

# Ispitivanje djelotvornosti zaštite premazima primijenjenim nestandardnim i/ili inovativnim postupcima

---

Dubravić, Mia

Master's thesis / Diplomski rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:149:093833>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-18**



FKITMCMXIX

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

Mia Dubravić

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, rujan 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

Mia Dubravić

ISPITIVANJE DJELOTVORNOSTI ZAŠTITE PREMAZIMA  
PRIMIENJENIM NESTANDARDNIM I/ILI INOVATIVNIM  
POSTUPCIMA

DIPLOMSKI RAD

Voditelj rada: Prof. dr. sc. Sanja Martinez

Članovi ispitnog povjerenstva: prof. dr. sc. Sanja Martinez

prof. dr. sc. Mirela Leskovic

izv. prof. dr. sc. Marijana Kraljić Roković

Zagreb, rujan 2018.

Zahvaljujem svojoj mentorici, prof. dr. sc. Sanji Martinez, i asiscentici Ivani Šoić na pomoći pri izradi ovoga rada, te na srdačnosti i ugodnoj atmosferi.

Zahvaljujem prof. dr. sc Mireli Leskovic što mi je omogućila rad sa uređajem za DSC analizu, te na srdačnoj atmosferi.

Veliku zahvalnost upućujem svojoj mentorici Danieli Rakeli - Ristevski iz tvrtke Končar – Metalne konstrukcije, koja mi je svojim stručnim i nesebičnim savjetima, s puno strpljivosti i srdačnosti, uz prijateljsku atmosferu, pomogla u izradi ovoga rada. Hvala i na životnim savjetima i podijeljenim iskustvima kojih ću se uvijek sjećati.

Nadalje, zahvaljujem zaposlenicima tvrtke Končar – Metalne konstrukcije na volji, vremenu i pomoći prilikom izrade rada.

Najveće hvala mojoj obitelji koja mi je ovo omogućila te je uvijek vjerovala u mene i bila mi najveća podrška kroz studij.

Također, hvala svim prijateljima koji su bili uz mene te mi omogućili lakše i veselije godine studiranja.

## SAŽETAK

U ovom radu obrađena je površinska zaštita metala od korozije pomoću IC sušivih premaza, te ustanovljena razlika u brzini sušenja premaza, svojstvima premaza te količini HOS-a koja se ispušta prilikom sušenja premaza putem IC - a u odnosu na konvencionalno sušenje premaza na sobnoj temperaturi. Jedan od ciljeva ispitivanja je također bio odrediti kako udaljenost od izvora IC zračenja utječe na brzinu sušenja premaza.

Za ispitivanje i karakterizaciju takvih premaza korištena je metoda elektrokemijske impedancijske spektroskopije (EIS) te metoda diferencijalne pretražne kalorimetrije (DSC) Za određivanje kvalitete premaza prema standardu ISO 12944-6 korišten je test prionjivosti premaza odnosno *pull off* test, sukladno s normom EN ISO 4624.

Na temelju provedenih ispitivanja, ustanovljene su prednosti i nedostaci sušenja premaza pomoću IC tehnologije u odnosu na konvencionalnu metodu sušenja premaza. Tehnike sušenja uspoređene su s ekonomskog, ekološkog te energetskog aspekta. Napravljena je analiza isplativosti uvođenja takve tehnologije u postrojenja, u odnosu na postrojenje u kojem su premazi sušeni na konvencionalan način.

Ključne riječi: površinska zaštita, infracrveno zračenje, premazi, HOS, elektrokemijska impedancijska spektroskopija, diferencijalna pretražna kalorimetrija, adhezija, *pull – off* test

## ABSTRACT

In this thesis, surface protection technology of metal using IR dried coatings was analyzed, and it was also pointed the difference in speed, characteristics and quantity of VOC released between IR dried coatings, compared to the coatings dried in a conventional way on room temperature. Also, the other purpose of these tests was to find how the distance from the IR emitter affects the drying speed of the coatings.

For the testing and characterization of such coatings, the method of electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and differential scanning calorimetry (DSC) were used. For determining the quality of the coating, in accordance with the norm EN ISO 12944- 6, *pull off* test was conducted to determine the adhesion of such coatings, in accordance with the norm EN ISO 4624.

Based on the tests that were carried out, the advantages and disadvantages of drying the coatings with IR technology were compared with the conventional method of drying the coatings. The drying methods were compared from the economical, ecological and energy related aspects. An analysis on the feasibility of introducing such technology into plants was made, compared to a facility with a conventional method of drying the coatings.

Key words: surface protection, infrared radiation, coatings, VOC, electrochemical impedance spectroscopy (EIS), differential scanning calorimetry (DSC), *pull off* test

# SADRŽAJ

|   |    |
|---|----|
| <b>1. UVOD</b> .....  | 1  |
| <b>2. OPĆI DIO</b> .....  | 2  |
| 2.1. Zaštita metala organskim premazima .....   | 2  |
| 2.1.1. Hlapivi organski spojevi .....   | 4  |
| 2.2. Kemija organskih premaza.....  | 5  |
| 2.2.1. Epoksidni premazi.....   | 5  |
| 2.2.1.2. Epoksidni premazi s visokim udjelom cinka .....  | 7  |
| 2.2.2. Poliuretanski premazi.....   | 9  |
| 2.3. Stupnjevi korozije čelika.....   | 10 |
| 2.4. Obrada čelične površine mlazom abraziva .....  | 11 |
| 2.4.1. Stupnjevi pripreme površine .....  | 12 |
| 2.5. Sušenje premaza.....   | 13 |
| 2.5.1. Mehanizmi sušenja premaza .....  | 13 |
| 2.5.2. Sušenje premaza tehnologijom infracrvenog zračenja.....                                    | 13 |
| 2.5.2.1. Razlika između sušenja premaza IC zračenjem i sušenja premaza konvencionalnim putem..... | 15 |
| 2.5.2.2. Proces nastanka IC zračenja u katalitičkom IC emiteru.....                               | 16 |
| 2.5.2.3. Primjena IC zračenja.....  | 18 |
| 2.6. Tehnike karakterizacije i ispitivanja svojstava premaza .....                                | 19 |
| 2.6.1. Elektrokemijska impedancijska spektroskopija (EIS) .....                                   | 19 |
| 2.6.2. Diferencijalna pretražna kalorimetrija (DSC).....  | 26 |
| <b>3. EKSPERIMENTALNI DIO</b> .....   | 29 |
| 3.1. Priprema uzoraka .....   | 29 |
| 3.2. Uvjeti mjerenja.....   | 32 |
| 3.3. Mehanička predobrada čelične površine.....   | 33 |
| 3.4. Određivanje čistoće površine nakon sačmarenja .....  | 33 |
| 3.5. Test hrapavosti površine .....   | 33 |
| 3.6. Test prašine .....   | 35 |
| 3.7. Bresle test.....   | 36 |
| 3.8. Nanošenje i mjerenje debljine mokrog filma nanesenog premaza.....                            | 37 |
| 3.9. Sušenje premaza IC tehnologijom te mjerenje debljine suhog filma.....                        | 40 |
| .....   | 40 |
| 3.10. Metode karakterizacije i određivanja svojstava premaza.....                                 | 42 |
| 3.10.1. Ispitivanje u vlažnoj komori .....  | 42 |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.10.2. Ispitivanje u slanoj komori.....                              | 43        |
| 3.10.3. Elektrokemijska impedancija spektroskopija.....               | 45        |
| 3.10.4. Diferencijalna pretražna kalorimetrija .....                  | 46        |
| 3.10.5. Određivanje kvalitete premaza prema normi ISO 12944 - 6 ..... | 48        |
| <b>4. REZULTATI I RASPRAVA .....</b>                                  | <b>49</b> |
| 4.1. Rezultati Bresle testa prije aplikacije premaza .....            | 49        |
| 4.2. Izmjerene brzine sušenja premaza te debljine suhog filma.....    | 50        |
| 4.3. Rezultati dobiveni EIS tehnikom .....                            | 60        |
| 4.4. Rezultati dobiveni DSC tehnikom .....                            | 64        |
| 4.5. Rezultati <i>pull off</i> testa .....                            | 75        |
| 4.6. Ekološki aspekt .....  | 78        |
| 4.7. Energetski aspekt .....  | 80        |
| <b>5. ZAKLJUČAK .....</b>   | <b>83</b> |
| <b>6. POPIS OZNAKA .....</b>  | <b>86</b> |
| <b>7. LITERATURA .....</b>  | <b>87</b> |
| ŽIVOTOPIS.....  | 88        |



