrokemijska impedancijska spektroskopija (EIS).



Slika 43. Vlažna komora u Laboratoriju za zaštitu materijala i ispitni uzorci u njoj



Slika 44. Ispitni uzorci nakon provedenih 30 dana u vlažnoj komori

Na uzorku 5 iz vlažne komore došlo je do mjehuranja na površini premaza te je prema normi HRN EN ISO 4628-2:2016 dana ocjena stupnja mjehuranja 2(S3).

Isto tako, na uzorku 2 iz vlažne komore pojavila se hrđa na površini premaza. Nastala je lokalno, na jednom mjestu i prema normi HRN EN ISO 4628-3:2016 ocjena stupnja hrđanja na površini premaza je Ri 1: 0,05 %.

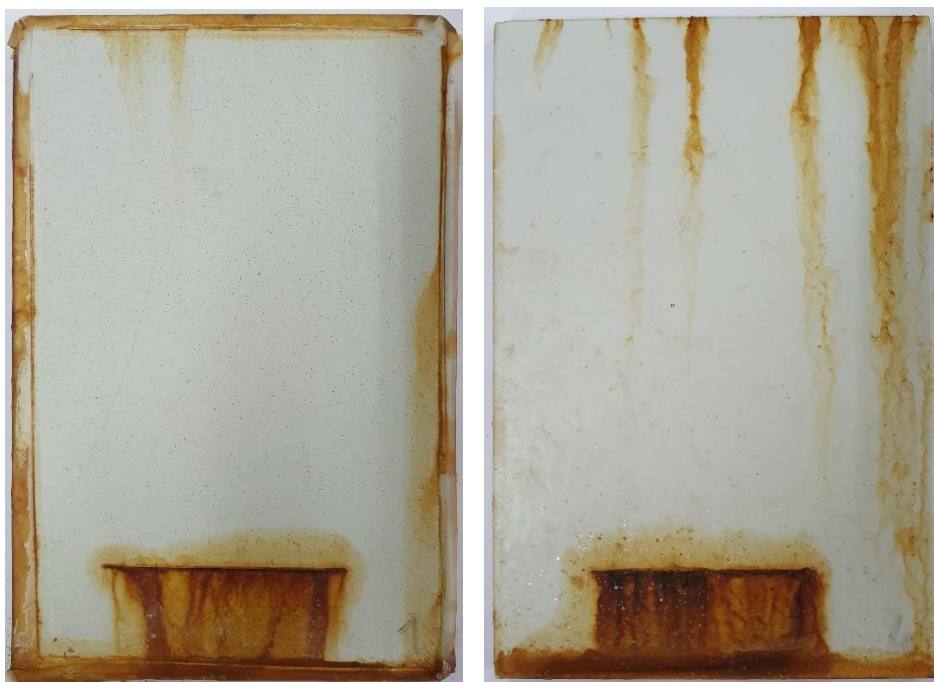
5.8.2. Ispitivanje u slanoj komori

Kao što je navedeno i u poglavlju 5.7., ispitivanjem u slanoj komori simulira se izlaganje morskoj atmosferi pri čemu se razrijeđena otopina NaCl raspršuje u vidu magle na ispitne uzorke. Ispitivanje je provedeno u Laboratoriju za zaštitu materijala, prema normi HRN EN ISO 9227:2012. Temperatura u slanoj komori je 35 ± 2 °C, tlak komprimiranog zraka je 0,7 – 0,14 bara, a koncentracija NaCl otopine je 5 %. Ispitivanje je provedeno u slanoj komori *Ascott S450* koja je, zajedno s ispitnim uzorcima u njoj, prikazana na slici 45. Uzorci su prije stavljanja u slanu komoru zarezani skalpelom po dužini od 5 cm, kako bi se moglo promatrati širenje korozije ispod oštećenog dijela premaza, što je isto vidljivo slikom 45. Za kategoriju korozivnosti okoliša i trajnost C5 – H (od 15 do 25 godina), sukladno normi HRN EN ISO 12944:2018, uzorci su ispitivani u slanoj komori 1440 h (60 dana).



Slika 45. Slana komora u Laboratoriju za zaštitu materijala i ispitni uzorci u njoj

Uzorci su nakon 60 dana izvađeni iz komore te je analizirano njihovo stanje koje se može vidjeti na slici 46. Izvan komore su proveli jedan dan te se nakon toga krenulo u ispitivanja prionjivosti premaza vlačnom metodom i urezivanjem mrežice, ispitivanje njegove tvrdoće s Buchholz metodom i olovkama te ocjena stupnja korozije oko ureza. Na kraju je provedena i elektrokemijska impedancijska spektroskopija (EIS).



Slika 46. Ispitni uzorci nakon 60 dana provedenih u slanoj komori

Na površini premaza nije uočeno mjehuranje niti hrđanje, stoga je ocjena stupnja mjehuranja 0(S0), a ocjena stupnja hrđanja Ri 0.

Stupanj korozije oko ureza ocjenjivao se sukladno normi HRN EN ISO 12944-6, a računa se prema jednadžbi:

$$M = \frac{c - w}{2} \quad (1)$$

- M – ocjena stupnja korozije, mm
- c – širina zone korozije, mm
- w – širina ureza, mm

Širina ureza jednaka je debljini oštice skalpela, a iznosi 0,2 mm. Širina zone korozije mjeri se na svakih 0,5 cm po duljini, ukupno 10 mjerenja, nakon čega se izračuna aritmetička sredina i dobije se njena vrijednost. Na slici 47 prikazan je urez podijeljen na segmente od 0,5 cm.



Slika 47. Ocjenjivanje stupnja korozije oko ureza

$$M = \frac{0,93 - 0,2}{2} = 0,365 \text{ mm} \quad (2)$$

Prema normi, ocjena stupnja korozije ne smije biti veća od 1,5 mm, što u ovom slučaju nije te je ispitivanje zadovoljeno.

5.8.1. Ispitivanje prionjivosti urezivanjem mrežice („Cross-cut“ test)

Ispitivanje prionjivosti urezivanjem mrežice ili „Cross-cut“ test jedna je od dvije metode ispitivanja prionjivosti i izvodi se prema normi HRN EN ISO 2409:2013 sa priborom prikazanim na slici 48. Ocjenjivanje se vrši usporedbom izgleda urezane mrežice sa standardnom skalom navedenoj u normi HRN EN ISO 2409. Standardna skala po toj normi prikazuje slika 49.

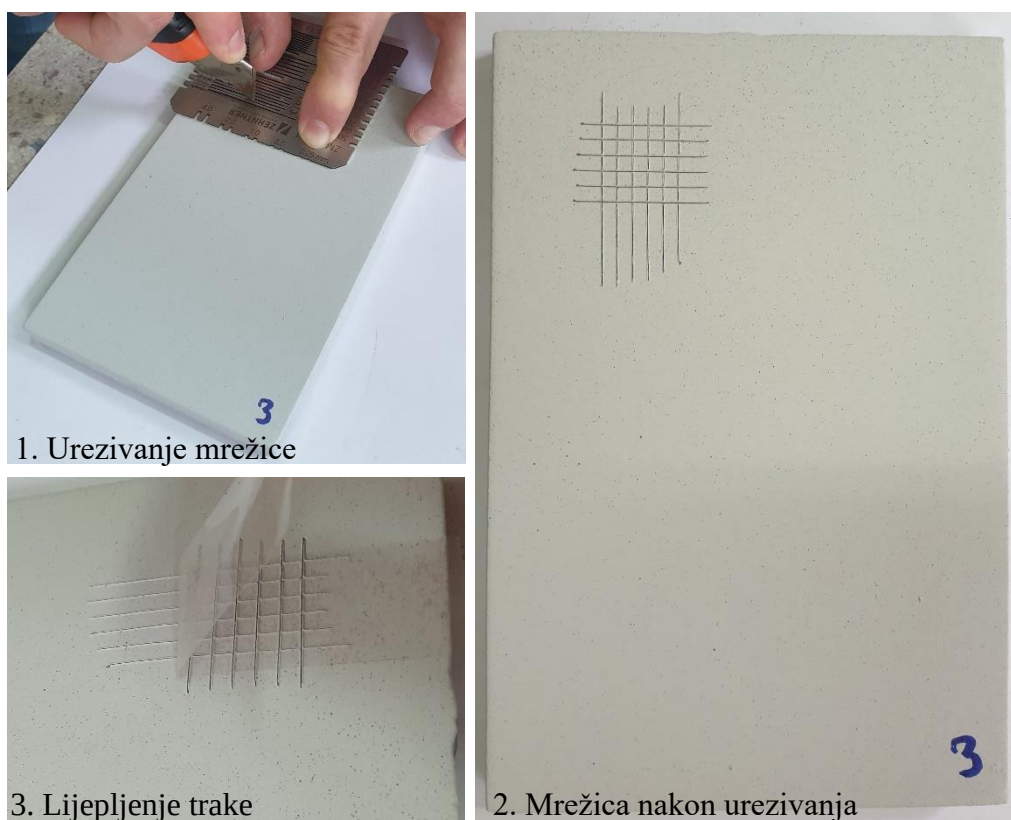


Slika 48. Set za ispitivanje prionjivosti urezivanjem mrežice

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

Slika 49. Skala za ocjenjivanje prionjivosti po normi HRN EN ISO 2409

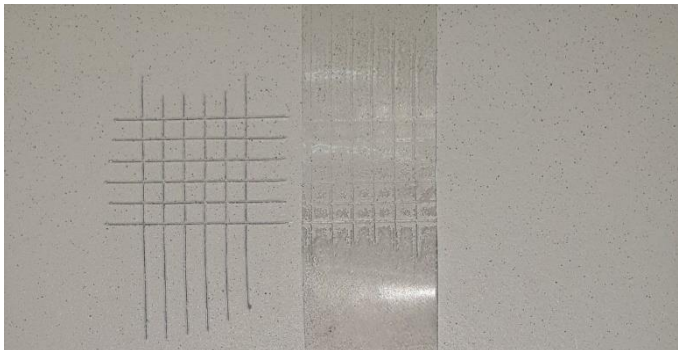
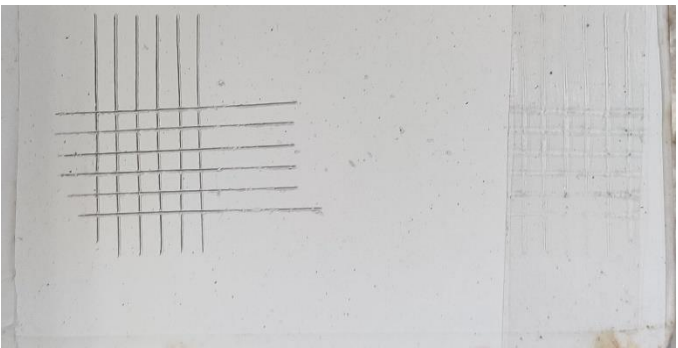
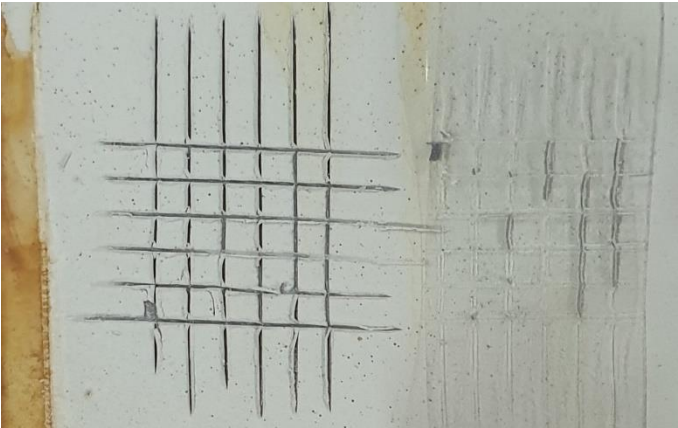
Kako bi se znalo koju udaljenost između redova koristiti za urezivanje mrežice na ispitne uzorke, potrebno je znati debljinu premaza. Izmjerene vrijednosti pokazuju da sve debljine premaza prelaze $120\text{ }\mu\text{m}$, što znači da se odabiru usporedne linije čija je međusobna udaljenost 3 mm. Skalpelom se urezuje mrežica od 6 x 6 ureza pod pravim kutom, nakon čega se na urezanu mrežicu zalijepi ljepljiva vrpca, tako se drži jednu minutu i zatim se naglo odlijepi pod kutom od 60° . Potom se promatra kvaliteta mrežnih očica nakon skidanja ljepljive trake. Postupak urezivanja mrežice i lijepljenja trake vidljiv je na slici 50.



Slika 50. Urezivanje mrežice i lijepljenje trake za test prionjivosti

U tablici 12 prikazan je etalon te uzorci iz vlažne i slane komore. Kod etalona i uzorka iz vlažne komore rubovi su potpuno glatki, niti jedan kvadratić mrežice nije oštećen ni oljušten te im je ocjena prionjivosti 0. Kod uzorka iz slane komore vrlo malo premaza je oštećeno i oljušteno na području sjecišta te mu je ocjena prionjivosti 1.

Tablica 12. Ocjene prionjivosti etalona te uzoraka iz vlažne i slane komore

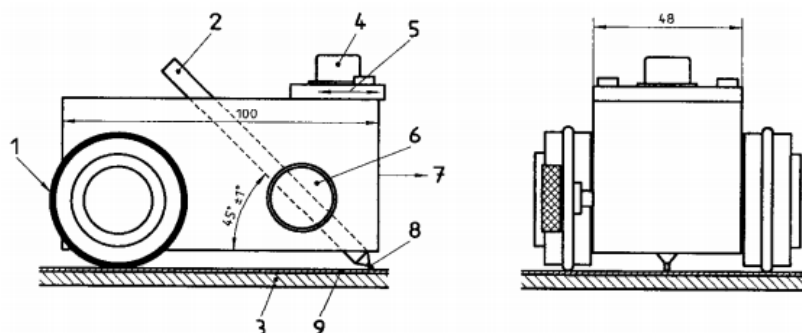
Vrsta uzoraka	„Cross-cut“ test	Ocjena prionjivosti
Uzorak nije bio u komori (etalon)		0
Ispitivanje u vlažnoj komori (720 h)		0
Ispitivanje u slanoj komori (1440 h)		1

5.8.2. Ispitivanje tvrdoće premaza olovkama

Ispitivanje tvrdoće premaza olovkama provodi se prema normi HRN EN ISO 15184. Cilj ispitivanja je pomoću olovka različitih tvrdoća odrediti tvrdoću premaza. U ispitivanju se koriste olovke slijedećih tvrdoća, od najmekše prema najtvrđoj:

9B – 8B – 7B – 6B – 5B – 4B – 3B – 2B – B – HB – F – H – 2H – 3H – 4H – 5H – 6H – 7H – 8H – 9H.

Ispitivanje se provodi pomoću uređaja prikazanog na slici 51 i 52, u kojeg se stavlja olovka pod kutom od 45° . Odabir olovaka ide tako da se kreće od najtvrđe prema najmekšoj. Ispitivanje tvrdoće premaza se zaustavlja onog trenutka kada olovka kojom ispitujemo tvrdoću premaza ne ostavi trag na površini premaza. Ispitivanju su podvrgnuti uzorci prije i nakon ispitivanja u uvjetima vlažne i slane komore.

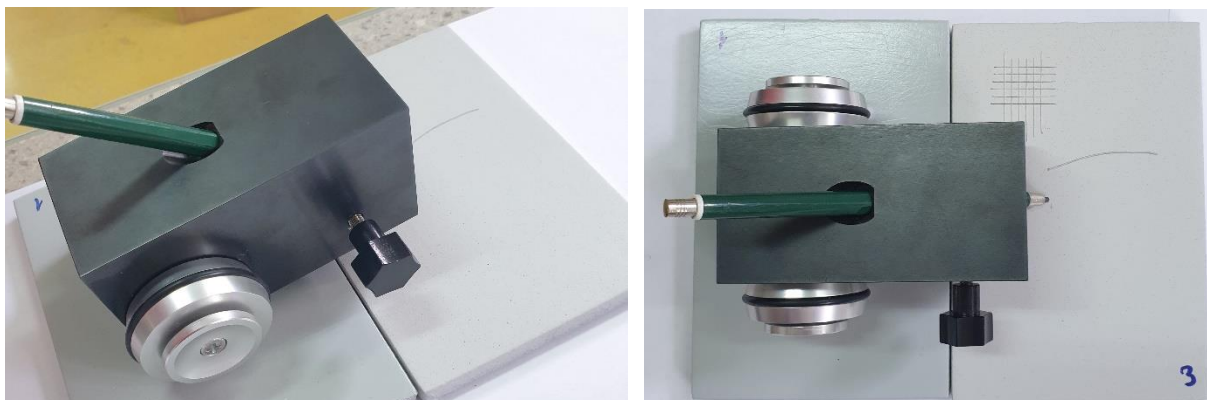


Slika 51. Uređaj za ispitivanje tvrdoće premaza olovkama prema normi HRN EN ISO 15184

Oznake:

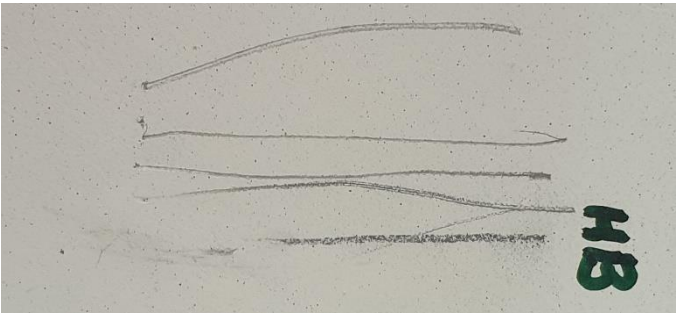
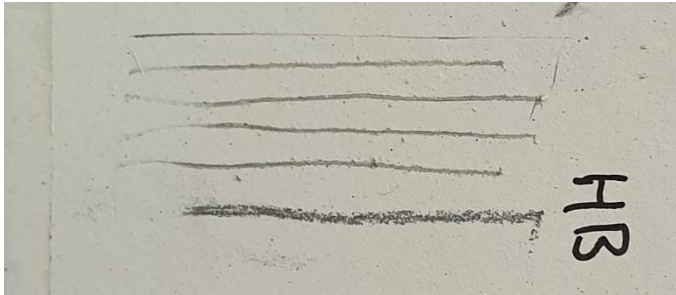
- | | |
|--------------------------------------|----------------------------|
| 1. Gumeni prsten za vođenje uređaja, | 6. Stezaljka, |
| 2. Olovka, | 7. Smjer kretanje uređaja, |
| 3. Podloga, | 8. Grafit, |
| 4. Level, | 9. Premaz. |
| 5. Mali, pomični uteg, | |

Tablicom 13 prikazani su provedeni testovi tvrdoće na etalonu te uzorcima iz slane i vlažne komore, kao i njihove ocjene. Svi ispitni uzorci imaju HB tvrdoću, iz čega se može zaključiti da im tvrdoća tokom ispitivanja u komorama nije pala.



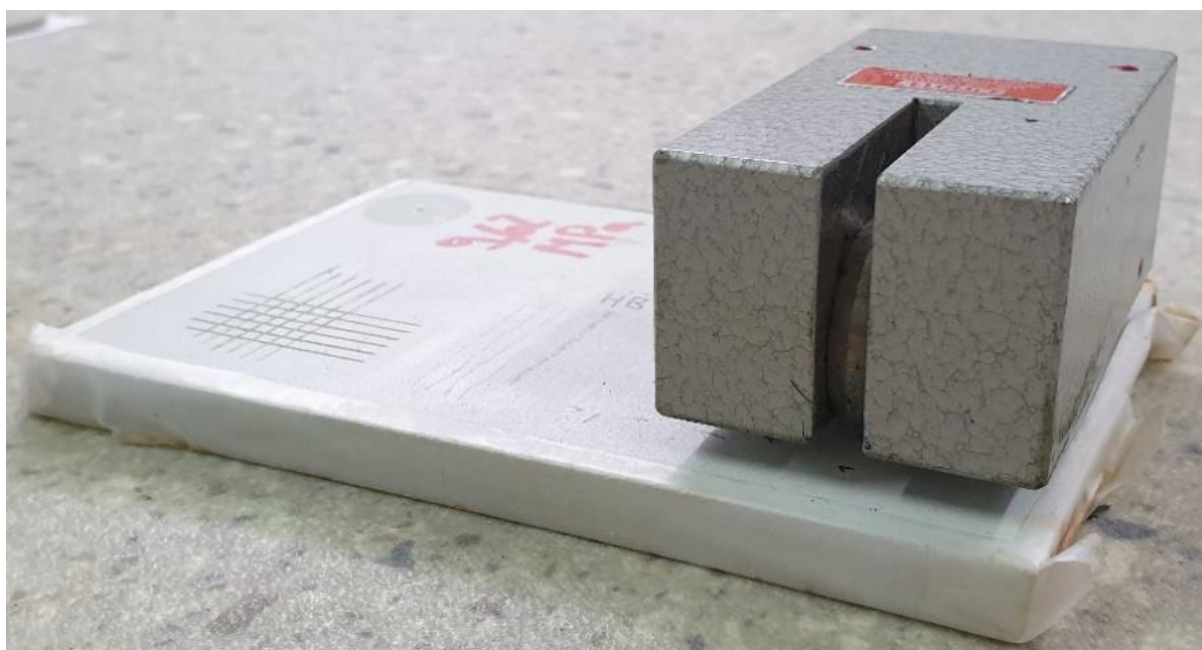
Slika 52. Ispitivanje tvrdoće premaza olovkama

Tablica 13. Ocjene tvrdoće etalona te uzoraka iz vlažne i slane komore

Vrsta uzoraka	Ispitivanje tvrdoće olovkama	Ocjena tvrdoće
Uzorak nije bio u komori (etalon)		HB
Ispitivanje u vlažnoj komori (720 h)		HB
Ispitivanje u slanoj komori (1440 h)		HB

5.8.3. Ispitivanje tvrdoće po Buchholzu

Ispitivanje se provodi mjerenjem duljine otiska nakon djelovanja utisnog tijela na premaz, sukladno normi HRN EN ISO 2815. Utisno tijelo (slika 53), izvedeno tako da prilikom utiskivanja djeluje sila od 5 N, položi se bez udara na prevlaku i drži 30 s. Nakon 30 s tijelo se podigne, a prema duljini otiska na premazu određuje se tvrdoća prevlake, tj. tvrda prevlaka – kraći otisak.

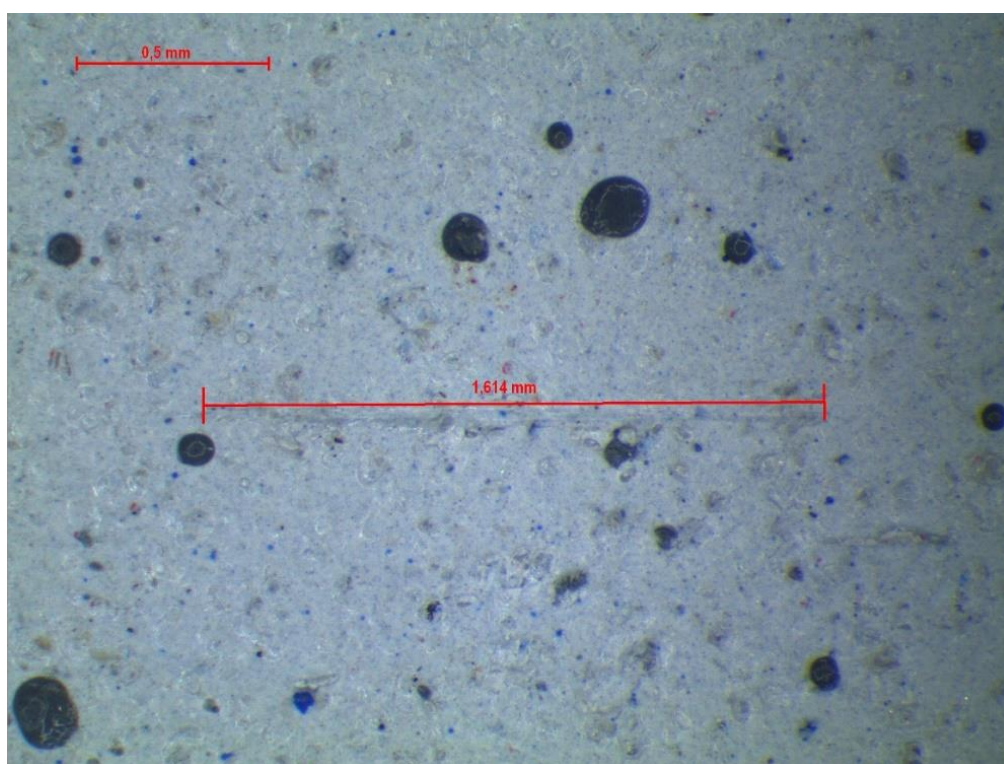


Slika 53. Utisno tijelo za ispitivanje tvrdoće po Buchholzu

Duljina otiska na premazu mjerila se pod stereomikroskopom kao na slici 54, a za svaki od tri uzorka (etalon, vlažna i slana komora) ukupno je napravljeno 5 mjerenja te izračunata aritmetička sredina. Vrijednosti tvrdoće prikazane su u tablici 14.

Tablica 14. Izmjerene duljine otiska na premazu pod stereomikroskopom

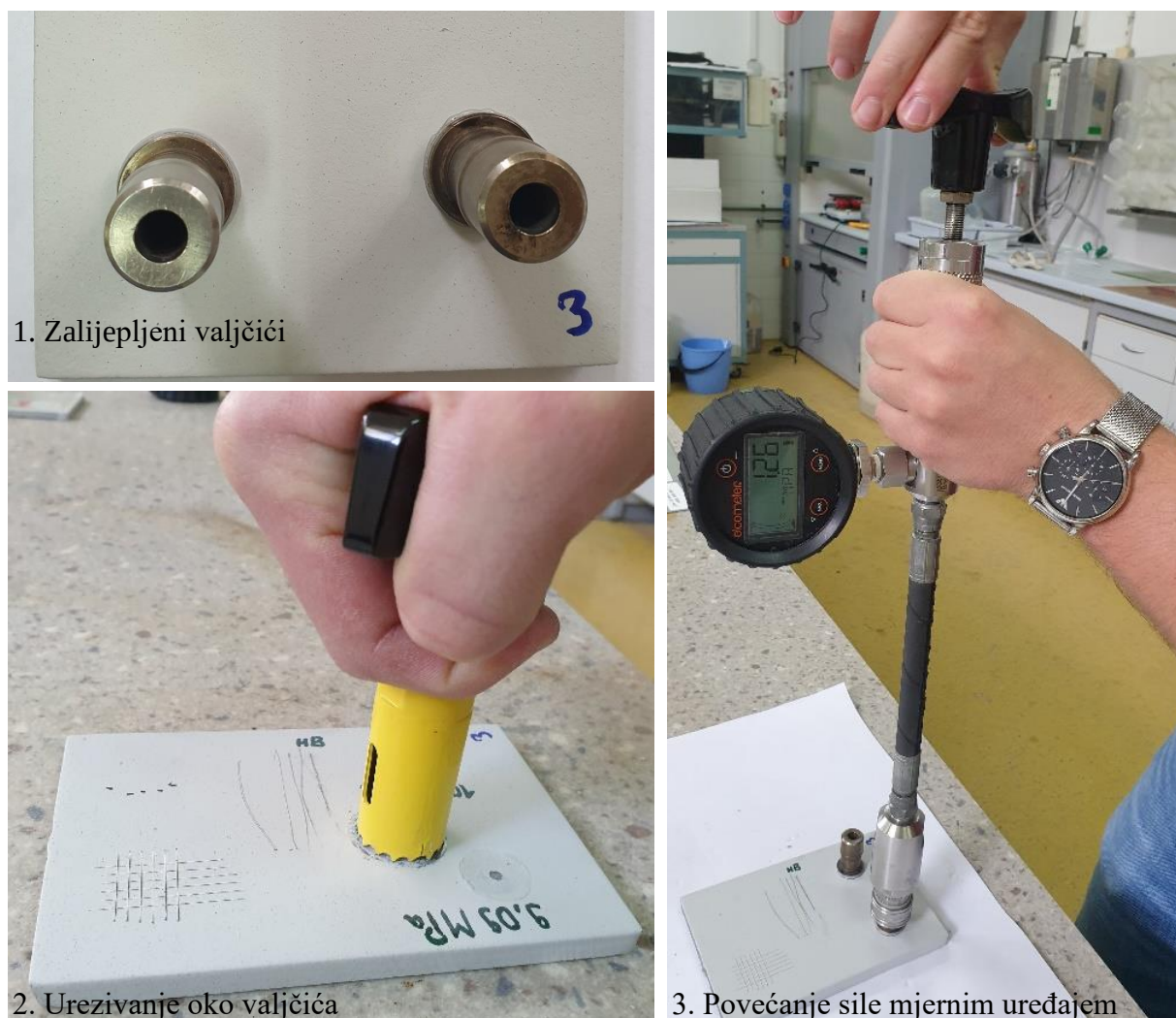
Mjerenje	Duljina otiska, mm		
	Etalon	Uzorak - vlažna komora	Uzorak - slana komora
1	1,322	1,178	1,269
2	1,614	1,165	1,208
3	1,625	1,349	1,298
4	1,229	0,996	1,153
5	1,565	1,370	1,001
$\bar{x}$	1,471	1,212	1,186



Slika 54. Izmjerena duljina otiska na premazu pod stereomikroskopom

5.8.4. Ispitivanje prionjivosti vlačnom metodom

Detaljan način izvođenja ovog ispitivanja opisan je u poglavlju 5.6., a slikom 55 prikazani su nalijepljeni valjčići na etalonu i postupno povećanje sile mjernim uređajem kako bi došlo do odvajanja valjčića od površine premaza. Posebno se može oko valjčića urezati krug, odvojiti ga od ostatka premaza i potom ispitati prionjivost te usporediti rezultate s klasičnim načinom.

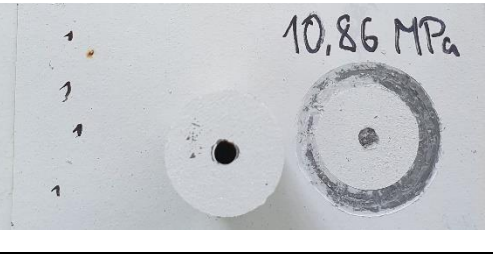
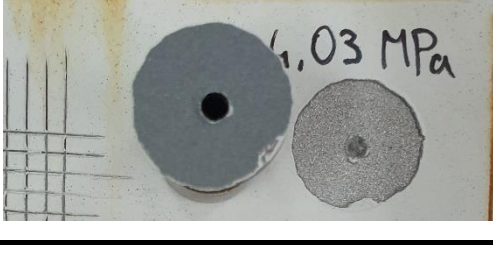
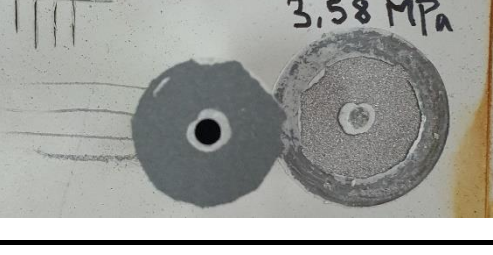


Slika 55. Postupak ispitivanja prionjivosti vlačnom metodom

U tablici 15 prikazani su etalon te uzorci iz slane i vlažne komore s odvojenim valjčićima (sa i bez kružnog ureza oko njih) od površine premaza te izmjerene vrijednosti uz svaki od njih.

Tablicom 16 prikazane su izmjerene vrijednosti na svakom uzorku, njihova srednja vrijednost te vrsta odvajanja između površine premaza i valjčića. Odvajanje između podloge i premaza može biti kohezivno (ako je na valjčiću i podlozi isti sloj premaza) ili adhezivno (ako je na valjčiću i podlozi različiti sloj premaza). Oznaka A predstavlja površinu ispitnog uzorka, oznake B, C, D svaki sloj sustava premaza, Y označuje ljepilo, a Z površinu valjčića.

Tablica 15. Izmjerene vrijednosti odvajanja valjčića (sa i bez kružnog ureza oko njih) od površine premaza

Vrsta uzoraka	Pull-off test	
	Bez ureza	S kružnim urezom
Uzorak nije bio u komori (etalon)		
Ispitivanje u vlažnoj komori (720 h)		
Ispitivanje u slanoj komori (1440 h)		

Tablica 16. Izmjerene vrijednosti i vrsta odvajanja valjčića od površine premaza na uzorku koji nije išao u komore te uzorcima iz vlažne i slane komore

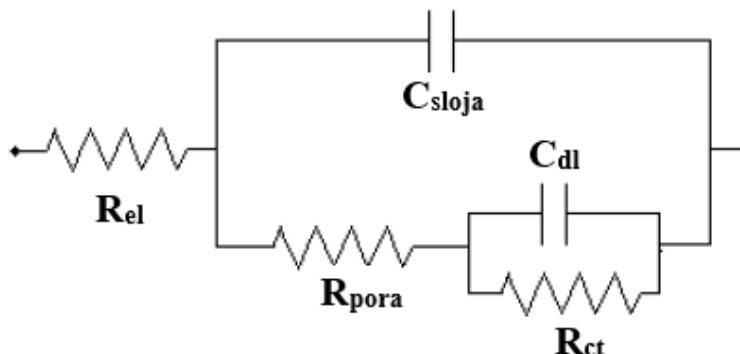
Uzorci	Izmjerene vrijednosti, MPa	Vrsta odvajanja	Srednja vrijednost $\bar{x}$, MPa
Etalon	9,09	60% D/Y	10,73
	10,31	90% D, 10% D/Y	
	12,79	100% D	
Vlažna komora (720 h)	9,62	92% D, 8% D/Y	10,24
	10,86	95% D, 5% D/Y	
Slana komora (1440 h)	4,03	95% A/B, 5% D/Y	3,81
	3,58	95% A/B, 5% D/Y	

5.8.5. Elektrokemijska impedancijska spektroskopija

Elektrokemijska impedancijska spektroskopija (EIS) spada u metode elektrokemijskih korozijskih ispitivanja izmjeničnom (AC) strujom. U elektrokemijskim tehnikama s izmjeničnom strujom ne dolazi do narušavanja sustava, što je slučaj pri uporabi elektrokemijskih polarizacijskih tehnika koje se temelje na istosmjernoj (DC) struji. Iz tog razloga, AC metodama, u ovom slučaju EIS metodi daje se prednost pri istraživanju elektrokemijskih reakcija na granici faza [6]

Osnovni principi ove tehnike elektrokemijskog ispitivanja počivaju na odašiljanju izmjeničnog signala male amplitude (5 do 20 mV) te širokog opsega frekvencija (1 mHz do 1 MHz) do elektrode (ispitni uzorak) koja je uronjena u elektrolit (agresivni korozivni medij). Impedancija je mjera mogućnosti električnog kruga da pruži otpor struji [6].