# 1.UVOD

U industriji metala oduvijek su prisutni problemi s korozijom koji uzrokuju visoke troškove zbog potrebe za površinskom zaštitom od korozije. S ekonomskog stajališta korozija metala uzrokuje velike troškove u gospodarstvu jer štetno djeluje na sirovine i proizvode na način da smanjuje njihovu uporabnu vrijednost zbog gubitka mase metala. Procjene gubitaka uzrokovanih korozijom metala, te mjere za zaštitu od korozije pokazuju da se u industrijskim zemljama troškovi kreću u rasponu od 3 do 5% bruto domaćeg proizvoda godišnje [1].

U ovom radu prikazana je metoda zaštite metala od korozije pomoću organskih premaza s antikorozivnim djelovanjem. Ti premazi djeluju kao aktivna zaštita metala odnosno galvanska zaštita kada se govori o premazima na bazi cinka, te kao pasivna odnosno barijerna zaštita. Premaz mora biti postojan na svim dijelovima površine metala kojeg štiti. U slučaju kada premaz nije takav, dolazi do nepravilnosti i nesavršenosti te je moguća pojava korozije. To rezultira gubicima jer je potrebno ukloniti korozivne dijelove.

Troškovi nanošenja površinske zaštite u radionama i na terenu iziskuje mnogo vremena, pogotovo zbog sušenja premaza, čega je posljedica smanjenje protočnosti dijelova kroz pogon te same produktivnost izvođača radova. Zbog toga postoji težnja za bržim sušenjem premaza, što će u ovom radu biti objašnjeno sušenjem premaza tehnologijom infracrvenog zračenja.

Infracrveno zračenje je nova tehnologija sušenja boja i lakova koja omogućuje mnogo brže sušenje premaza od sušenja konvencionalnim putem ili pri atmosferskim (sobnim) uvjetima. Osim toga, ima mnoge druge prednosti nad konvencionalnim načinom sušenja. U ovom će se radu usporediti IC i sobno sušenje premaza sa ekološkog, ekonomskog i energetskog aspekta te će biti prikazan utjecaj udaljenosti predmeta od izvora IC zračenja na brzinu sušenja premaza.

U radu su obrađeni materijali (premazi), tehnike aplikacije premaza, tehnike pripreme površine te tehnike kontrole kvalitete koje se provode u tvrtki Končar- Metalne konstrukcije.

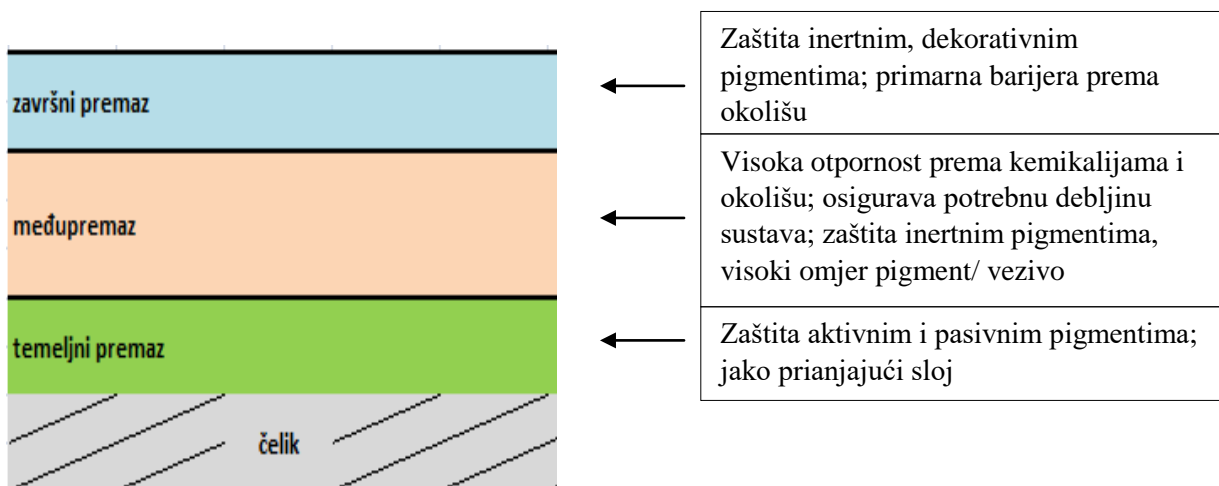
## 2. OPĆI DIO

### 2.1. Zaštita metala organskim premazima

Organski premazi zbog niske cijene imaju nezamjenjivu ulogu u zaštiti metalnih konstrukcija od korozije. Učinkovitost zaštite ovisi o pravilnom odabiru sustava premaza, svojstvima premaza te stanju metala i tehnologiji nanošenja premaza. Stoga je potrebno uzeti u obzir cijeli sustav i tehnologiju izvođenja zaštite uključujući i najčešće kompleksan sastav same prevlake. Zaštita metala premazima jedan je od najrasprostranjenijih postupaka zaštite u industriji, čak 3/4 metalnih površina zaštićeno je premazima. Jedan od osnovnih razloga tome je relativno niska cijena premaza u odnosu na druge metode zaštite od korozije. Premazi se, osim u zaštitne svrhe, nanose i zbog poboljšanja estetskog izgleda metalne površine (dekorativni premazi) pa tako postoje bezbojni i različito obojeni premazi, zatim sjajni, polusjajni i mat premazi.