Za opisivanje impedancijskih spektara korišten je model ekvivalentnog električnog kruga za porozne premaze, koji je prikazan na slici 56.

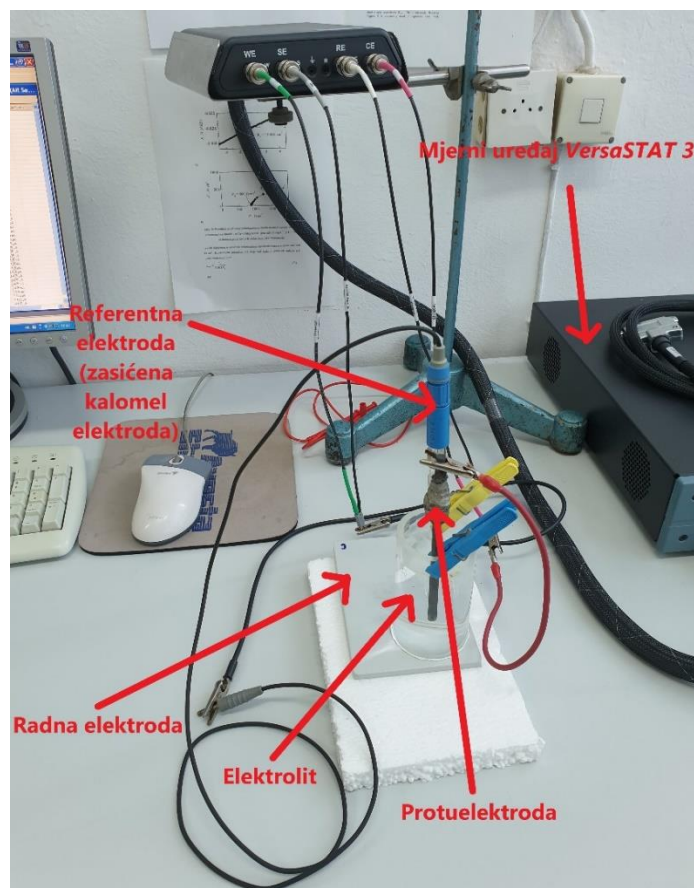


Slika 56. Ekvivalentni krug korišten za opisivanje impedancijskih spektara u eksperimentu [25]

EIS ispitivanje podijeljeno je u tri dijela. Na ispitnom uzorku koji nije ispitam u komorama tj. etalonu ispitivanja su trajala 60 dana. Tokom tih 60 dana mjerio se otpor premaza te se promatrao potencijal otvorenog strujnog kruga. Ispitivanja su počela onog trenutka kad su se po dva para ispitnih uzoraka stavili u slanu i vlažnu komoru i ponavljala su se nakon 1, 3, 7, 14, 22, 29, 35, 42, 49, 56 i 60 dana. Mjerenja su provedena na sobnoj temperaturi, za područje frekvencija od 100 mHz do 100 kHz te amplitudu promjene potencijala od 10 mV.

Na ispitnim uzorcima iz slane i vlažne komore, ispitivanja su rađena nakon što su izvađeni iz komora. I tu su mjerenja provedena na sobnoj temperaturi, za isto područje frekvencija (100 mHz – 100 kHz), samo što je amplituda promjene potencijala bila 100 mV. Isti parametri korišteni su i za zadnje ispitivanje etalona, u svrhu usporedbe s uzorcima iz slane i vlažne komore. Za etalon i ispitni uzorak iz slane komore za elektrolit je korištena 5% - tna otopina NaCl, dok je za uzorak iz vlažne komore korištena destilirana voda.

Ispitivanja su provedena na uređaju *VersaSTAT 3*, proizvođača *AMTEK*, uz prikladan software *VersaSTUDIO v2.44*. Podaci dobiveni iz programa *VersaSTUDIO* obrađuju se u programu *ZsimpWin* primjenom odgovarajućeg ekvivalentnog električnog kruga (modela). Sva ispitivanja provedena su u Laboratoriju za zaštitu materijala, na mjernoj opremi prikazanoj na slici 57.



Slika 57. Mjerna oprema za EIS

Elektrokemijska mjerenja provode se u elektrokemijskoj ćeliji koja se sastoji od 3 elektrode: radne (ispitivani metal/uzorak), referentne ($\text{Hg}_2/\text{Hg}_2\text{Cl}_2$, Ag/AgCl , Cu/CuSO_4 ili dr.) i pomoćne elektrode (grafit ili platina). Elektrode se spajaju na potenciostat ili galvanostat. Radna elektroda je ispitni uzorak, a elektrolitu je izložena površina od 19.6 cm^2 .

Referentna elektroda je elektroda poznatog potencijala koja ne sudjeluje u strujnom krugu već se pomoću nje samo mjeri potencijal radne elektrode. U laboratorijskim se uvjetima uglavnom primjenjuje zasićena kalomel elektroda, ZKE, standardnoga elektrodnog potencijala $+0,242 \text{ V}$ s obzirom na vodikovu elektrodu. Nije direktno uronjena u ispitni elektrolit, već se pomoću Lugginova mosta približava radnoj elektrodi.

U tablici 17 prikazani su potencijali otvorenog strujnog kruga i vrijednosti otpora premaza pri $0,1 \text{ Hz}$ praćeni kroz 60 dana za ispitni uzorak koji nije ispitao u komore, a za koji je korištena 5%-tna otopina NaCl -a kao elektrolit.

Tablica 17. Potencijali otvorenog strujnog kruga i vrijednosti otpora premaza pri $0,1 \text{ Hz}$ praćeni kroz 60 dana za ispitni uzorak koji nije ispitan u komorama tj. etalon s 5%-tnom NaCl otopinom kao elektrolitom

DAN	Potencijal otvorenog strujnog kruga u odnosu na ZKE (mV)	Izmjerene vrijednosti otpora premaza pri $0,1 \text{ Hz}$ (M Ω)
0	390,129	115,962
1	-135,871	94,635
3	-107,654	103,469
7	-101,826	119,492
14	-109,494	145,562
22	-115,015	145,652
29	-117,601	174,819
35	-129,123	157,903
42	-128,510	144,577
49	-111,028	167,663
56	-124,829	173,045
60	-95,692	164,644

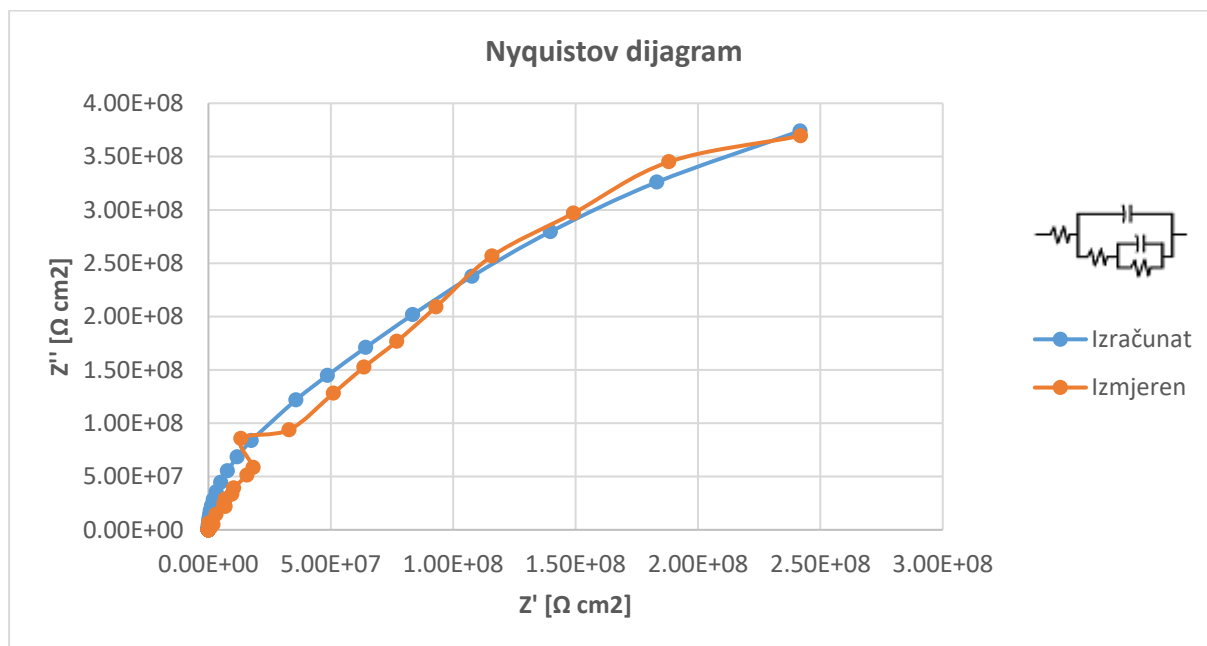
U tablici 18 prikazane su izmjerene vrijednosti kapaciteta i otpora, kao i sume otpora. Također, na slikama 58 – 60 prikazani su za svaki uzorak Nyquistovi dijagrami nakon izlaganja 5%-tnoj otopini NaCl (etalon i slana komora) ili destiliranoj vodi (vlažna komora). EIS za etalon napravljen je nakon 60 dana izlaganja elektrolitu, dok je za uzorke iz slane i vlažne komore napravljen isti dan kad i izlaganje elektrolitu.

Oznake izmjerenih vrijednosti i simboli modela:

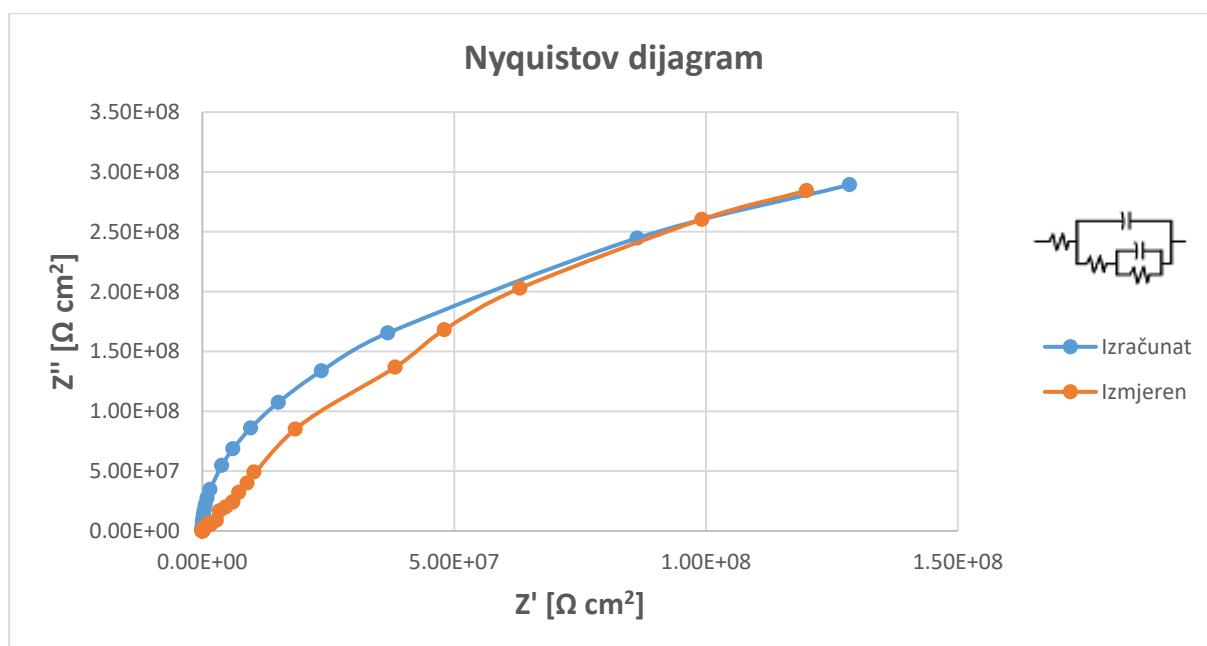
- T - vrijeme izlaganja elektrolitu, [dan],
- R1 - otpor elektrolita, [Ωcm^2],
- R2 - otpor premaza, [Ωcm^2],
- R3 - polarizacijski otpor (otpor prijenosu naboja), [Ωcm^2],
- C1 - kapacitet premaza, [F/cm^2],
- C2 - kapacitet dvosloja, [F/cm^2],
- ΣR - zbroj otpora, [Ωcm^2].

Tablica 18. Izmjerene vrijednosti kapaciteta i otpora ispitnih uzorka

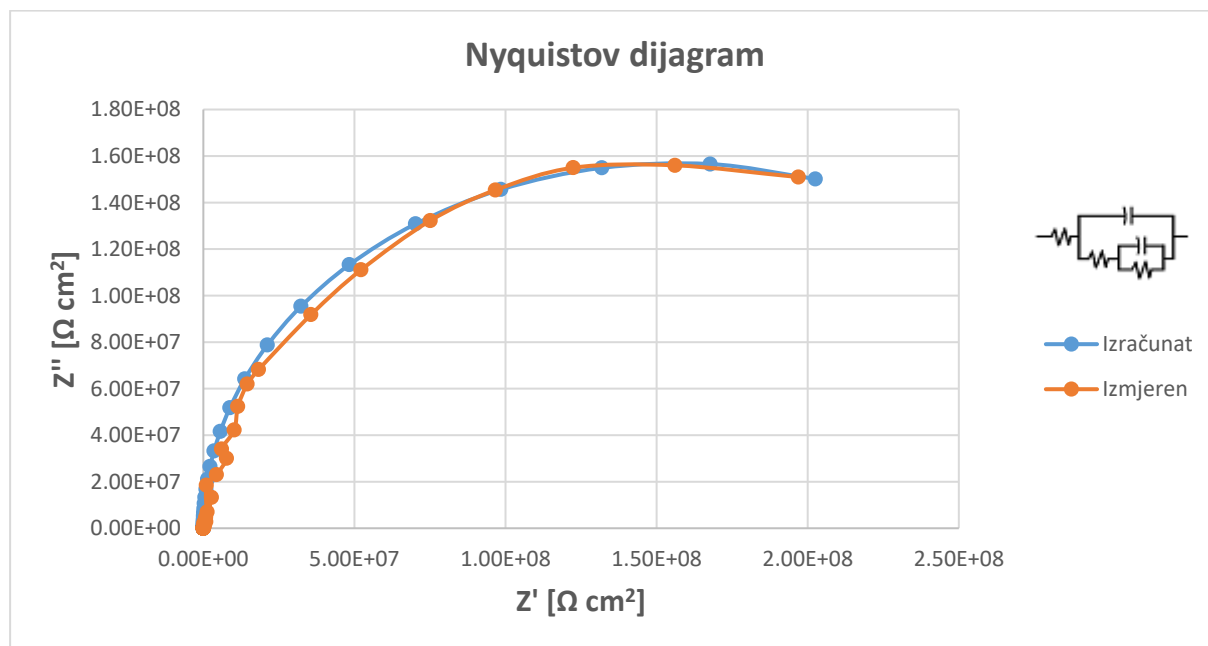
Uzorak	T, dan	R1, Ωcm^2	C1, Ωcm^2	R2, Ωcm^2	C2, Ωcm^2	R3, Ωcm^2	ΣR , Ωcm^2
Etalon	60	419	$1,388 \cdot 10^{-9}$	$3,918 \cdot 10^8$	$1,622 \cdot 10^{-9}$	$5,805 \cdot 10^8$	$9,723 \cdot 10^8$
Vlažna komora	0	838,1	$1,045 \cdot 10^{-9}$	$1,475 \cdot 10^4$	$1,855 \cdot 10^{-9}$	$7,798 \cdot 10^8$	$7,798 \cdot 10^8$
Slana komora	0	395,3	$1,047 \cdot 10^{-9}$	$7,020 \cdot 10^3$	$4,228 \cdot 10^{-10}$	$3,139 \cdot 10^8$	$3,139 \cdot 10^8$



Slika 58. Nyquistov dijagram – etalon nakon 60 dana u 5%-tnoj otopini NaCl



Slika 59. Nyquistov dijagram – ispitni uzorak nakon 720 h ispitivanja u vlažnoj komori



Slika 60. Nyquistov dijagram – ispitni uzorak nakon 1440 h ispitivanja u slanoj komori

6. REZULTATI I RASPRAVA

U ovom poglavlju analizirani su rezultati provedenih ispitivanja. Korišteni su grafički prikazi podataka radi bolje preglednosti i mogućnosti analize.