Zaštita premazima pripada u aktivne i pasivne metode zaštite metala. Aktivna odnosno galvanska zaštita odnosi se na zaštitu pomoću premaza sa visokim udjelom cinka (*Zn - rich* premazi), pri čemu se cink troši i na taj način štiti metal. Kod pasivne zaštite, korozija se sprječava ili barem usporava postupcima izolacije (barijernom zaštitom) metalnog materijala od korozivne okoline korištenjem zaštitnih 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, međuslojni premazi 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. Primjer jednog troslojnog sustava premaza dan je na slici 1.



*Slika 1. Troslojni sustav premaza*

Relativni troškovi premazivanja neusporedivi su s troškovima zamjene korozijom oštećenih metala.

### 2.1.1. Hlapivi organski spojevi

Svi premazi, osim premaza sa volumenom suhe tvari većim od 98%, sadrže hlapive organske spojeve (HOS). HOS je svaki organski spoj čija je temperatura vrelišta manja ili jednaka 250 °C pri standardnom tlaku od 101,3 kPa [2]. Hrvatska je usklađena sa zakonodavstvom EU od dana pristupanja Europskoj uniji prema HOS EU Direktivi 2004 / 42 EC. Zbog toga, danas postoji tendencija zamjene takvih premaza najprije premazima s većim sadržajem suhe tvari (manje otapala), kao i zamjena premaza na bazi otapala sa premazima na bazi vode, koji sadrže manji udio HOS – a. Neki od hlapivih organskih spojeva u bojama koji čine sastavni dio premaza su alifatski i aromatski ugljikovodici te alkoholi.

Sa ekološkog aspekta, ti spojevi djeluju nepovoljno na klimu jer stvaraju ozonske rupe pri čemu pojačavaju „efekt staklenika“, zbog čega postoji tendencija i zakonska obveza za njihovim smanjenjem.

Uloge HOS – a u premazima:

- Sama izrada premaza (utječu na viskoznost materijala)
- Aplikacijska svojstva premaza (razlijevanje, sušenje, podešavanje viskoznosti premaza za različite tehnike nanošenja premaza)

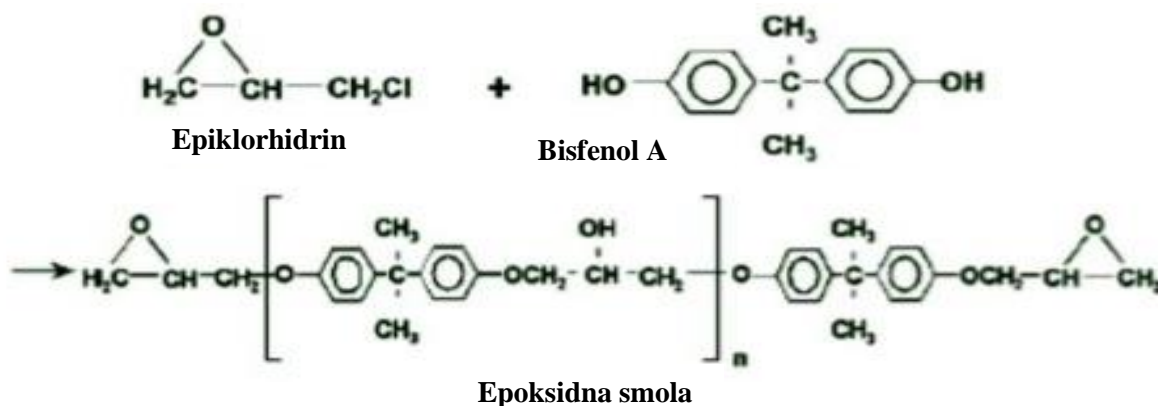
Tijekom nanošenja i sušenja mokrog filma do potpunog sušenja premaza, svi HOS-evi u konačnici ispare iz premaza, ostavljajući potpuno suhi sloj premaza.

## 2.2. Kemija organskih premaza

U ovom radu korišteni su premazi na osnovi epoksidne i poliuretanske smole.

### 2.2.1. Epoksidni premazi

Epoksidne smole su vrlo važan tehnološki materijal koji se najviše primjenjuje u području premaza, ljepila (adheziva) i plastike te se kao takve u području premaza koriste više od 60 godina. Epoksidni premazi omogućuju dobro prianjanje na površinu, dobru kemijsku postojanost i fizička svojstva, čime pružaju odličnu zaštitu u različitom korozivskom okolišu. Upravo zbog tih svojstava, premazi na bazi epoksida se uvelike koriste u rafinerijama, kemijskim postrojenjima, naftnim platformama, mostovima, željezničkom transportu te auto i avio industriji. Epoksidne smole obično traže reakcijskog partnera za umreženje, koje se odvija poliadicijom preko epoksi ili hidroksilnih grupa, pri čemu se komponente miješaju neposredno prije nanošenja. Brojni reakcijski dodaci mogu poslužiti za sušenje pri sobnoj (poliamini, poliamidi, poliizocijanati) ili povišenoj temperaturi (polifenoli, kiseline i karboksi funkcionalni esteri) [3]. Na primjeru na slici 2 prikazana je sinteza epoksidne smole.



Slika 2. Sinteza epoksidne smole

Drugi dio dvokomponentnih epoksidnih premaza su umreživači, koji kada se povežu s epoksidnom smolom stvaraju kemijsku vezu, čime se povećava molekulska masa molekule premaza te ovisno o odabranom umreživaču utječu na svojstva premaza. Dobivenoj smoli se često dodaju razni aditivi radi poboljšanja svojstava i upravo se pomoću njih ostvaruje dobra kvaliteta premaza. Umreživači su najčešće poliamini (korišteni više za kemijsku otpornost i zaštitu) i poliamidi (više otporni na atmosfersku koroziju) [4].

Poliamidni umreživači su kondenzacijski produkt masne kiseline s poliaminom. Masna kiselina poboljšava fleksibilnost, nanošenje premaza na površinu, adheziju te otpornost premaza na vodu. Također, odlikuju se boljim sjajem, otporniji su na abraziju, te su prihvatljiviji u korozivskim sredinama koje nisu izložene UV zrakama (zbog pojave kredanja i raspada veziva), u odnosu na premaze otvrdnute poliaminima. S druge strane, imaju manju kemijsku otpornost te manju otpornost na otapala i lužine od poliamina.