6.1. IC sušenje

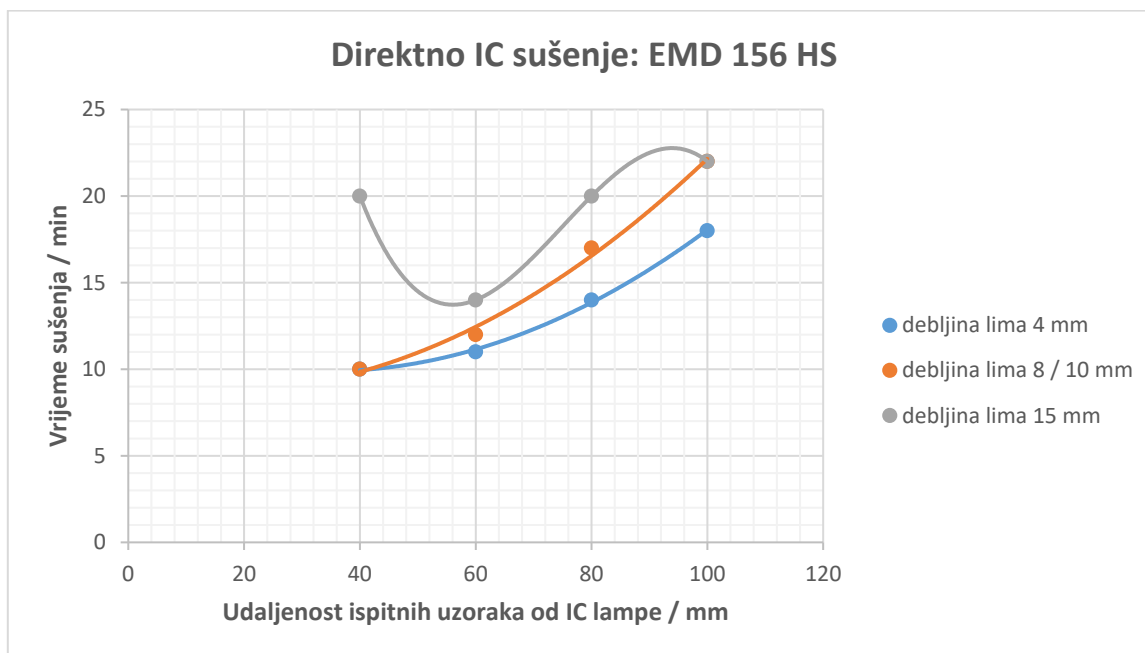
Kao što je već rečeno u prethodnim poglavljima, nekoliko stvari se promatralo prilikom IC sušenja premaza. U prvom dijelu se promatralo kako zadani parametri utječu na brzinu sušenja premaza. Parametri koji su se promatrali je bila udaljenost od IC emitera, debljina ispitnog uzorka i način sušenja (direktno ili indirektno). Valja napomenuti da se nešto suho, odnosno umreženo smatralo prolaskom olovke po površini premaza i ukoliko na njemu nije ostao trag, bio je spreman za nanos drugog sloja, kojeg nije bilo u prvom dijelu ispitivanja.

Drugi dio ispitivanja sastojao se od nanošenja sustava premaza na čelični uzorak, koji je sušen kombinacijom IC-a i sušenja na sobnoj temperaturi, nakon čega su provedeni testovi prionjivosti u Končaru i CHING-u te ispitivanje u slanoj komori.

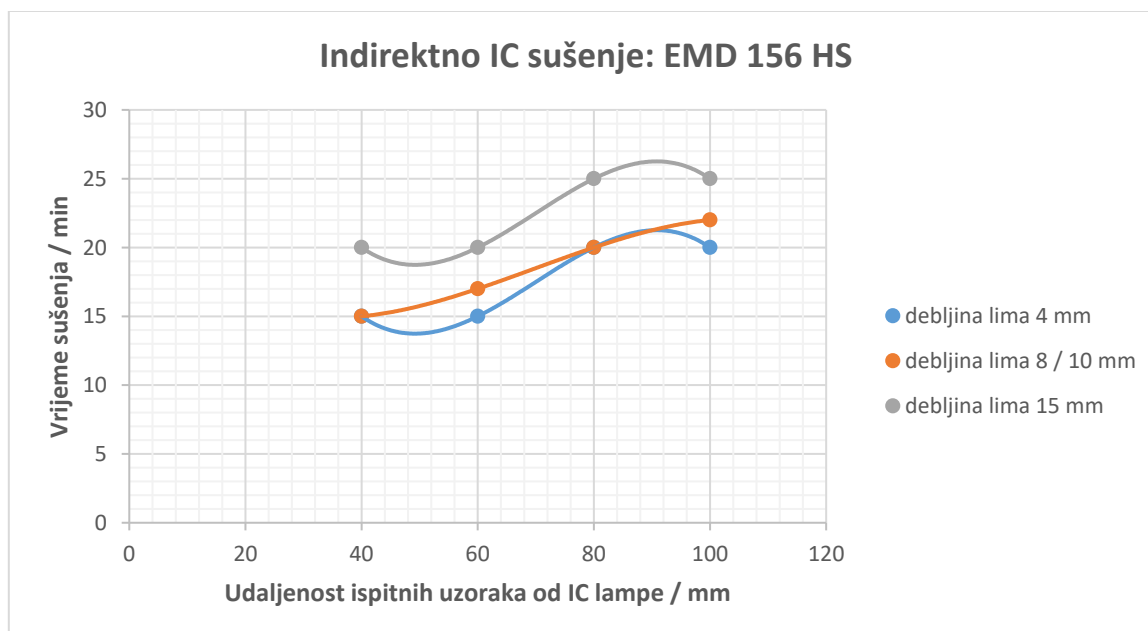
Isto tako, kada je nešto suho subjektivni je dojam. To je posebno izraženo kod vodorazrjedivih premaza gdje se oni na dodir mogu činiti suhi, međutim kasnije dolazi do pojave mjehuranja ukoliko ne uzmemo dovoljno vremena za sušenje na zraku koje smo pokazali da iznosi 1:45 h.

6.1.1. Analiza utjecaja parametara na vrijeme sušenja

Na slikama 61 – 66 prikazani su usporedni grafovi za svaki od tri tipa premaza korištenih u eksperimentu, a u kojima se uspoređivalo kako se vrijeme sušenja mijenja ovisno o udaljenosti od IC emitera i debljini lima. Također, razlika je bila i u načinu sušenja: direktno i indirektno (preko reflektirajuće podloge) izložene površine IC zračenju.



Slika 61. Utjecaj debljine lima i udaljenosti ispitnih uzoraka od direktnog IC zračenja na vrijeme sušenja, za premaz EMD 156 HS

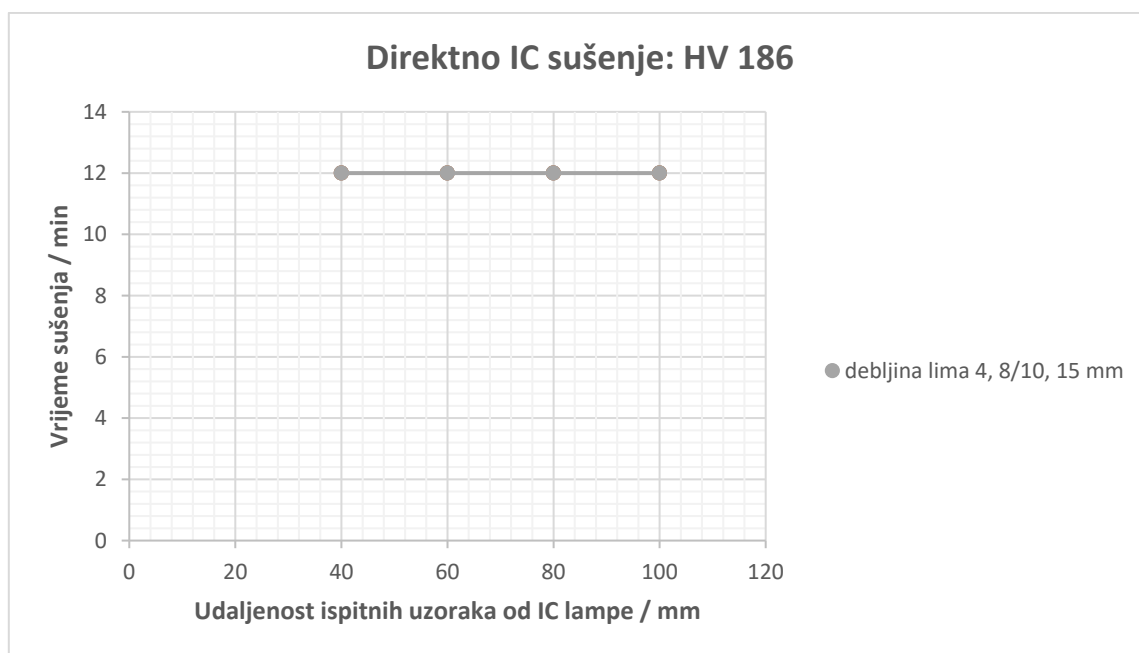


Slika 62. Utjecaj debljine lima i udaljenosti ispitnih uzoraka od indirektnog IC zračenja na vrijeme sušenja, za premaz EMD 156 HS

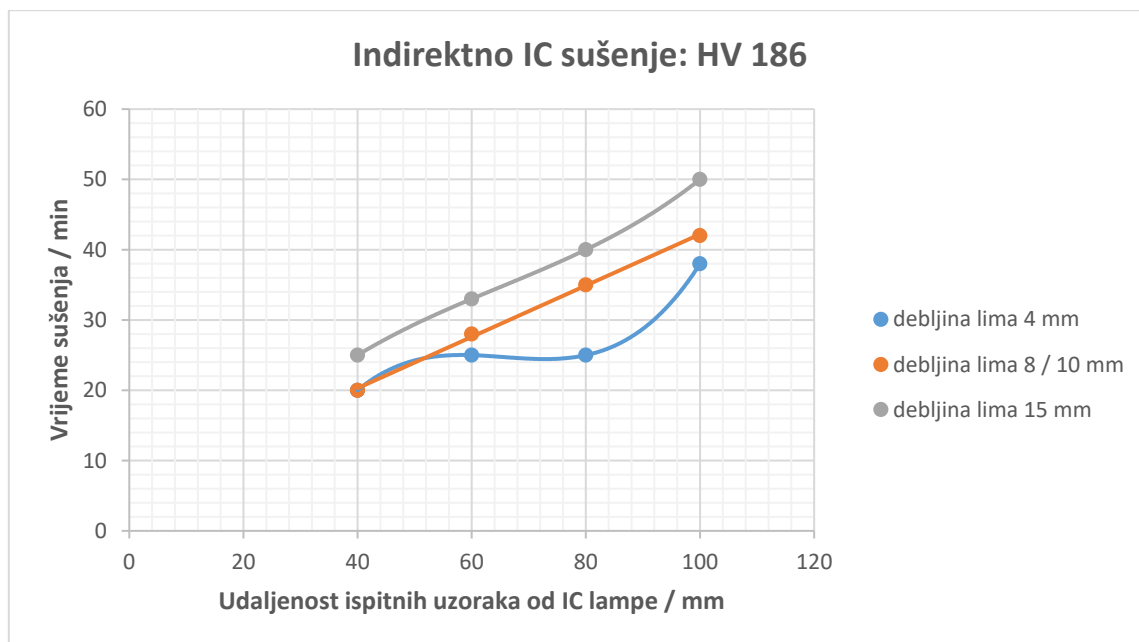
Analizom grafova na slikama 62 i 63 može se zaključiti nekoliko stvari:

- S povećanjem debljine lima raste i potrebno vrijeme sušenja premaza bez obzira je li sušenje direktno ili indirektno.
- Također, s porastom udaljenosti od izvora zračenja, raste vrijeme sušenja. Jedina iznimka tome se vidi na debljini lima od 15 mm gdje je vrijeme sušenja pri 40 cm veće od onog pri 60 cm i jednako kao na 80 cm. Vjerojatni razlog je taj što je DSF uzorka sušenog na 40 cm za 20 – 25 μm veća od ostalih uzoraka.
- Što se tiče načina sušenja, uzorci se brže suše kada su direktno izloženi prema IC zračenju, nego indirektno.

Kada se uzme u obzir da je proizvođač svojim tehničkim listom za zadani premaz propisao vrijeme sušenja na zraku 8 h za debljine od 80 μm , a ovdje su postignuta vremena sušenja 10 – 25 minuta, može se reći da su rezultati i više nego zadovoljavajući.



Slika 63. Utjecaj debljine lima i udaljenosti ispitnih uzoraka od direktnog IC zračenja na vrijeme sušenja, za premaz HV 186

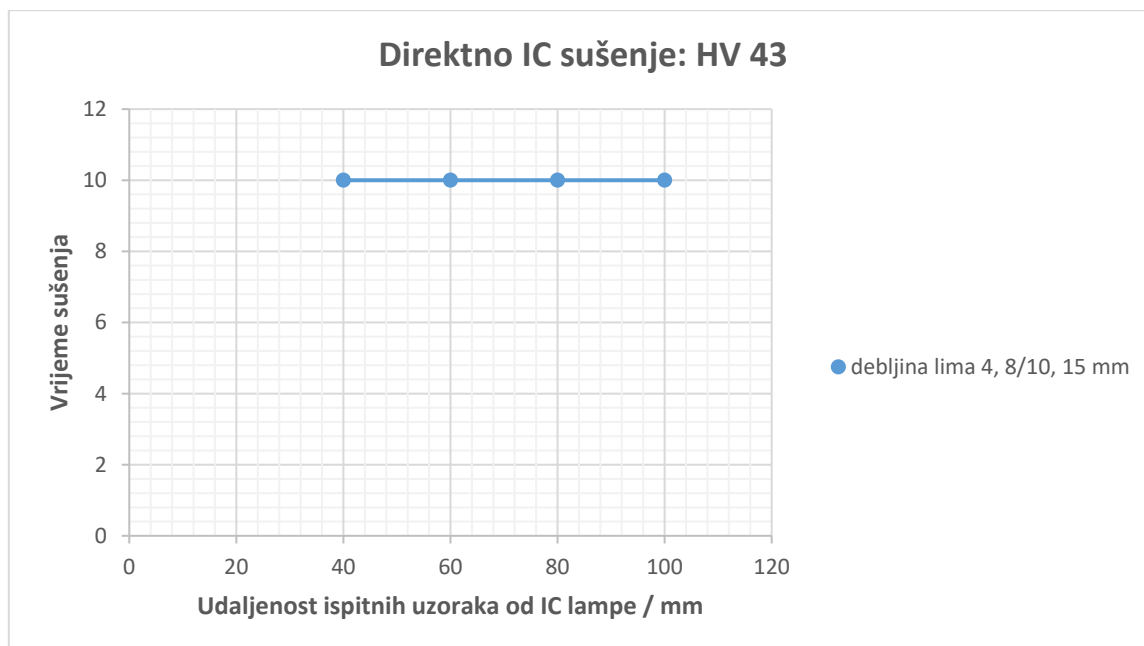


Slika 64. Utjecaj debljine lima i udaljenosti ispitnih uzoraka od indirektnog IC zračenja na vrijeme sušenja, za premaz HV 186

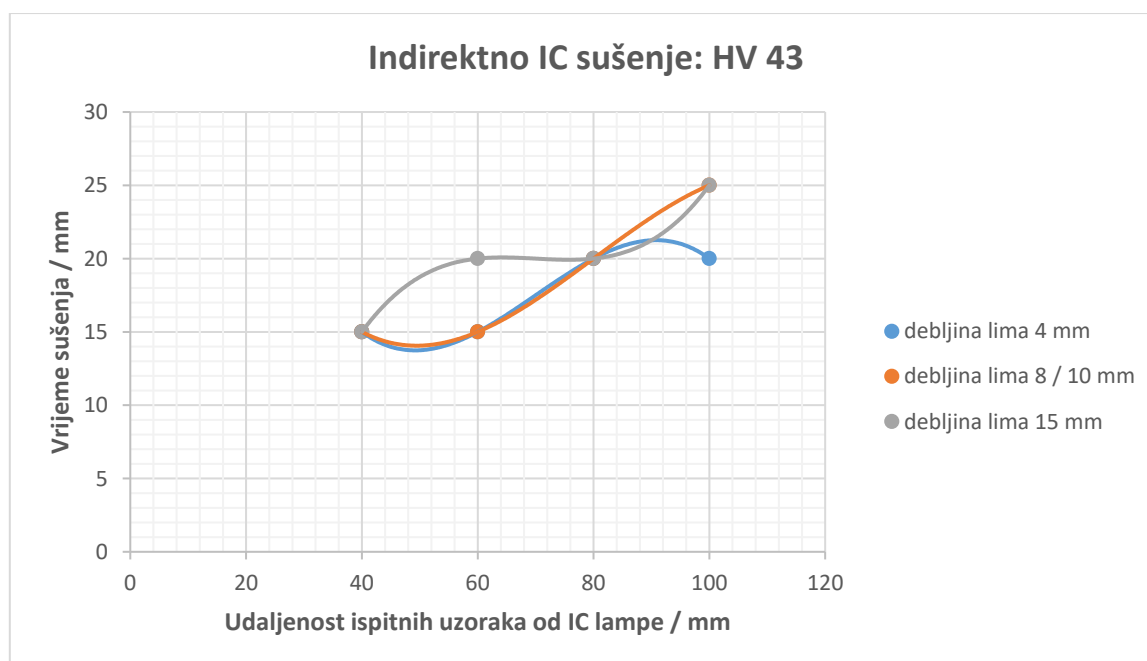
Očekivano, vrijeme sušenja direktno izloženih ispitnih uzoraka manje je od indirektno izloženih, kako se vidi na slikama 64 i 65. S porastom debljine lima i udaljenosti, raste i vrijeme sušenja kod indirektno sušenih premaza. Neočekivani rezultati uočljivi su kod direktno sušenih premaza. Naime, bez obzira na debljinu lima i udaljenost od IC zračenja, vrijeme sušenja je za sve isto i iznosi 12 minuta. Razlog tomu može biti vrijeme potrebno da se vodorazrjeđivi premaz suši na zraku („*flash-off*“) prije IC zračenja kako ne bi došlo do pojave mjehurića, a iznosi 1:45 h.