*Tablica 1. Prednosti i nedostaci organskih premaza na bazi epoksida*

| <b>Prednosti</b>                                | <b>Nedostaci</b>                                       |
|---|--|
| <b>dobra vodonepropusnost</b>                   | <b>slaba otpornost na UV zračenje</b>                  |
| <b>dobra prionjivost</b>                        | <b>aplikacija i otvrdnjavanje ovisni o temperaturi</b> |
| <b>dobra kemijska otpornost</b>                 | <b>problemi s premazivanjem otvrdnutog premaza</b>     |
| <b>vrlo dobra otpornost na lužine</b>           | <b>umjerena otpornost na kiseline</b>                  |
| <b>izvrsna otpornost na mehanička oštećenja</b> | <b>može uzrokovati alergije</b>                        |
| <b>dugotrajnost</b>                             | <b>dvokomponentni proizvodi</b>                        |
| <b>temperaturna otpornost do 120 °C</b>         |  |
| <b>visok sadržaj suhe tvari</b>                 |  |

### **2.2.1.1. Epoksidni premazi bez cinka**

Epoksidni premazi bez cinka koriste se kao temeljni sloj ili međusloj, te služe kao barijerna zaštita.

**Hempadur Mastic 4588W** dvokomponentna je epoksidna boja koja otvrdnjava poliamidnom smolom, te pripada u pasivne metode zaštite metala [5].

Svojstva:

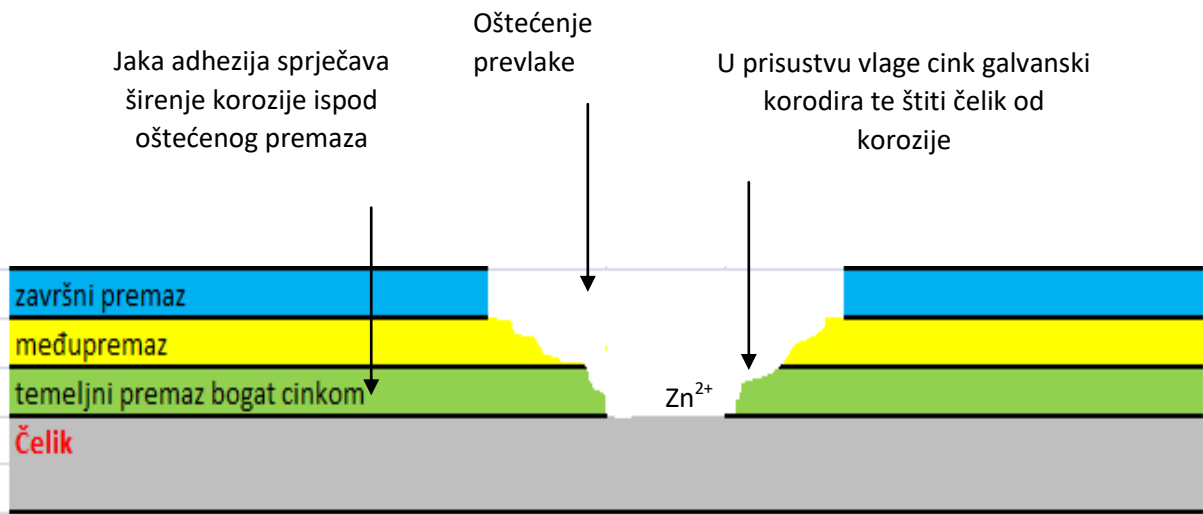
- Ima visok sadržaj suhe tvari, a formulirana je za nanošenje u debelom sloju. Stvara otporan i izdržljiv premaz, te mu je svojstveno dobro kvašenje podloge.
- Preporuča se kao samostojeći sustav premaza kojemu nije potreban temeljni premaz ili kao međupremaz u sustavima premaza namijenjenim teškim uvjetima rada u atmosferskoj izloženosti gdje se traži niski sadržaj HOS – a i nanošenje u debelom sloju.
- Otvrdnjava na niskim temperaturama, zbog čega je naročito pogodan za nanošenje pri niskim temperaturama (sve do  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) te tamo gdje se zahtjeva relativno kratak međupremazni interval.

### **2.2.1.2. Epoksidni premazi s visokim udjelom cinka**

Organski premazi s visokim udjelom cinka uglavnom koriste epoksi poliamid i poliuretan kao vezivo te pripadaju u aktivnu odnosno galvansku zaštitu metala od korozije.

To su premazi koji sadrže 92-94 % cinkovog praha u suhom premazu. Imaju vrlo kratko vrijeme sušenja, te su zbog anodnog učinka cinka prema površini podloge izvrsna katodna zaštita.

Galvanski učinak postiže se upotrebom premaza koji sadrže kugličaste pigmente od praškastog cinka. Cink je manje plemenit metal od čelika te će prvi korodirati dok će čelik ostati zaštićen. Produkti korozije cinka malo su topivi u vodi pa prevlake s cinkom nisu pogodne za površine koje su uronjene u vodu [6]. Na slici 3 prikazan je galvanski učinak zaštite pomoću temeljnog premaza s cinkom.



Slika 3. Galvanski učinak zaštite premazima

Tablica 2. Prednosti i nedostaci organskih premaza obogaćenih cinkom

| Prednosti  | Nedostaci   |
|--|---|
| <p>mogućnost primjene u različitim okolišima</p> <p>jednostavno nanošenje bez mjehuranja i delaminacije</p> <p>otporni na polijevanje slatkim i slanom vodom</p> | <p>neotporni na izravno izlaganje organskim i anorganskim kiselinama</p> <p>ograničena otpornost na aromatska i alifatska otapala</p> |

**Hempadur AvantGuard 750** dvokomponentni je cinkom bogat-epoksidni temelj kod kojega dolazi do aktivacije cinka te se koristi za dugoročnu zaštitu čelika u jako korozivnom okolišu [7].

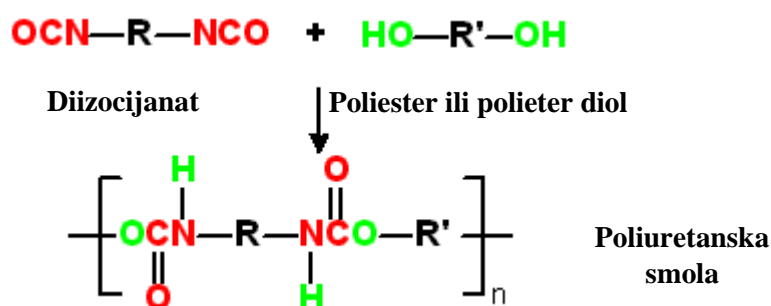


Svojstva:

- Smanjuje utjecaj korozije i nudi izvanrednu zaštitu.
- Posjeduje dobru mehaničku snagu i bolju otpornost na pucanje, zahvaljujući velikoj elastičnosti i sposobnosti samoobnove mikro pukotina (nova generacija *Zn – rich* premaza).
- Ima visoku toleranciju na različite klimatske uvjete (visoku temperaturu i vlažnost) u toku nanošenja, kao i na veliku debljinu suhog filma.

### 2.2.2. Poliuretanski premazi

Poliuretanski premazi su jako otporni prema otapalima, imaju dobru mehaničku otpornost, visoku kemijsku postojanost i nisku propusnost na vodenu paru. Karakteristike poliuretanskog premaza su lijep izgled, postojane nijanse, sjaj i zaštita od sunca te otpornost na abraziju i temperature do 170 °C. Zbog navedenih karakteristika često se koriste kao završni premaz. Premazi na osnovi poliuretana mogu biti jednokomponentni ili dvokomponentni. Jednokomponentna sredstva otvrdnjuju djelovanjem vlage iz zraka, pečenjem na temperaturi višoj od 85 °C ili su veziva modificirana suvišnim uljima i alkidima. Najkvalitetnije prevlake daju dvokomponentna sredstva od izocijanatnog i polieterskog (ili polieterskog) dijela koja reaktivno otvrdnjuju u premaze s lijepim izgledom i postojanom nijansom (slika 4).



Slika 4. Sinteza poliuretanske smole

**Hempathane HS 55610** dvokomponentni je sjajni poliuretanski završni premaz koji se skrućuje pomoću alifatskog izocijanata. Svojstveno mu je dobro zadržavanje sjaja i nijanse. Sadrži cink – fosfat. Pripada u pasivnu zaštitu metala od korozije [8].

### 2.3. Stupnjevi korozije čelika

Standard ISO 8501-1 definira 4 stupnja korozije čelične površine (tablica 3) [9].

Tablica 3. 4 stupnja korozije površine čelika

|   |  |   |
|---|--|---|
| A |   | Čelična površina znatno pokrivena sa prijanjajućom okujinom, ali s malo ili ništa hrđe.   |
| B |   | Čelična površina koja je započela hrđati i sa koje se okujina počela ljuškati.  |
| C |   | Čelična površina na kojoj je okujina zahrđala i otpala ili se može odstraniti struganjem, a koja pokazuje laganu dubinsku koroziju koja je vidljiva golim okom. |
| D |  | Čelična površina na kojoj je okujina zahrđala i otpala i na kojoj je golim okom moguće vidjeti dubinsku koroziju rasprostanjenu po cijeloj površini.            |

Na slici 5 prikazan je primjer korozije, kategorije C.



Slika 5. Primjer korozije u tvrtki Končar- Metalne konstrukcije

## 2.4. Obrada čelične površine mlazom abraziva

Čišćenje površine mlazom abraziva temelji se na kinetičkoj energiji, koju posjeduje suhi ili mokri mlaz čestica, koja se u trenutku sudara pretvara u mehanički rad. Na taj način se priprema površina neposredno prije aplikacije boje. Time se postiže određena hrapavost i čistoća površine te se s površine uklanja prašina, sol te razne nečistoće i korozijski produkti koji su uzrok slabije adhezije premaza za površinu metala. Sama sol je higroskopna te privlači vodu i vlagu, što uzrokuje pojavu elektrokemijske korozije.

Hrapavost površine bitna je jer utječe na mehaničku adheziju premaza. Povećanjem hrapavosti površine, povećava se i površina na koju premaz prijanja, a time je bolja i prionjivost premaza za površinu.

Za obradu mlazom koriste se čestice od kremenog pijeska, zrnca silicijeva, borova te volframova karbida, sačma od ugljičnog ili nehrđajućeg čelika. Obrada mlazom abraziva naziva se pjeskarenje ili sačmarenje.

Ovom obradom postiže se hrapavost površine prema standardu ISO 8503-1 te čistoća površine prema standardu ISO 8501-1, opisane u eksperimentalnom dijelu.

### 2.4.1. Stupnjevi pripreme površine

Najčešće se primjenjuje ekonomsko, komercijalno čišćenje stupnja Sa2,5, te stupnja Sa3 za nanošenje tekućeg metala (npr. našpricavanje 99,9% - tnog cinka).

Tablica 4. Stupnjevi pripreme površine prema standardu HRN EN ISO 8501-1 [9]

|                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| <b>Sa1</b>                           | <b>Lagano čišćenje mlazom abraziva.</b><br>Prilikom pregleda bez upotrebe povećala, na površini ne smije biti vidljivog prisustva ulja, masnoća, onečišćenja, i slabo prianjajuće okujine, hrđe, premaza i stranih tijela.  |
| <b>Sa2</b>                           | <b>Temeljito čišćenje mlazom abraziva.</b><br>Prilikom pregleda bez upotrebe povećala, na površini ne smije biti vidljivog prisustva ulja, masnoća, onečišćenja, okujine, hrđe, premaza i stranih tijela. Bilo koji ostaci onečišćenja moraju dobro prianjati.  |
| <b>Sa 2<sup>1</sup>/<sub>2</sub></b> | <b>Vrlo temeljito čišćenje mlazom abraziva.</b><br>Prilikom pregleda bez upotrebe povećala, na površini ne smije biti vidljivog prisustva ulja, masnoća, onečišćenja, okujine, hrđe, premaza i stranih tijela. Bilo koji ostaci onečišćenja smiju biti prisutni samo u vidu laganih mrlja nalik na točkice ili pruge. |
| <b>Sa3</b>                           | <b>Čišćenje mlazom abraziva do vizualno čistog čelika.</b><br>Prilikom pregleda bez upotrebe povećala, na površini ne smije biti vidljivog prisustva ulja, masnoća, onečišćenja, okujine, hrđe, premaza i stranih tijela. Površina mora imati ujednačenu metalnu boju.  |

## 2.5. Sušenje premaza

Pri sušenju 2K premaza, prva faza uvijek je fizikalno sušenje odnosno isparavanje otapala, a druga faza kemijsko sušenje odnosno kemijska reakcija veziva i umreživača pri čemu nastaje film otporan na otapala iz premaza.

### 2.5.1. Mehanizmi sušenja premaza

Razlikuje se fizikalno i kemijsko sušenje. Kod fizikalno sušivih boja filmovi se formiraju hlapljenjem otapala. Naknadnim dodavanjem otapala film mekša i vraća se u prvobitno stanje. Kemijsko sušenje može se podijeliti na:

- oksidacijsko sušenje - film nastaje reakcijom kisika i veziva koja stvara konačan film
- dvokomponentno, kemijsko sušenje - boje koje se suše na ovakav način sastoje se od osnove (baze) i sredstva za otvrdnjavanje (umreživača). Njihovim miješanjem započinje kemijska reakcija čime dolazi do stvaranja filma. Osnova i umreživač zamiješaju se neposredno prije upotrebe. Vrijeme u kojem je premaz ovog tipa upotrebljiv za upotrebu nakon miješanja nazivamo radno vrijeme (eng. pot life). Ovim postupkom otvrdnjavaju epoksidi, PUR epoksi smole, PUR akrilne smole, PUR polieteri, itd.
- druge polimerizirajuće reakcije - film nastaje reakcijom veziva s vlagom u zraku reakcijom s ugljičnim dioksidom u zraku ili polimerizacijom pri povišenim temperaturama u trajanju od nekoliko sati pri 200°C.