Budući da proizvođač u svojem tehničkom listu za ovaj premaz navodi da je potrebno 24 satno sušenje na zraku za debljine od 80 μm , a ovdje su premazi osušeni za 1:55 – 2:35 h (uključeno vrijeme predušenja), rezultati su i za ovaj slučaj zadovoljavajući

Isto kao i u prethodna dva grafa, i na slikama 66 i 67 se mogu izvesti slični zaključci. Kod indirektnog sušenja, debljina lima i udaljenost od IC zračenja proporcionalno su povezani s vremenom sušenja. Jedina razlika je što kod debljina limova od 4 i 8 (10) mm vrijeme sušenja jednako pri udaljenostima 40, 60 i 80 cm. Brže suše direktno izložene površine koje, kao i kod prethodno opisanog premaza, imaju jednaka vremena sušenja neovisno o zadanim parametrima. Mogući razlog opet može biti međusušenje na zraku od 1:45 h.



Slika 65. Utjecaj debljine lima i udaljenosti ispitnih uzoraka od direktnog IC zračenja na vrijeme sušenja, za premaz HV 43

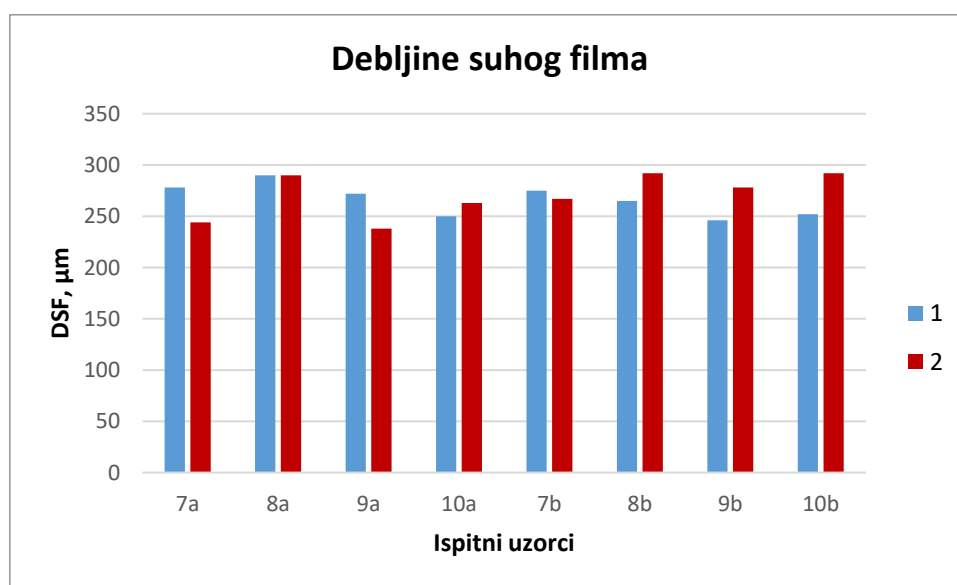


Slika 66. Utjecaj debljine lima i udaljenosti ispitnih uzoraka od indirektnog IC zračenja na vrijeme sušenja, za premaz HV 43

Rezultati i dalje pokazuju zavidna mala vremena sušenja (1:55 – 2:10 h) u odnosu na ona koja propisuje proizvođač kada se premaz suši na zraku (24 h).

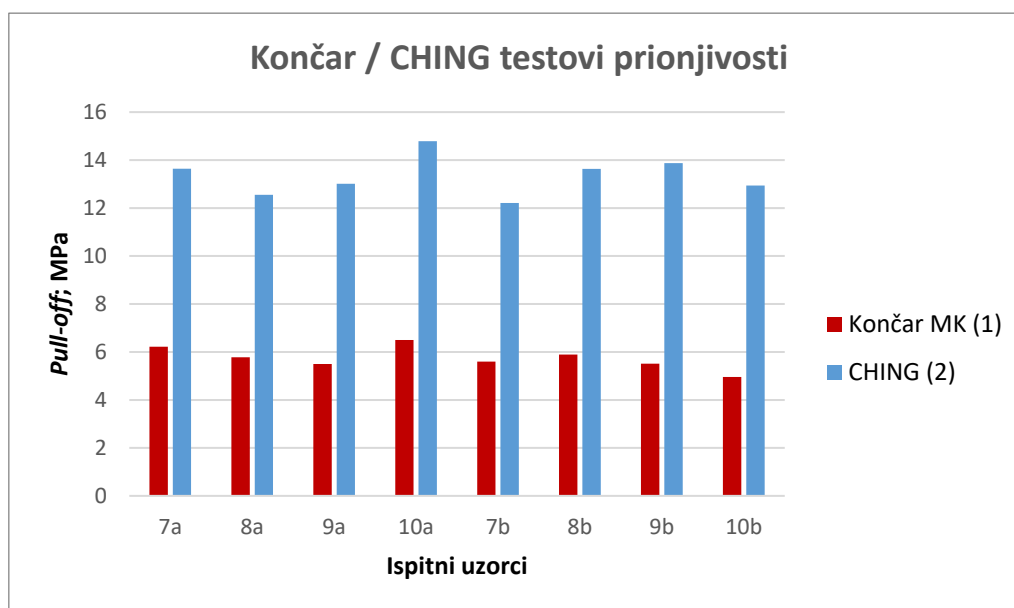
6.1.2. Analiza kombiniranog sušenja sustava premaza

Nakon što su sustavi nanесeni na ispitne uzorke i osušeni kako je prikazano u tablici 5, izmjerene su im debljine suhog filma. Iz podataka prikazanih u tablici, ali i vizualnog pregleda uzoraka, može se zaključiti da su svi premazi nanесeni temeljito i savjesno. Debljine se kreću oko 260, 270 μm s rasipanjem vrijednosti $\pm 20 \mu\text{m}$ što se smatra prihvatljivim u odnosu na zahtjeve norme HRN EN ISO 12944. Slika 67 prikazuje debljine suhog filma ispitnih uzoraka koji će se ispitivati u Končaru i CHING-u.

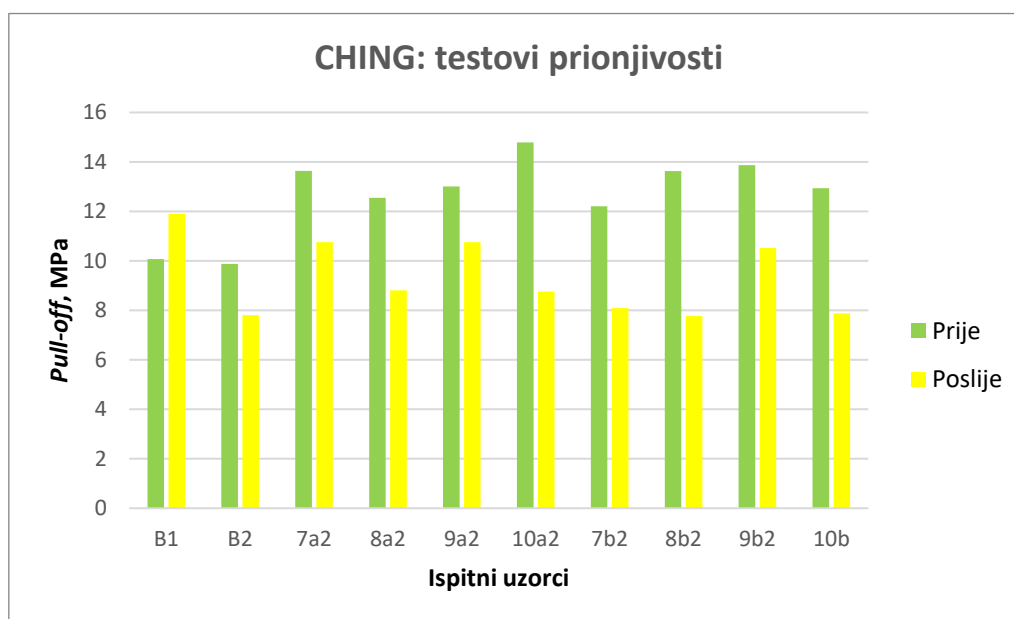


Slika 67. DSF ispitnih uzoraka sušenih kombinacijom IC i sobne temperature za ispitivanja u Končaru i CHING-u

Analizom rezultata ispitivanja prionjivosti nakon IC sušenja (slika 68 i 69) vidi se da su postignute zadovoljavajuće vrijednosti prionjivosti i kod uzoraka ispitivanih u Končaru i kod onih u CHING-u. Najbolji rezultat i kod jednih i kod drugih postignut je prilikom sušenja prvog sloja na sobnoj temperaturi, a preostala tri s direktnim IC zračenjem (10a1/10a2). Rezultati iz CHING-a pokazuju veće vrijednosti kod svakog uzorka, a razlog tomu može biti više vremena koje je premaz imao da dodatno umreži ili precizniji i kvalitetniji mjerni uređaj s automatskim načinom rada.



Slika 68. Rezultati testova prionjivosti kombinirano sušenih ispitnih uzoraka, provedenih u Končaru i CHING-u



Slika 69. Rezultati testova prionjivosti ispitnih uzoraka u CHING-u: prije i poslije ispitivanja u slanoj komori (1440 h)

Test je pokazao da svi sustavi premaza imaju izvrsno prijanjanje na metalnu podlogu bez obzira na vrstu sušenja (IC ili sušenje u zatvorenom prostoru). Svi sustavi premaza pokazuju izvrsno prijanjanje čak i nakon intenzivnog izlaganja u slanoj komori. Nijedna nedopuštena puknuća tijekom izvođenja „Pull-off“ testa se nisu dogodila ni u jednom slučaju unatoč vrlo visokim vrijednostima povlačenja.

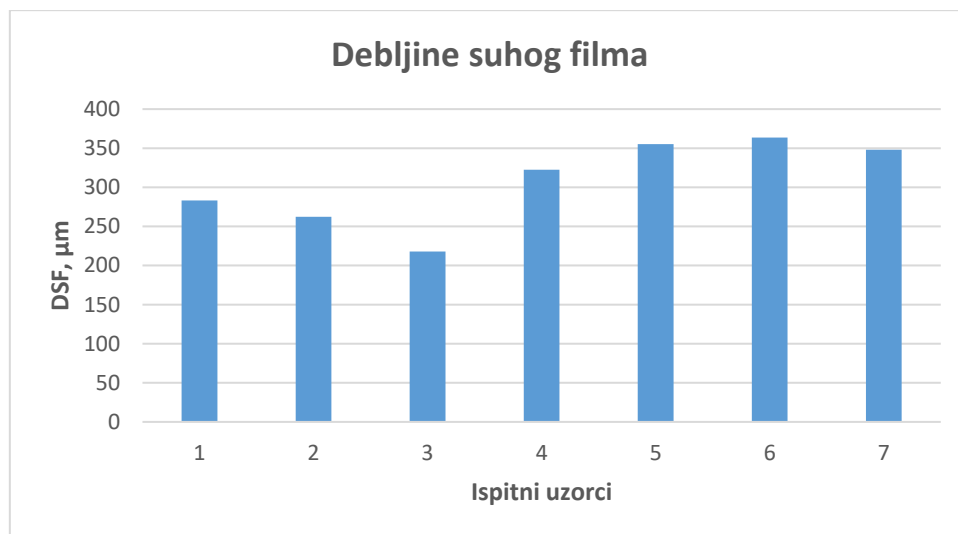
Tijekom ispitivanja u slanoj komori nije otkriven nijedan nedostatak (mjehuranje, hrđanje) na površini premaza i na zarezu prema normi HRN EN ISO 9227 nakon izlaganja opterećenju od 1440 h (C5-H), kao što se može vidjeti u tablici 9.

Rezultati ispitivanja pokazuju da IC sušenje nema negativnih utjecaja na performanse odabranog sustava premaza s obzirom na svojstva lijepljenja na pjeskarenom čeliku, kao i na zaštitne performanse (trajnost) od agresivne, slane atmosfere.

Vrijeme sušenja sustava premaza koji se suši kombiniranim putem daleko je manje nego kod sušenja sustava samo u zatvorenom sustavu. Kada se uzme u obzir i „flash-off“ vrijeme kod vodorazrjedivih premaza, moguće je aplicirati čitavi sustav od 4 sloja u jednome danu. Isti takav sustav sušen samo u zatvorenome prostoru pri sobnoj temperaturi trebalo bi čekati i do 4 dana da bude nanesen. Vremena IC sušenja za svaki sloj dane su u tablici 5 i ne prelaze više od 2:10 h po sloju, s uračunatim vremenom predušenja.

6.2. Analiza ispitivanja u Laboratoriju za zaštitu materijala

Sustav premaza nanesen je na 7 ispitnih uzoraka i sušen 21 dan na sobnoj temperaturi kako bi došlo do potpunog umrežavanja. Zatim su izmjerene debljine suhog filma, kako je prikazano u tablici 10 i grafom na slici 70. Iz podataka prikazanih u tablici, ali i vizualnog pregleda uzoraka, može se zaključiti da su svi premazi naneseni temeljito i savjesno. Debljine se kreću oko 300 μm s rasipanjem vrijednosti $\pm 50 \mu\text{m}$ što se smatra prihvatljivim u odnosu na zahtjeve norme HRN EN ISO 12944. Uzorka koji jedini iskače je uzorak 3 sa 217 μm koji nije ispitivan u komorama, nego je poslužio kao etalon.



Slika 70. Debljine suhog filma ispitnih uzoraka ispitivanih u Laboratoriju za zaštitu materijala

6.2.1. Ispitivanje u vlažnoj komori

Ispitivanje je provedeno u Laboratoriju za zaštitu materijala, sukladno normi HRN EN ISO 6270-2:2007. Uzorci su nakon 30 dana izvađeni iz komore te je analizirano njihovo stanje.

Na uzorku 5 iz vlažne komore došlo je do mjehuranja na površini premaza te je prema normi HRN EN ISO 4628-2:2016 dana ocjena stupnja mjehuranja 2(S3).

Isto tako, na uzorku 2 iz vlažne komore pojavila se hrđa na površini premaza. Nastala je lokalno, na jednom mjestu i prema normi HRN EN ISO 4628-3:2016 ocjena stupnja hrđanja na površini premaza je Ri 1: 0,05 %.

6.2.2. Ispitivanje u slanoj komori

Uzorci su nakon 60 dana izvađeni iz komore te je analizirano njihovo stanje površine, kao i područje oko zareza.

Na površini premaza nije uočeno mjehuranje niti hrđanje, stoga je ocjena stupnja mjehuranja 0(S0), a ocjena stupnja hrđanja Ri 0. Stupanj korozije oko ureza ocjenjivao se sukladno normi HRN EN ISO 12944-6, a računa se prema jednadžbi iz poglavlja 5.8.2.

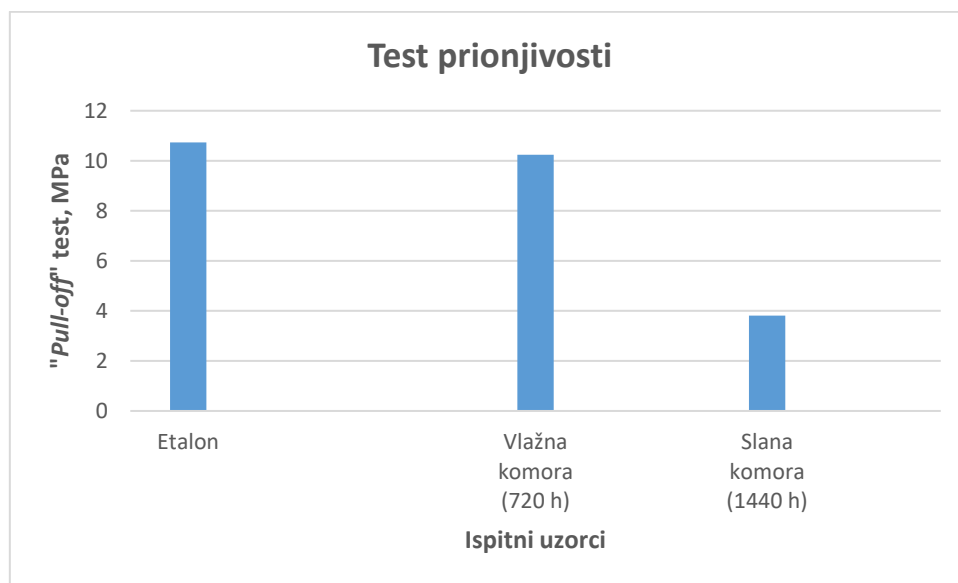
Prema normi, ocjena stupnja korozije ne smije biti veća od 1,5 mm, što u ovom slučaju nije ($M = 0,365$ mm) te je ispitivanje zadovoljeno.

6.2.3. Ispitivanje prionjivosti urezivanjem mrežice („Cross-cut“ test)

Ispitivanju su bili podvrgnuti uzorci iz slane i vlažne komore te etalon. Kod etalona i uzorka iz vlažne komore rubovi su potpuno glatki, niti jedan kvadratić mrežice nije oštećen ni oljušten te im je ocjena prionjivosti 0. Kod uzorka iz slane komore vrlo malo premaza je oštećeno i oljušteno na području sjecišta te mu je ocjena prionjivosti 1.

6.2.4. Ispitivanje prionjivosti vlačnom metodom („Pull-off“ test)

Nakon završetka ispitivanja u komorama napravljeni su testovi prionjivosti koji su prikazani grafom na slici 71. Na etalonu su rađena tri mjerenja, a na uzorcima iz komora dva te su potom izvučene srednje vrijednosti koje su prikazane na grafu.



Slika 71. „Pull-off“ test na ispitnim uzorcima sušenim na sobnoj temperaturi i ispitivanim u Laboratoriju za zaštitu materijala

Analizom grafa može se uočiti kako uzorak koji nije bio u komorama i uzorak iz vlažne komore pokazuju dobre i vrlo slične rezultate prionjivosti onima iz Končara i CHING-a.