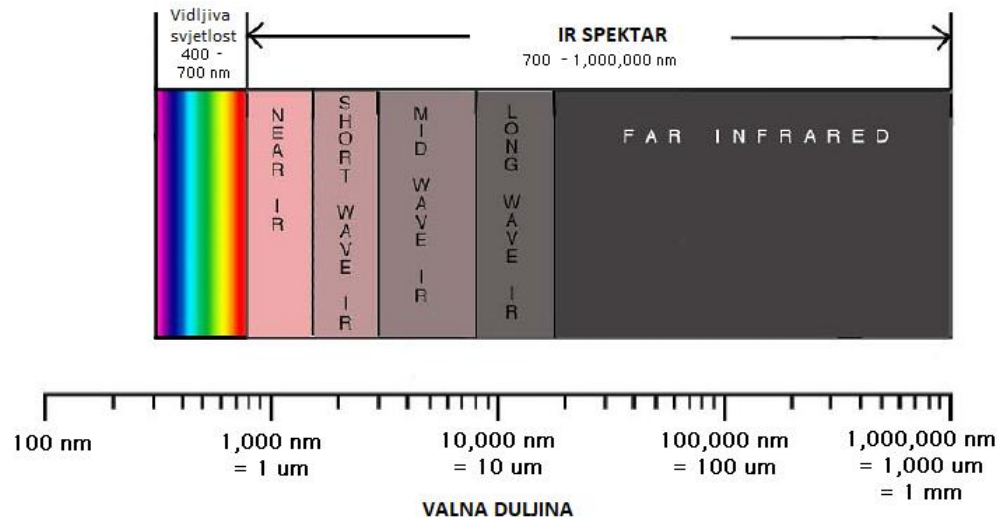
Treba napomenuti da se u praksi sušenje boja i lakova (osim kod fizikalnog sušenja) ne događa samo jednom metodom. Kod vodenih sustava i sustava otapala, koji se suše pri povišenoj temperaturi, fizikalno sušenje (isparavanje otapala odnosno vode) uvijek prethodi kemijskom.

### 2.5.2. Sušenje premaza tehnologijom infracrvenog zračenja

Infracrveno zračenje je elektromagnetsko zračenje valnih duljina od 700 nm do 1 mm. Emitiraju ga sva tijela zagrijana iznad temperature od -273 °C. Spada u područje između područja vidljive svjetlosti i mikrovalova u elektromagnetskom spektru.

Razlikujemo 3 tipa infracrvenog zračenja: dugovalno, srednjevalno i kratkovalno (slika 6), pri čemu se u industriji koristi ono kraćih valnih duljina jer omogućuje najbrže sušenje premaza. Što je tijelo toplije, to ono emitira više energije u obliku infracrvenog zračenja, a time je i valna duljina zračenja kraća.

Izbor valne duljine IC zračenja ovisi o apsorpcijskom spektru materijala.



Slika 6. Spektar IC zračenja

### 2.5.2.1. Razlika između sušenja premaza IC zračenjem i sušenja premaza konvencionalnim putem

Mehanizam sušenja premaza je isti (fizikalno i kemijsko sušenje), a razlikuju se samo u brzini sušenja.

Sušenje odnosno otvrdnjavanje premaza, bilo ono fizikalno ili kemijsko, može se ubrzati korištenjem jednog od dva navedena načina:

- sušenje prijenosom toplog zraka (konvekcija)
- sušenje radijacijom (infracrveni valovi, UV valovi, mikrovalovi,...).

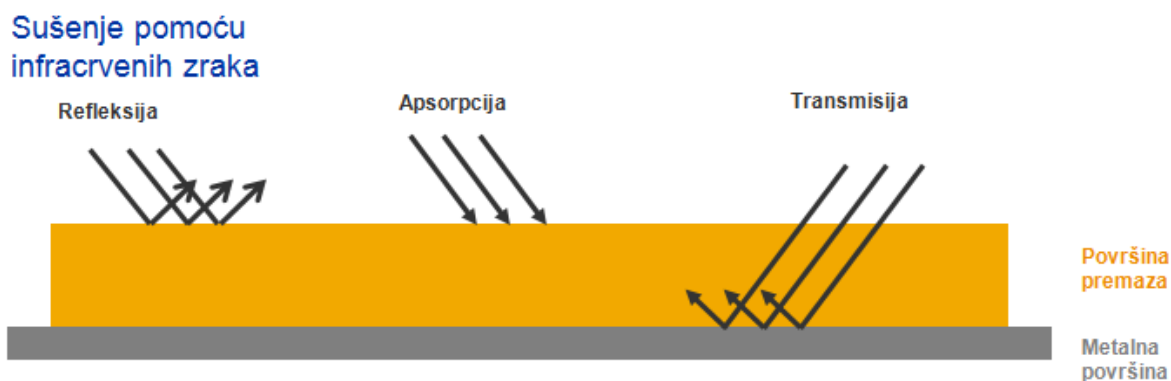
Pri konvencionalnom sušenju premaza najprije se zagrijava zrak koji prenosi toplinu do površine premaza, pri čemu se toplinske zrake odbijaju od površine metala zagrijavajući samo površinske slojeve premaza, čime se on suši izvana prema unutra (slika 7) [10]. Sušenje se može ubrzati isključivo povišenjem temperature.

#### Konvencionalno sušenje



Slika 7. Konvencionalno sušenje premaza

Korištenjem infracrvenih zraka za sušenje premaza, manji dio infracrvenih zraka će se reflektirati od površine premaza, veći dio zračenja će apsorbirati sam premaz, a ostatak će transmitirati do površine metala koja će se zagrijati. Na taj način premaz se suši i iznutra prema van, odnosno od površine metala do vanjske površine premaza i obrnuto, a zagrijana metalna površina omogućava bolju adheziju premaza zbog manje viskoznosti (slika 8). Dakle, dolazi do bržeg prijenosa otapala prema van čime se smanjuje mogućnost zaostataka istog na površini metala, što može uzrokovati odvajanje premaza od metalne podloge te početak korozijskog procesa.



Slika 8. Sušenje premaza pomoću IC zračenja

Ova metoda sušenja premaza koristi se za sušenje premaza na površinama metalnih konstrukcija u svrhu površinske zaštite takvih konstrukcija.