S druge strane, uzorak ispitivan u slanoj komori nije zadovoljio test prionjivosti i znatno je lošiji od rezultata slane komore iz CHING-a (slika 69). Mogući razlog može biti razlika u načinu sušenja gdje sušenje na sobnoj temperaturi 21 dan pokazuje lošije rezultate od sušenja IC zračenjem. Međutim, za donošenje konkretnijih zaključaka moralo bi se provesti još testiranja sličnih sustava kao i uzimanje većeg uzorka, budući da je u Laboratoriju testiran jedan uzorak iz slane komore, a u CHING-u njih 8.

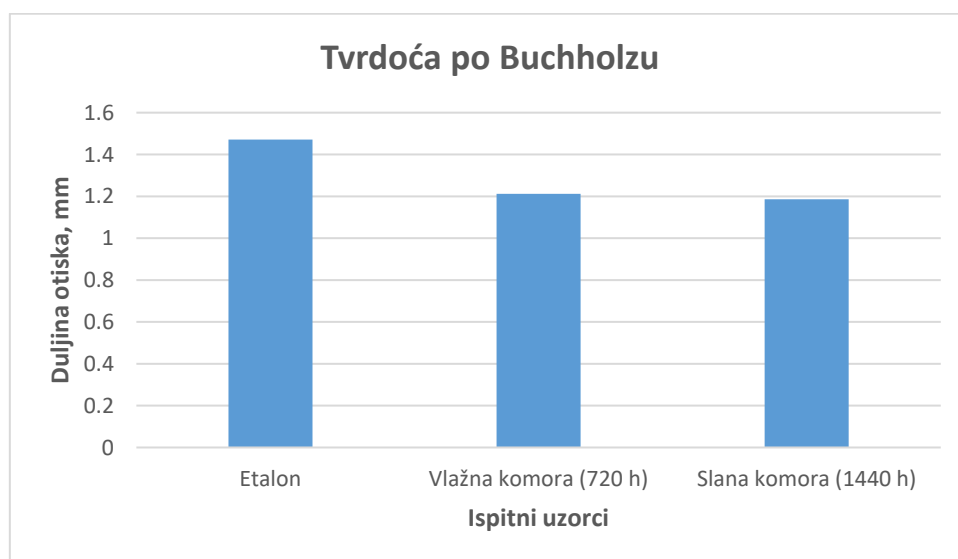
6.2.5. Ispitivanje tvrdoće olovkama

Ispitivanje tvrdoće premaza olovkama radilo se sukladno normi HRN EN ISO 15184. Cilj ispitivanja bio je pomoću olovka različitih tvrdoća odrediti tvrdoću premaza

Provedeni su testovi tvrdoće na etalonu te uzorcima iz slane i vlažne komore. Svi ispitni uzorci imaju HB tvrdoću, iz čega se može zaključiti da im tvrdoća tokom ispitivanja u komorama nije pala.

6.2.6. Ispitivanje tvrdoće prema Buchholzu

Ispitivanje se provelo mjerenjem duljine otiska nakon djelovanja utisnog tijela na premaz, sukladno normi HRN EN ISO 2815. Rezultati su prikazani grafom na slici 72.



Slika 72. Izmjerene vrijednosti tvrdoće po Buchholzu na ispitnim uzorcima iz Laboratorija za zaštitu materijala

Iz grafa se može vidjeti da etalon ima nešto veće vrijednosti (duljinu otiska) tvrdoće od uzoraka iz slane i vlažne komore. Tvrdoća i duljina otiska su obrnuto proporcionalni i prema tome etalon ima manju tvrdoću od uzoraka ispitivanih u komori. Mogući razlog je da su uzorci prilikom ispitivanja u komorama razvili veću elastičnu karakteristiku ili da je tokom oštećenja premaza došlo do stvaranja cinkovih oksida iz temeljnog premaza (cink-epoksi premaz) koji su popunili nastala oštećenja i na taj način očvrstnuli premaz. Ovdje se govori o razlici od 0,2 mm pa se može reći da im se tvrdoća gotovo nije promijenila, isto kao i kod ispitivanja tvrdoće s olovkama.

6.3. EIS analiza

U nastavku su analizirani potencijali otvorenog strujnog kruga kod etalona izloženog 60 dana u 5%-tnoj NaCl otopini, kao i izmjerene vrijednosti otpora pri 0,1 Hz kroz 60 dana. Također, prikazani su Nyquistovi i Bodeovi dijagrami za svaki od tri uzorka: etalon, uzorak iz vlažne i uzorak iz slane komore.

Prema dostupnoj literaturi, otpor premaza određuje njegovu kvalitetu prema sljedećoj skali [26]:

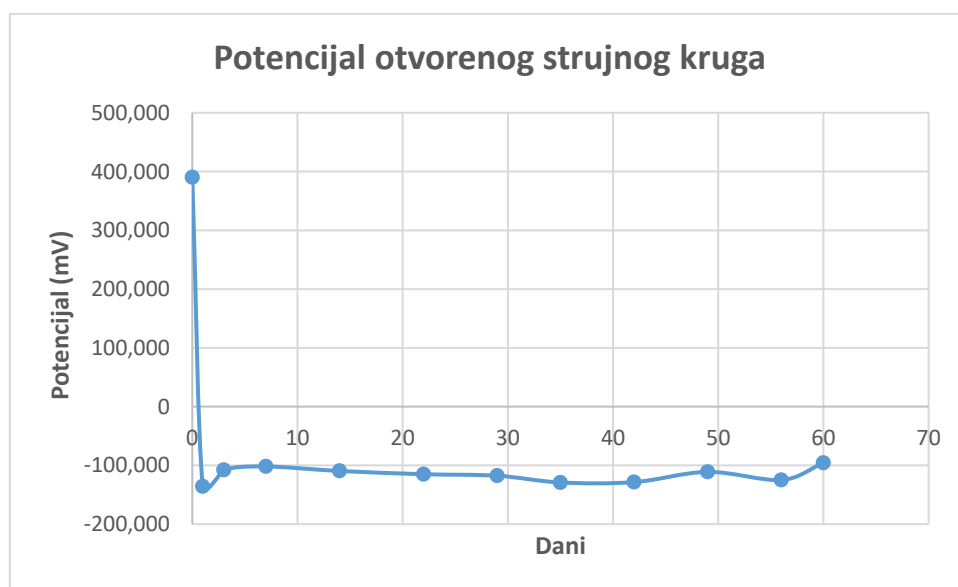
- $> 10^8 \Omega\text{cm}^2$: kvalitetan premaz
- $10^7 - 10^8 \Omega\text{cm}^2$: dobar premaz (prema standardu)
- $10^6 - 10^7 \Omega\text{cm}^2$: potencijalno loš premaz
- $< 10^6 \Omega\text{cm}^2$: loš premaz

6.3.1. Etalon

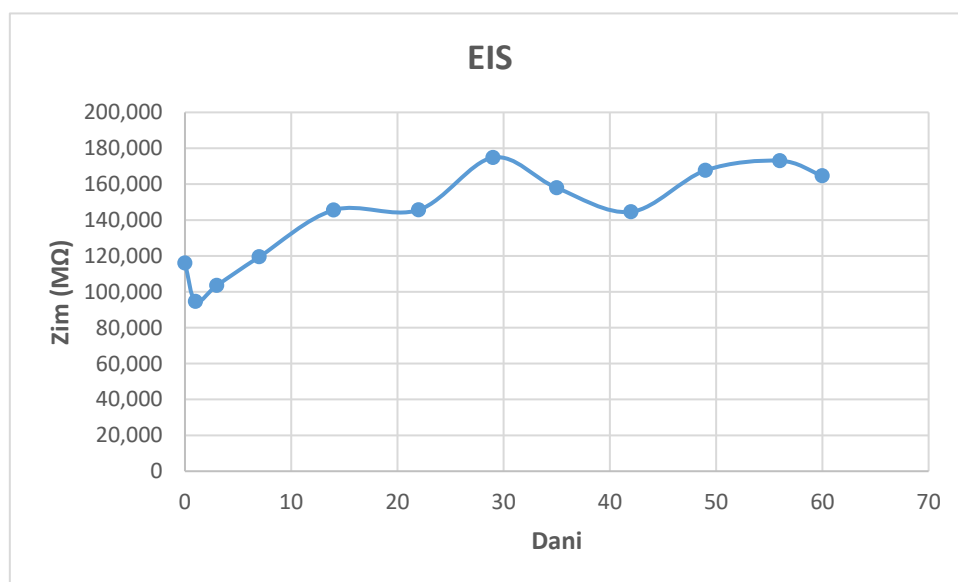
Rezultati ispitivanja potencijala otvorenog strujnog za etalon (slika 73) pokazuju da se vrijednosti potencijala odmah po početku ispitivanja spuštaju u negativno područje i ostaju u njemu. Negativne vrijednosti potencijala upućuju na koroziju. Nakon 7 dana postiže se stacionarno stanje potencijala ispitnog uzorka.

Kada se gledaju izmjerene vrijednosti otpora sustava premaza pri 0,1 Hz i amplitudi od 10 mV (slika 74), može se uočiti da on raste do 29. dana, a zatim pada prema 60. danu. Nakon 60 dana izmjereni otpor iznosio je $1,64 \times 10^8 \Omega\text{cm}^2$ čime ga se može svrstati u skupinu kvalitetnih premaza.

Utvrđene oscilacije otpora su vjerojatno posljedica oblikovanja cinkovih pigmenata u temeljnom premazu nakon prodora elektrolita.



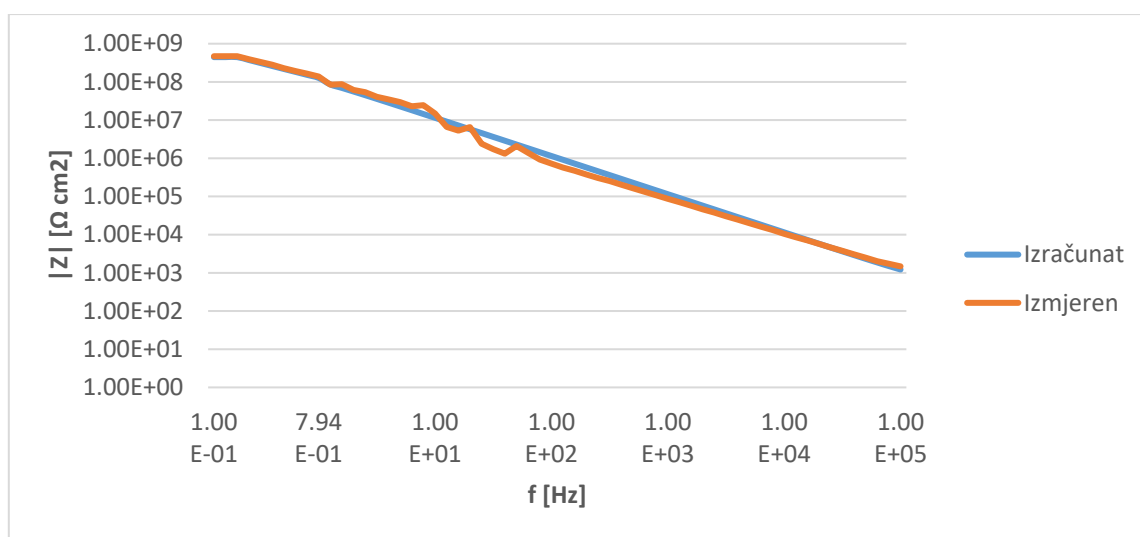
Slika 73. Potencijal otvorenog strujnog kruga ispitivan kroz 60 dana – etalon



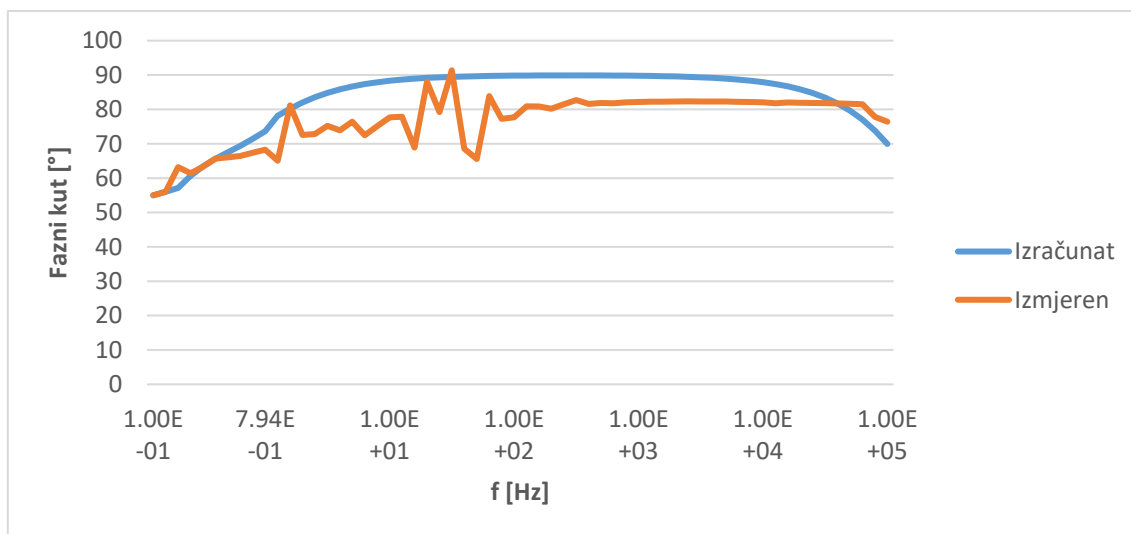
Slika 74. Izmjerene vrijednosti otpora premaza pri 0,1 Hz praćenih kroz 60 dana – etalon

Otpor premaza mjerio se 60. dan i pri rasponu frekvencija od 100 mHz do 100 kHz i amplitudi od 100 mV radi usporedbe s uzorcima iz slane i vlažne komore.

Na slici 75 prikazan je Bodeov dijagram impedancije u funkciji frekvencije iz kojeg se može zaključiti da se radi o kvalitetnom sustavu premaza s izmjerenom vrijednosti otpora premaza od $9,723 \times 10^8 \Omega \text{cm}^2$. Na slici 76 prikazan je Bodeov dijagram faznog kuta u funkciji frekvencije.



Slika 75. Bodeov prikaz impedancije u funkciji frekvencije – etalon nakon 60 dana u 5%-tnoj otopini NaCl

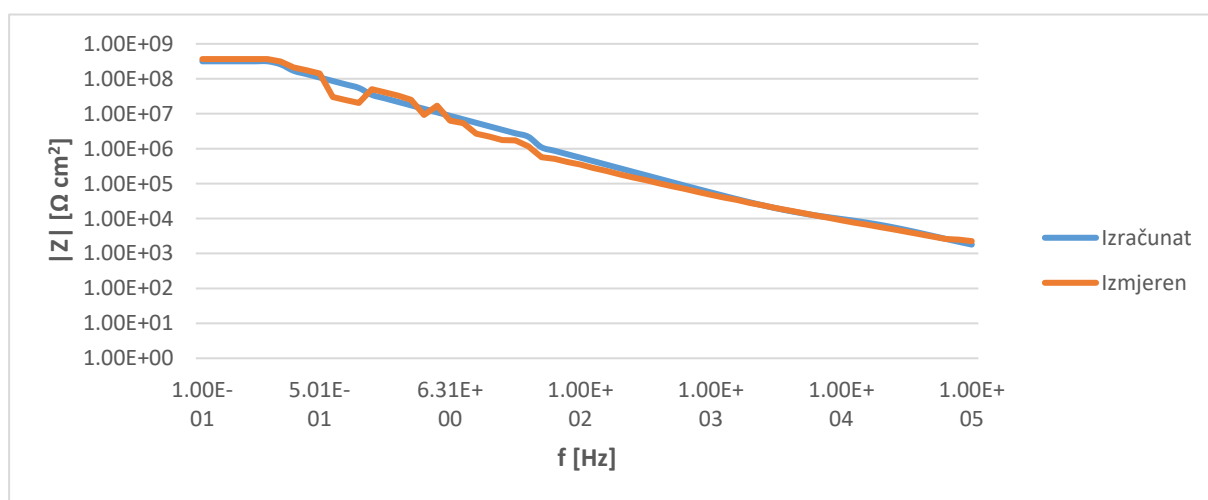


Slika 76. Bodeov prikaz faznog kuta u funkciji frekvencije – etalon nakon 60 dana u 5%-tnoj otopini NaCl

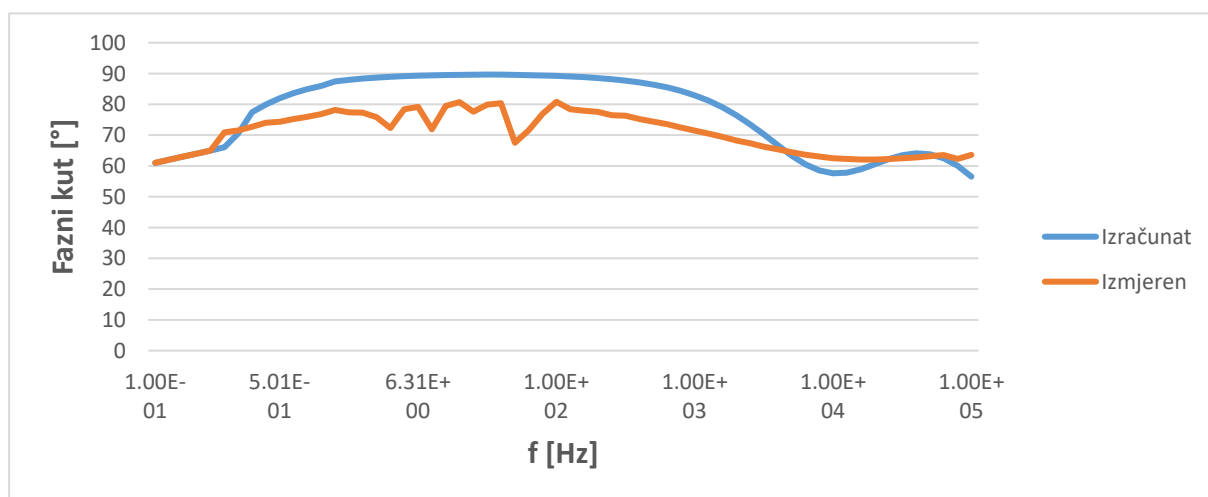
6.3.2. Vlažna komora

Otpor premaza mjerio se nakon 720 h ispitivanja uzorka u vlažnoj komori. Raspon frekvencija bio je od 100 mHz do 100 kHz, s amplitudom od 100 mV.

Na slici 77 prikazan je Bodeov dijagram impedancije u funkciji frekvencije iz kojeg se može zaključiti da se radi o kvalitetnom sustavu premaza s izmjerenom vrijednosti otpora premaza od $7,798 \times 10^8 \Omega \text{cm}^2$. Na slici 78 prikazan je Bodeov dijagram faznog kuta u funkciji frekvencije.



Slika 77. Bodeov prikaz impedancije u funkciji frekvencije – ispitni uzorak nakon 720 h ispitivanja u vlažnoj komori

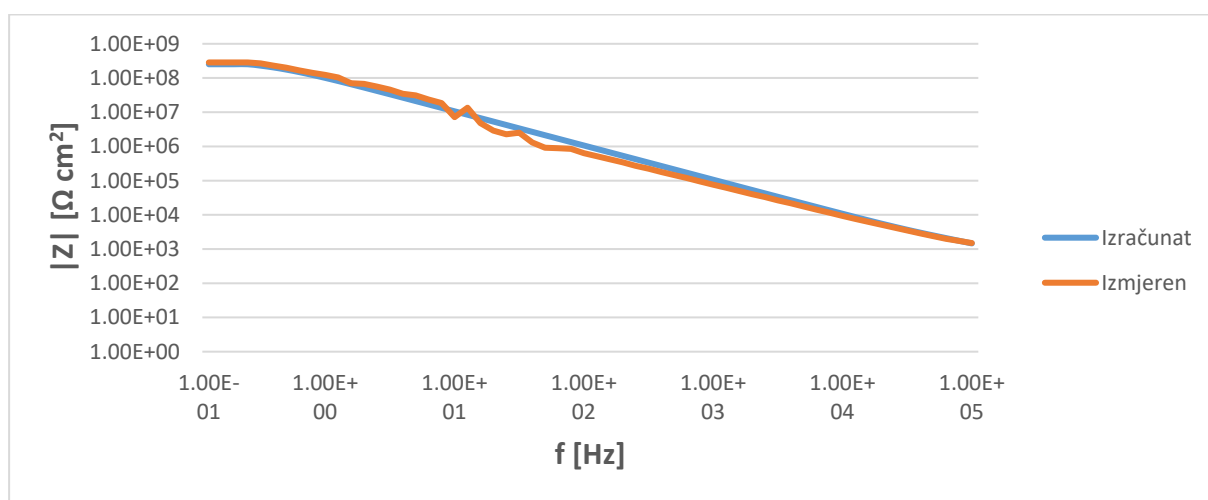


Slika 78. Bodeov prikaz faznog kuta u funkciji frekvencije – ispitni uzorak nakon 720 h ispitivanja u vlažnoj komori

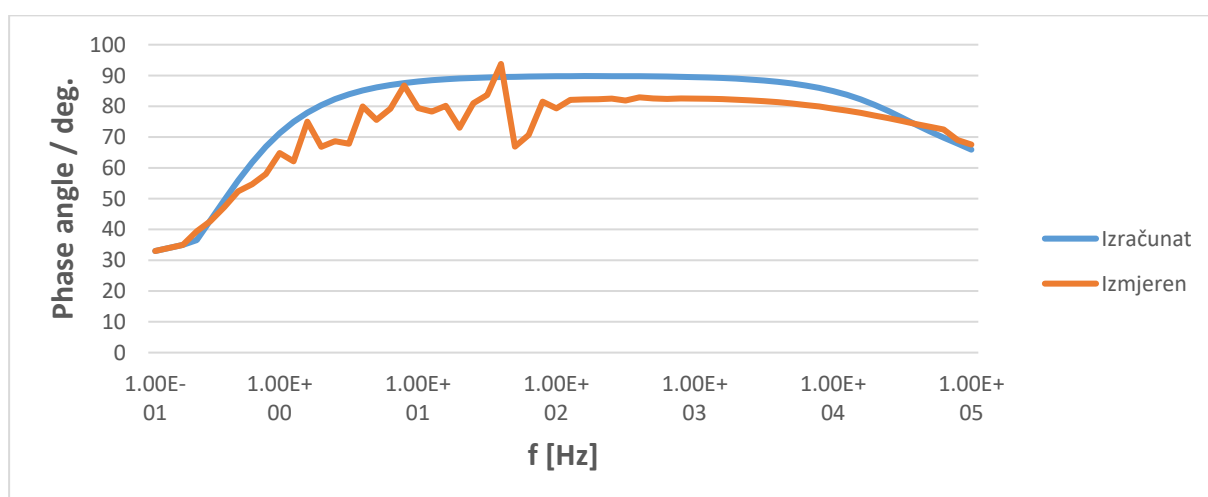
6.3.3. Slana komora

Otpor premaza mjerio se nakon 1440 h ispitivanja uzorka u slanoj komori. Raspon frekvencija bio je od 100 mHz do 100 kHz, a amplituda 100 mV.

Na slici 79 prikazan je Bodeov dijagram impedancije u funkciji frekvencije iz kojeg se može zaključiti da se radi o kvalitetnom sustavu premaza s izmjerenom vrijednosti otpora premaza od $3,139 \times 10^8 \Omega \text{cm}^2$. Na slici 80 prikazan je Bodeov dijagram faznog kuta u funkciji frekvencije.



Slika 79. Bodeov prikaz impedancije u funkciji frekvencije – ispitni uzorak nakon 1440 h ispitivanja u slanoj komori

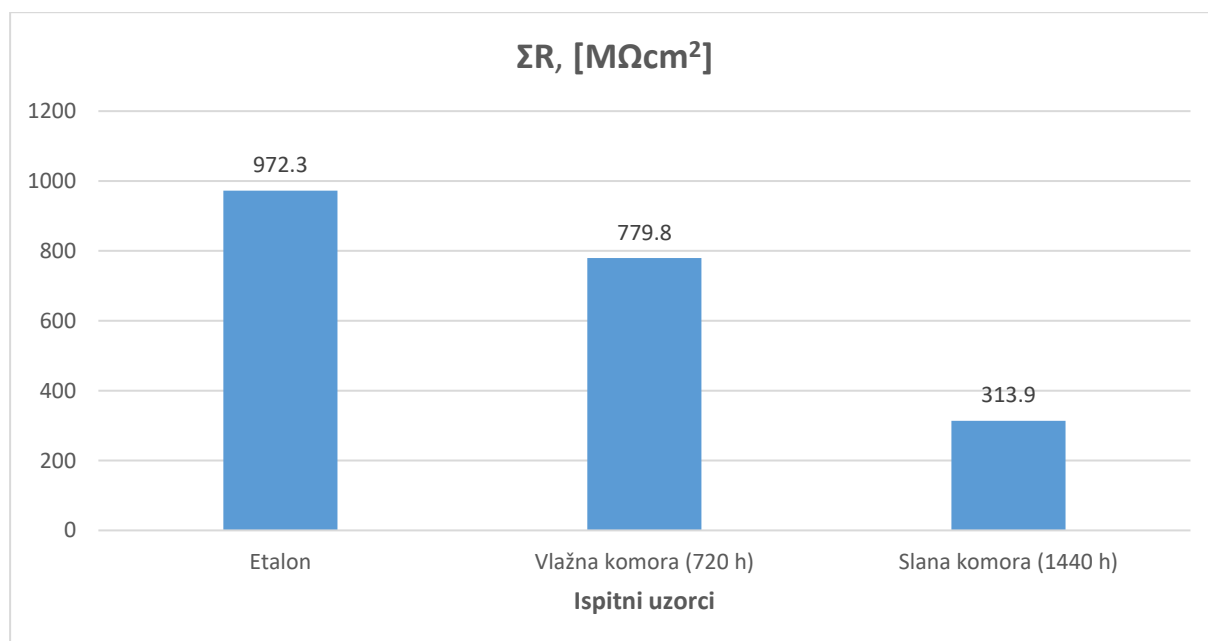


Slika 80. Bodeov prikaz faznog kuta u funkciji frekvencije – ispitni uzorak nakon 1440 h ispitivanja u slanoj komori

6.3.4. Suma otpora

Uspoređujući sume otpora, vidljivo je da se radi o kvalitetnim sustavima premaza. Očekivano, najveću sumu otpora ima etalon, budući da on nije bio podvrgnut ispitivanjima u agresivnim medijima te se na taj način nije mogao oštetiti premaz. Idući je uzorak ispitan u vlažnoj komori, a njega slijedi onaj iz slane komore. I ovakav ishod je očekivan budući da je ispitivanje u slanoj komori trajalo 30 dana duže od ispitivanja u vlažnoj komori te je premaz u tom periodu postao još više propustan.

Promatrana promjena kapaciteta s obzirom na vrijeme izlaganja elektrolitu pokazuje da nema velike promjene u redu veličina kod niti jednog kapaciteta (kapacitet dvosloja i kapacitet premaza) te kod niti jednog premaza. To nam govori da nije došlo do značajnijeg prodiranja elektrolita u sustav premaza. Konačno, sam izgled uzoraka nakon ispitivanja elektrokemijske impedancijske spektroskopije pokazuje kako do značajnog prodiranja elektrolita nije došlo.



Slika 81. Suma otpora ispitnih uzoraka

7. ZAKLJUČAK

Vodorazrjedivi premazi pronalaze sve veću primjenu u različitim granama industrije, kao što su prehrambena ili automobilska, jer pomažu u smanjenju hlapivih organskih spojeva koji se ispuštaju u okoliš. Sušenje vodorazrjedivog premaza može potrajati i 24 h, osim ako se ne odaberu rješenja koja će ubrzati proces i pritom izbjeći stvaranje mjehuranja.

Jedan od načina kako se takvo sušenje može ubrzati, a da se pritom sačuvaju svojstva premaza, je i IC sušenje. Ono ubrzava proizvodnju, poboljšava kvalitetu, a istovremeno štedi energiju i troškove. Infracrveno (IC) sušenje vodorazrjedivih premaza još uvijek je nedovoljno istraženo pa su i sami teoretski i eksperimentalni izvori podataka rijetki.

Cilj eksperimentalnog dijela rada bilo je utvrditi kako na brzinu IC sušenja utječu parametri poput udaljenosti uzoraka od IC izvora zračenja, debljina uzoraka i način sušenja ispitne površine (direktno ili indirektno). Na ispitne uzorke je nanesen i sustav premaza te se promatrala njihova otpornost prema koroziji ispitivanjima u slanoj i vlažnoj komori. Ispitana su fizikalna i kemijska svojstva te su promatrana vremena sušenja kod IC sušenih premaza kao i usporedba sa sustavima sušenim na sobnoj temperaturi.

Nakon svih provedenih ispitivanja, analize i rasprave mogu se izvući sljedeći zaključci:

- Kada se govori o otapalnom premazu vrijeme sušenja proporcionalno je s debljinom lima i udaljenosti od IC zračenja, a s obzirom na način zračenja kraće je prilikom direktne, nego indirektno izloženosti zračenju. Ako je proizvođač svojim tehničkim listom za zadani premaz propisao vrijeme sušenja na zraku 8 h za debljine od 80 μm , a ovdje su postignuta vremena sušenja 10 – 25 min, može se reći da su rezultati i više nego zadovoljavajući.
- S druge strane, vodorazrjedivi premazi pokazuju zanimljivu karakteristiku. Bez obzira na debljinu lima i udaljenost od IC zračenja, vrijeme sušenja je za sve isto. Razlog tomu može biti vrijeme predušenja („*flash-off*“) prije IC zračenja kako ne bi došlo do pojave mjehurića, a iznosi 1:45 h. Budući da proizvođač u svojem tehničkom listu za ovaj premaz navodi da je potrebno 24 satno sušenje na zraku za debljine od 80 μm , a ovdje su premazi osušeni za 1:55 – 2:35 h (uračunato i predušenje), rezultati su i za ovaj slučaj zadovoljavajući.

Predsušenje je moguće smanjiti kombinacijom s konvekcijskim pećima o čemu je bilo govora u teoretskom dijelu rada, držanjem temperature površine premaza na određenim vrijednostima ili sušenjem premaza s određenim valnim duljinama kako bi se postigli optimalni učinci.

- Vrijeme sušenja sustava premaza koji se suši kombiniranim putem daleko je manje nego kod sušenja sustava samo u zatvorenom sustavu. Kada se uzme u obzir i vrijeme predsušenja („*flash-off*“ vrijeme) kod vodorazrjedivih premaza, moguće je aplicirati čitavi sustav od 4 sloja u jednome danu. Isti takav sustav sušen samo u zatvorenome prostoru na sobnoj temperaturi trebalo bi čekati i do 4 dana. Rezultati prije i nakon ispitivanja u slanoj komori pokazuju da IC sušenje nema negativnih utjecaja na performanse odabranog sustava premaza s obzirom na svojstva prijanjanja na pjeskarenom čeliku, kao i na zaštitne performanse (trajnost) od agresivne, slane atmosfere. Tijekom ispitivanja u slanoj komori nije otkriven nijedan nedostatak (mjehuranje, hrđanje) na površini premaza, kao i na zarezu.
- Uzorci sušeni na sobnoj temperaturi pokazali su vrlo dobre rezultate uz nekoliko iznimaka. Prilikom ispitivanja uzoraka u vlažnoj komori došlo je do lokalne pojave mjehuranja i hrđe na uzorcima. Na uzorcima ispitivanim u slanoj komori nije zamijećeno mjehuranje i hrđanje, a korozija oko ureza zadržala se u prihvatljivim vrijednostima. Tvrdće ispitnih uzoraka nisu imale velika odstupanja prije i nakon ispitivanja u komorama. Testovi prionjivosti premaza na podlozi pokazali su zadovoljavajuće rezultate, osim kod uzorka iz slane komore koji nije zadovoljio minimalnu vrijednost „*Pull-off*“ testa od 5 MPa. Moglo bi se reći da su IC sušeni premazi kvalitetniji po tom pitanju od onih sušenih na zraku, no za donošenje konkretnijeg zaključka trebalo bi napraviti ispitivanja na većoj količini ispitnih uzoraka i promatrati njihovo ponašanje. EIS ispitivanja pokazala su da se radi o kvalitetnim premazima.

Uz sve navedeno, jedan je siguran zaključak. Vremena sušenja vodorazrjedivih premaza s infracrvenim zračenjem višestruko su manja, nego kod sušenja na zraku. Na taj način IC sušenje ubrzava proizvodnju, poboljšava kvalitetu, a istovremeno štedi energiju i troškove.

Naravno, mora se voditi računa o mjehuranju na površini premaza te kako ga izbjeći. IC emiter se mora pažljivo prilagoditi svojstvima proizvoda koji se zagrijava, i to u pogledu valne duljine, oblika i izlazne snage. Za vodorazrjedive premaze najbolji su ugljični i srednjevalni IC emiteri. Može se uvesti i predušenje kao kombinacija s IC zračenjem za izbjegavanje mjehuranja, ali i zbog sušenja teško dostupnih mjesta do kojih zračenje ne može doći.

Još jedan aspekt IC sušenja koji se mora dodatno istražiti, a kojim bi se ostvarilo brže i bolje sušenje, su temperature na površini premaza. Svaki uzorak bi trebalo sušiti na određenoj temperaturi te pratiti kako se mijenjaju vremena sušenja i koje je optimalno vrijeme pri kojemu neće doći do mjehuranja. Isto ponavljati i na različitim udaljenostima te promatrati kritične točke (ako se premaz presuši). Samim time, proces sušenja bi se mogao podijeliti u dvije faze:

1. faza u kojoj se premaz suši na nižim temperaturama, pri kojima neće prebrzo otvrdnuti i gdje će dozvoliti otapalu da izađe iz premaza,
2. faza u kojoj se premaz suši na većim temperaturama kako bi se postiglo konačno umrežavanje.

Sve navedeno ostavlja prostora za daljnja istraživanja na ovu temu i bolje shvaćanje samog infracrvenog zračenja kod sušenja premaza. Sigurno je da će s razvojem novih tehnologija na područjima IC uređaja i vodorazrjedivih premaza, kao i razvoja novih materijala, doći i do bržeg komercijalnog razvoja ovog načina sušenja. Svima bi u interesu trebala biti ekološki prihvatljivija, energetska učinkovitija i produktivnija tehnologija.