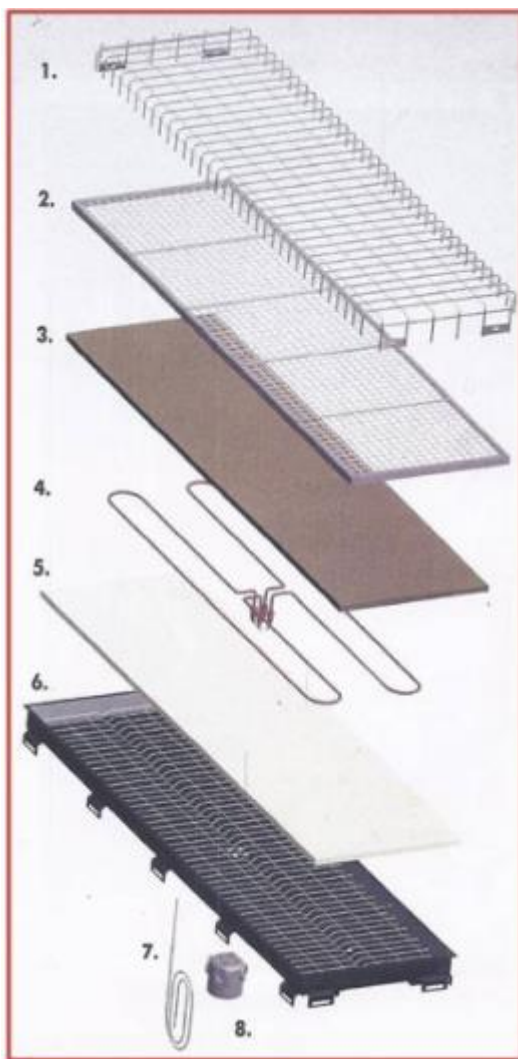
Glavna prednost konvektivskog sušenja naspram sušenja radijacijom je ta što je sušenjem radijacijom nemoguće doprijeti do mjesta koja nisu u radijusu emitera.

#### 2.5.2.2. Proces nastanka IC zračenja u katalitičkom IC emiteru

Katalitički IC emiter korišten je u Končaru – Metalne konstrukcije te je nabavljen od tvrtke Netek.

Do nastanka IC zračenja dolazi kada se spoje gorivo (plin), kisik iz zraka te katalizator. Katalizator treba zagrijati na minimalno 110 °C prije puštanja plina. Spreman je za rad kroz 10 min, kada se pomoću električne energije zagrije katalizator. Unos plina je dozvoljen nakon što se uređaj odspoji iz električne struje, nakon čega u roku 5 minuta potrebnih za stabilizaciju katalizatora dolazi do emisije IC zračenja koje je jednoliko raspodijeljeno po površini. Prilikom prolaska plina preko katalizatora, dolazi do egzotermne reakcije koja rezultira izgaranjem na temperaturama od 250 – 500 °C, što je ispod temperature plamena. Određena jakost zračenja može se kontrolirati pomoću ulaznog tlaka plina (optimalno između 3-30 mbar).





*Slika 9. Dijelovi IC emitera:*

- |   |                   |                           |                        |
|---|-------------------|---------------------------|------------------------|
| 1. Zaštitna mreža                                 | 2. Okvir s mrežom | 3. Nosač katalizatora     | 4. Električni elementi |
| 5. i 6. Elementi za ravnomjerno raspršenje goriva | 7. Termopar       | 8. Zaštitna kutija (ATEX) |                        |

IC emiter proizvodi infracrveno zračenje koje uzrokuje vrlo brzo sušenje i kemijsko umrežavanje (stvrđavanje) premaza uz vrlo malu potrošnju energije i smanjenu emisiju CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> i HOS-eva sa površina koje se suše. IC emiter prenosi toplinu kroz zrak izravno na svaku molekulu u premazu. Ima valnu duljinu zračenja od 2-10 μm. Valno područje apsorpcije organskih komponenata kao što su voda, epoksidi, poliesteri te ABS je 3-4 μm. Brže sušenje upravo je posljedica toga što se premaz suši i iznutra, odnosno od površine metala prema van, jer apsorbira IC zračenje u tom rasponu valnih duljina. Ovom tehnologijom proces sušenja premaza trebao bi se znatno ubrzati. IC grijalice mogu biti pogonjene električnom strujom (ugljični i wolframovi emiteri) ili se temelje na zagrijavanju keramičkih ploča sagorijevanjem plina.

### 2.5.2.3. Primjena IC zračenja

Sušenje pomoću IC zračenja pronašlo je veliku primjenu u industriji nanošenja boja i lakova, te u grafičkoj i tiskarskoj industriji. Na slici 10 prikazana je primjena IC zračenja u Končaru – Metalne konstrukcije, uglavnom za sušenje manjih dijelova.



*Slika 10 Primjena IC zračenja za sušenje premaza*

Isto tako, nezanemariva i česta je primjena u autoindustriji, gdje se grijalice ovog tipa koriste za sušenje organskih premaza raznih dijelova karoserije, naplataka, spremnika za gorivo, branika, ali i sitnijih dijelova (slika 11).



*Slika 11. IC sušenje premaza automobila*

## 2.6. Tehnike karakterizacije i ispitivanja svojstava premaza

### 2.6.1. Elektrokemijska impedancijska spektroskopija (EIS)

Mjerenja elektrokemijske impedancijske spektroskopije u skladu su s normom EN ISO 16773, dijelovi 1 do 4.

Pri proučavanju elektrokemijskih procesa koriste se metode temeljene na istosmjernoj struji, DC-tehnike (DC – eng. direct current), i metode temeljene na izmjeničnoj struji, AC-tehnike (AC – eng. alternating current) [11]. Najbitnija razlika između ovih tehnika je što DC-tehnike spadaju u destruktivne metode, dok su AC-tehnike nedestruktivne. DC-tehnike se većinom zasnivaju na polarizaciji u širokom području potencijala, prilikom koje dolazi do narušavanja ravnoteže sustava, što ima za posljedicu promjenu stanja površine elektrode i njene okoline. Zato ove tehnike spadaju u destruktivne metode. Kod impedancijske spektroskopije ne dolazi do narušavanja ravnoteže sustava, pa se EIS-u daje prednost pri istraživanju elektrokemijskih reakcija na granici faza. Metoda se zasniva na odzivu strujnog kruga na izmjenični napon ili struju kao funkciju frekvencije. Budući da metoda ne uključuje linearnu promjenu potencijala, moguća su mjerenja u otopinama male vodljivosti, u kojima su primjenom DC-tehnika moguće ozbiljne pogreške pri kontroli potencijala.