8. LITERATURA

- [1] I. Juraga, V. Šimunović, I. Stojanović, V. Alar: „Mehanizmi zaštite od korozije“, autorizirana predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
- [2] I. Esih: „Osnove površinske zaštite“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2007.
- [3] V. Alar, V. Šimunović, I. Juraga: „Teorijske osnove korozijskih procesa i metode zaštite“, autorizirana predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [4] I. Stojanović: „Utjecaj tehnoloških parametara na zaštitna svojstva vodorazrjedivih premaza“, doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [5] N. Rački – Weihnacht: „Boje i lakovi – jučer danas sutra“, Chromos boje i lakovi, Zagreb, 2004.
- [6] I. Juraga, V. Alar, I. Stojanović: „Korozija i zaštita premazima“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [7] <https://www.materialsperformance.com/articles/coating-linings/2016/02/zinc-rich-epoxy-primer-uses-glass-spheres-zinc-activator-to-enhance-corrosion-resistance>, pristupljeno 04.09.2020.
- [8] Z. W. Wicks, D. A. Wicks, J. W. Rosthauser: „Two package waterborne urethane systems“, Progres in Organic Coatings, 44, 161-183, 2002.
- [9] A. Milić: „Vodorazrjedivi premazi s inhibitorom korozije“, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [10] B. McElroy: „Waterborne coatings rise to the occasion: New technologies meet today's market needs“, Chemical Coatings Div, The Sherwin-Williams Co., 2002.
- [11] https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetsko_zra%C4%8Denje, pristupljeno 05.09.2020
- [12] I. Bartley: „Coating curing – the role of infrared“, Pigment & Resin Technology, Vol. 28, 233 – 237, 1999.
- [13] F. M. Poulsen: „Flameless Catalytic infrared drying and curing of coated surfaces“, Netek IR Systems A/S, 2015.

-
- [14] <https://www.pfonline.com/articles/understanding-infrared-curing>, pristupljeno 13.09.2020.
- [15] Division of The McGraw Hill Companies, Inc.: „Curing and Drying Operations: The Pros and Cons of Infrared Heating“, 2005.
- [16] <https://www.paintsquare.com/blog/?fuseaction=view&blogID=323>, pristupljeno 13.09.2020.
- [17] <https://www.pcimag.com/articles/95313-instant-curing-with-near-infrared-technology>, pristupljeno 13.09.2020.
- [18] Hempel d.o.o.: „Forced curing with infrared beams“, 09.02.2020.
- [19] <https://www.carlisleleft.com/en/products/product/bgk-electric-infrared>, pristupljeno 13.09.2020.
- [20] R. Knischka, U. Lehmann, U. Stadler, M. Mamak, J. Benkhoff: „Novel approaches in NIR curing technology“, 2008.
- [21] J. W. Choi, W. P. Chun, S. Hyun Oh, K. Jung Lee, S. Il Kim: „Experimental studies on a combined near infrared (NIR) curing system with a convective oven“, Elsevier Science, 2015.
- [22] https://www.heraeus.com/media/media/hng/doc_hng/industries_and_applications_1/infrared_heat_1/case_stories/en/crown_packaging_e.pdf, pristupljeno 11.09.2020.
- [23] https://www.heraeus.com/media/media/hng/doc_hng/industries_and_applications_1/infrared_heat_1/case_stories/en/Infrared_emitters_optimise_drying_of_protective_varnishes.pdf, pristupljeno 11.09.2020.
- [24] https://www.heraeus.com/en/hng/industries_and_applications/infrared_heat/infrared_emitters_for_the_automotive_industry.html#tabs-45777-6
- [25] A. J. Hinton: „Determination of coatings adhesion using electrochemical impedance spectroscopy“, Solartron, Materials Test, Farnborough, Hampshire, UK, 2001.
- [26] J. Snoke: „Qualification of Protective Coatings using EIS“, Snoke Consultancy, IJmuiden, Nizozemska, 2008.

PRILOZI

1. Prilog 1, tehnička specifikacija premaza EMD 156 HS
2. Prilog 2, tehnička specifikacija premaza HV 186
3. Prilog 3, tehnička specifikacija premaza HV 43
4. CD-R disk

1. Allgemeine Stoffangaben General data		Bindemittel Binder	Register Register
		EP	
Bezeichnung name of product	CHING-EP-zinc rich primer thickness 60 - 100 µm EMD 156-HS		
Härter hardener	CHING-EP hardener M 026		
Mischungsverhältnis mixing ratio	100 : 11 parts by weight C I : C II 100 : 32 parts by volume C I : C II		
Art product description	2 pack primer with zinc dust on the basis of epoxy resin for steel constructions in heavy corrosion protection		
Einsatzgebiet typical uses	substitute for spray galvanisation according to VDEW guideline in transformer construction, airport construction, chemical plants and power plants		
Lieferbare Farbtöne available colours	grey		
2. Zusammensetzung* Composition*			
Bindemittelbasis binder	Epoxy-resin		
Pigmentbasis pigments	zinc dust		
Lösemittel solvent	aromatic compounds, ester		
3. Lacktechnische Daten Technical data			
Glanzgrad gloss	dim inclined at an angle of 60°	Viskosität viscosity	25-55 : DIN6-sec.
Dichte density	2,23 g/cm³	Topfzeit pot-life	6 - 8 h : 10 kg barrel at 20 °C
Festkörpervolumen solids by volume	226 cm³/kg 51 Vol. %	theoretischer Verbrauch theoretical consumption	354 g / m²
Theoretische Ergiebigkeit theoretical spreading rate	2,83 m² / kg at 80 µm		
Temperaturbeständigkeit temperature resistance	approx. 120 °C dry load		

4. Trockenzeiten Drying time				
TG 1 staubtrocken dust – dry	:	approx. 20 min.	bei 80 µm Normklima at 80 µm standard climate	
TG 5 griffest dry to touch	:	approx. 3 h	bei 80 µm Normklima at 80 µm standard climate	
TG 7 mech. belastbar mechanical stress resistance	:	approx. 8-10 h	bei 80 µm Normklima at 80 µm standard climate	
überarbeitbar nach recoating	:	2-3 h	at 80 µm standard climate at spraying application	
5. Verarbeitungshinweise Application				
Oberflächenvorbereitung surface preparation	:	Sa 2 ½ up to Sa 3 in according to DIN EN ISO 12944		
Streichen application by brush	:	kind of delivery		
Rollen application by roller	:	kind of delivery; minor layer thicknesses has to be expected		
Fluten flow coating	:	---		
		ca. DIN – 4 Sek. approx. DIN – 4 sec.	Verdünnungszugabe thinning ratio	Druck pressure (bar)
Hochdruckspritzen high pressure spraying	:	40 - 70	approx. 5 % EM 01 thinner	Düse nozzle (mm) 4 – 5 1,5 – 2,5
Airless-Spritzen airless spraying	:	kind of delivery	up to 3% EM 01 thinner	180 – 220 0,31 – 0,48
andere Applikationen other applications	:	---		
Luft-/ Objekt-Temperatur air-surface-temperature	:	mind. 5°C, maximal 45°C minimum 5°C, maximum 45°C		
Taupunkt dew point	:	mind. 3° unter Luft- und Objekttemperatur at least 3° below air- and subject temperature		
empfohlene Schichtdicke recommended thickness	:	80 µm		
6. Sonstiges other information				
Lagerstabilität shelf life Storage Remark	:	12 month original package; store cool but free of frost		
weitere Hinweise further information	:	siehe Register see register 222-156-002	:	* bezogen auf den Farbton referring to colour: grey

Wir empfehlen unsere Erzeugnisse aufgrund der heutigen Erkenntnisse. Für die Verarbeitung und Verwendung unserer Beschichtungsstoffe und Lacke sind die einschlägigen Normen maßgebend, für den Korrosionsschutz DIN-EN-ISO 12944, soweit nicht andere Stoff- und Verarbeitungsanweisungen vorliegen. Wegen der Vielseitigkeit der Anwendungs- und Verarbeitungsmöglichkeiten kann jedoch hieraus keine Verbindlichkeit abgeleitet werden. Soweit das in diesem Datenblatt angesprochene Produkt Teil eines Systems ist, sind die technischen Regeln für den Gesamtaufbau zu beachten. Mit Erscheinen dieses Datenblattes verlieren die vorherigen Ausgaben ihre Gültigkeit; bitte fordern Sie vor der Anwendung das neueste Datenblatt und Sicherheitsdatenblatt an.

We recommend our products on the basis of the latest research findings. For processing and applying our coating materials and varnishes, the official standards apply. That is DIN-EN-ISO 12944 for corrosion protection if no other processing instructions apply. Due to the versatility of processing and application opportunities, these standards are not generally applicable. In case the product described here is part of a system, the technical rules for this system must be considered. This data sheet replaces all preceding editions. Before applying our product, please ask for our actual data sheet and security data sheet.



F4:013/01

1. Allgemeine Stoffangaben General data		Bindemittel Binder	Register Register
		AY-D	4-1
Bezeichnung Name of product	CHING-HYDROVERSAL-primer : thickness 80 µm HV 186 grey		
Art Generic type	water-dilutable, quick drying, corrosions protection primer sustaining early stress for steel and galvanized steel		
Einsatzgebiet Field of application	industrial sheets, airport buildings, warehouses, parking units, chemical industries, off-shore-area, tank units, power stations, bridges		
Lieferbare Farbtöne Available colours	grey		
2. Zusammensetzung* Composition*			
Bindemittelbasis Binder	modified acrylic polymer dispersion		
Pigmentbasis Pigments	zinc phosphate, tinted colours, extenders		
Lösemittel Thinner	water and organic coalescence agent		
3. Lacktechnische Daten Technical data			
Glanzgrad Gloss	mat	Viskosität Viscosity	90 - 110 KU
Dichte Density	1,28 ± 0,1 g / cm ³		
Festkörpervolumen Solids by volume	346 cm ³ / kg 44 Vol. %	theoretischer Verbrauch theoretical consumption	231 g / m ²
Theoretische Ergiebigkeit Theoretical spreading rate	4,3 m ² / kg	80 µm	
Temperaturbeständigkeit Temperature resistance	approx 100 °C	dry climate	

4. Trockenzeiten Drying time				
TG 1 staubtrocken dust – dry	:	approx 40 min.	bei 80 µm Normklima at 80 µm standard climate	
TG 5 griffest dry to touch	:	approx 3 - 4 hrs	bei 80 µm Normklima at 80 µm standard climate	
TG 7 mech. belastbar mechanical stress resistance	:	approx 24 hrs	bei 80 µm Normklima at 80 µm standard climate	
überarbeitbar nach recoating	:	6 - 8 hrs	with compatible coatings e.g. CHING HYDROVERSAL intermediate – or top- coat	
5. Verarbeitungshinweise Application				
Oberflächenvorbereitung Surface preparation	:	according to DIN EN ISO 12944,		
Streichen Brush application	:	as delivered – keep attention, fast drying		
Rollen Roller application	:	not recommended because bubbles, crater formations and minor layer thickness has to be expected		
		ca. DIN – 4 Sek. approx. DIN – 4 sec.	Verdünnungszugabe thinner ratio	Druck (bar) pressure
Hochdruckspritzen High-pressure spraying	:	30 - 50	approx 5 - 10 % deion. water	1,5
Airless-Spritzen Airless spraying	:	---	approx 3 % deion. water	120 - 200
Andere Applikationen Other applications	:	---		
Luft-/ Objekt-Temperatur Air-subject-temperature	:	mind. 7 °C, maximal 40 °C minimum 7 °C, maximum 40 °C		
Taupunkt Dew point	:	mind. 3°C unter Luft- und Objekttemperatur at least 3°C below air- and subject temperature		
Empfohlene Schichtdicke Recommended thickness	:	80 µm		
6. Sonstiges Other information				
Lagerstabilität Shelf life	:	12 month in the original tin, store in a cool frost free place		
weitere Hinweise further information	:	siehe Register see register	:	* bezogen auf den Farbton referring to colour grey

Wir empfehlen unsere Erzeugnisse aufgrund der heutigen Erkenntnisse. Für die Verarbeitung und Verwendung unserer Beschichtungsstoffe und Lacke sind die einschlägigen Normen massgebend, für den Korrosionsschutz DIN-EN-ISO 12944, soweit nicht andere Stoff- und Verarbeitungsanweisungen vorliegen. Wegen der Vielseitigkeit der Anwendungs- und Verarbeitungsmöglichkeiten kann jedoch hieraus keine Verbindlichkeit abgeleitet werden. Soweit das in diesem Datenblatt angesprochene Produkt Teil eines Systems ist, sind die technischen Regeln für den Gesamtaufbau zu beachten. Mit Erscheinen dieses Datenblattes verlieren die vorherigen Ausgaben ihre Gültigkeit; bitte fordern Sie vor der Anwendung das neueste Datenblatt und Sicherheitsdatenblatt an.

We recommend our products on the basis of the latest research findings. For processing and applying our coating materials and varnishes, the official standards apply. That is DIN-EN-ISO 12944 for corrosion protection if no other processing instructions apply. Due to the versatility of processing and application opportunities, these standards are not generally applicable. In case the product described here is part of a system, the technical rules for this system must be considered. This data sheet replaces all preceding editions. Before applying our product, please ask for our actual data sheet and safety data sheet.



1. Allgemeine Stoffangaben general data		Bindemittel binder	Register register
		AY-D	4.3
Bezeichnung name of product	: CHING HYDROVERSAL top coat thickness 80 µm HV 43		
Art generic type	: water-dilutable, quick-drying, top coating sustaining early stress with decorative anti-corrosion properties for primed steel and zinc and as direct coat for galvanized steel and aluminium, and as retouch coating		
Einsatzgebiet field of application	: industrial and airport buildings, warehaouse, car-parkings, chemical units, off-shore-rea, power units or other steel constructions		
Lieferbare Farbtöne available colours	: RAL-colours		
2. Zusammensetzung* composition*			
Bindemittelbasis binder	: modified acrylic polymer dispersion		
Pigmentbasis pigments	: tinting colours and extender		
Lösemittel thinner	: water and organic coalescence agent		
3. Lacktechnische Daten technical data			
Glanzgrad gloss	: satin float inclined at an angle of 60°	Viskosität viscosity	: 90 - 110 KU
Dichte density	1,25 ± 0,1 g / cm³		
Festkörpervolumen solids by volume	: 349 cm³ / kg 44 Vol. %	theoretischer Verbrauch theoretical consumption	: g / m²
Theoretische Ergiebigkeit theoretical spreading rate	: 4,3 m² / kg	80 µm	
Temperaturbeständigkeit temperature resistance	: ca. 80 °C	dry load	

4. Trockenzeiten drying time				
TG 1 staubtrocken dust – dry	:	approx. 40 min.	bei 80 µm Normklima at µm standard climate	
TG 5 griffest dry to touch	:	approx. 3 - 4 h	bei 80 µm Normklima at µm standard climate	
TG 7 mech. belastbar mechanical stress resistance	:	approx. 24 h	bei 80 µm Normklima at µm standard climate	
überarbeitbar nach recoating	:	6 - 8 h	with itself	
5. Verarbeitungshinweise application				
Oberflächenvorbereitung substrate preparation	:	in according to DIN EN ISO 12944; qualified basic- or intermediate coating		
Streichen brush application	:	in the kind of delivery; keep attention to the quickly drying time		
Rollen roller application	:	not recommended; minor layer thickness and bubbles have to be expected		
		ca. DIN – 4 Sek. approx. DIN – 4 sec.	Verdünnungszugabe thinning ratio	Druck pressure bar
Hochdruckspritzen high-pressure spraying	:	30 - 50	approx. 5 - 10 % deion. water	4 - 5
Airless-Spritzen airless spraying	:	---	approx. 3 % deion. water	120 - 200
andere Applikationen other applications	:	---		
Luft-/ Objekt-Temperatur air-subject-temperature	:	mind. 7 °C, maximal 40 °C minimum 7 °C, maximum 40 °C		
Taupunkt dew point	:	mind. 3°C unter Luft- und Objekttemperatur at least 3°C below air- and subject temperature		
empfohlene Schichtdicke recommended thickness	:	80 µm		
6. Sonstiges other information				
Lagerstabilität shelf life	:	12 month original package; store cool but free of frost		
weitere Hinweise further information	:	siehe Register see register	:	* bezogen auf den Farbton referring to colour RAL 7032

Wir empfehlen unsere Erzeugnisse aufgrund der heutigen Erkenntnisse. Für die Verarbeitung und Verwendung unserer Beschichtungsstoffe und Lacke sind die einschlägigen Normen massgebend, für den Korrosionsschutz DIN-EN-ISO 12944, soweit nicht andere Stoff- und Verarbeitungsanweisungen vorliegen. Wegen der Vielseitigkeit der Anwendungs- und Verarbeitungsmöglichkeiten kann jedoch hieraus keine Verbindlichkeit abgeleitet werden. Soweit das in diesem Datenblatt angesprochene Produkt Teil eines Systems ist, sind die technischen Regeln für den Gesamtaufbau zu beachten. Mit Erscheinen dieses Datenblattes verlieren die vorherigen Ausgaben ihre Gültigkeit; bitte fordern Sie vor der Anwendung das neueste Datenblatt und Sicherheitsdatenblatt an.

We recommend our products on the basis of the latest research findings. For processing and applying our coating materials and varnishes, the official standards apply. That is DIN-EN-ISO 12944 for corrosion protection if no other processing instructions apply. Due to the versatility of processing and application opportunities, these standards are not generally applicable. In case the product described here is part of a system, the technical rules for this system must be considered. This data sheet replaces all preceding editions. Before applying our product, please ask for our actual data sheet and security data sheet.