#### Teorija tehnika koje koriste izmjeničnu struju

U slučaju AC teorije potencijal nije konstantan, odnosno frekvencija nije jednaka nuli. Razmotrimo sinusno promjenjiv potencijal:

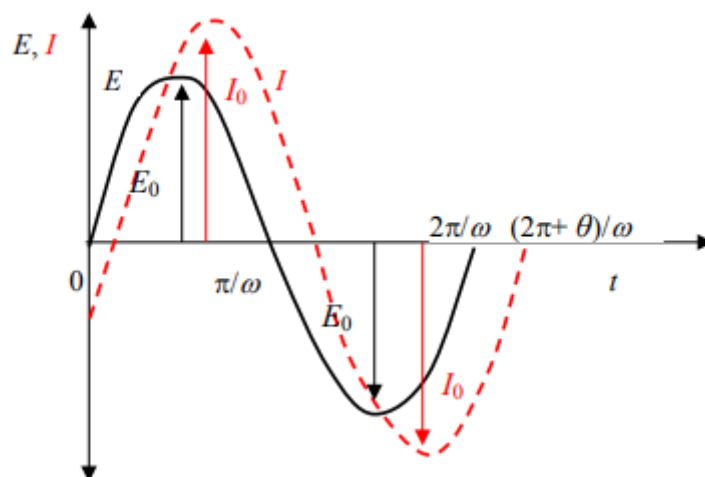
$$E(t) = E_0 \cdot \sin\omega t \quad (1)$$

gdje je:  $E(t)$  – trenutni potencijal u bilo kojem vremenu  $t$ , V,

$E_0$  – amplituda, V,

$\omega$  – kutna frekvencija,  $\omega = 2\pi f$ , Hz,

$f$  – frekvencija, Hz.



Slika 12. Narinuti potencijal i odziv struje u ovisnosti o vremenu u AC teoriji (kod  $f \neq 0$ )

Rezultirajuća struja je također sinusnog oblika:

$$I(t) = I_0 \cdot \sin(\omega t + \theta) \quad (2)$$

gdje je:  $I(t)$  – trenutna struja u bilo kojem vremenu  $t$ , A,

$I_0$  – amplituda, A,

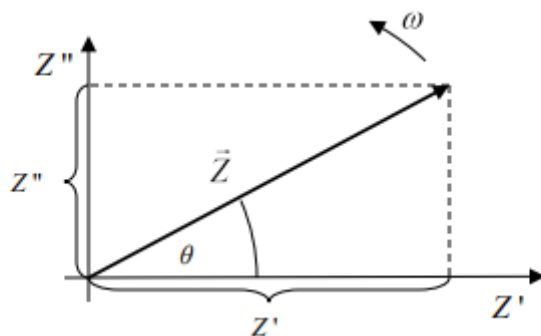
$\theta$  – fazni kut, s-1 .

U slučaju AC strujnog kruga protok elektrona mogu sprečavati spora elektrodna kinetika, sporo odvijanje kemijske reakcije i difuzija, odn. otpornički, kapacitivni i induktivni elementi u sustavu. Analogna jednačba Ohmovom zakonu koja vrijedi za AC strujni krug jest:

$$\Delta E = \Delta I \cdot Z \quad (3)$$

gdje je  $Z$  impedancija ili kompleksan otpor,  $\Omega$ .

Impedanciju ne možemo potpuno odrediti realnim brojem, već je potrebno odrediti više različitih veličina (otpor, kapacitet i induktivitet) što znači da je ona vektorska veličina. Zbog toga je u slučaju numeričke analize običaj prikazivati impedanciju u kompleksnoj ili Gaussovoj ravnini pomoću njezine realne ( $Z'$ ) i imaginarne ( $Z''$ ) komponente (slika 13).



Slika 13. Vektor  $Z$  opisan realnim ( $Z'$ ) i imaginarnim ( $Z''$ ) koordinatama

Ako se uvede imaginarna jedinica  $j = \sqrt{-1}$ , koja se uvodi u slučaju jednačbi koje se ne mogu riješiti u polju realnih brojeva, realna i imaginarna komponenta impedancije se mogu predstaviti u jednačbi:

$$Z = \frac{E(\omega)}{I(\omega)} = Z'(\omega) + jZ''(\omega) \quad (4)$$

Prema slici apsolutna vrijednost impedancije (dužina vektora  $Z$ ) jest:

$$|Z| = \sqrt{Z'^2 + Z''^2} \quad (5)$$

A fazni kut je:

$$\tan \theta = \frac{Z''}{Z'} \quad (6)$$

### ***Impedancijski prikazi***

Metoda EIS se temelji na mjerenju impedancije u širokom spektru frekvencija sinusoidnog signala, obično od 100 kHz do 10 mHz. Nakon završenog eksperimenta dobiveni podaci mogu se prikazati u različitim oblicima.

- Nyquistov prikaz

Nyquistov prikaz impedancijskog spektra predstavlja ovisnost imaginarne komponente impedancije  $Z''$  u odnosu na realnu komponentu  $Z'$  za svaku pobudnu frekvenciju.

- Bodeov prikaz

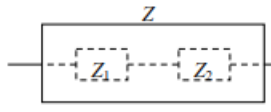
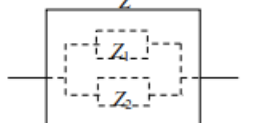
Bodeov prikaz je drugi način prikazivanja impedancijskih spektara koji prikazuje ovisnost logaritma apsolutne vrijednosti impedancije  $|Z|$  i faznog kuta  $\varphi$ , o logaritmu frekvencije  $f$ .

### *Analiza impedancijskih odziva*

Elektrokemijska ćelija se može prikazati električnim modelom. Elektrokemijska reakcija koja se odvija na elektrodnoj površini analogna je električnom krugu koji se sastoji od otpora i kondenzatora.


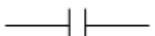


Za određivanje ukupne impedancije koja je kombinacija različitih elemenata koji pružaju otpor protoku elektrona treba kombinirati impedancijske vrijednosti. Ako su u strujnom krugu dva impedancijska elementa spojena u seriju kroz njih teče struja iste jačine, ali se javlja različiti pad napona. Ako su u strujnom krugu dva elementa spojena u paralelu imaju isti potencijal, ali kroz njih teče različita struja. U tim slučajevima vrijede jednakosti prikazane u tablici 5.

*Tablica 5. Serijski i paralelni spoj impedancijskih vrijednosti*

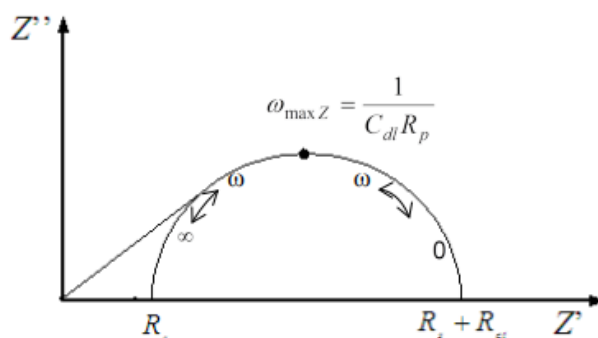
|                       | <b>Ekvivalentni krug</b>  | <b>Ukupna impedancija</b>                     |
|-----------------------|---|---|
| <i>Serijski spoj</i>  |  | $Z = Z_1 + Z_2$                               |
| <i>Paralelni spoj</i> |  | $\frac{1}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}$ |

Ako razmatramo prisutnost otpora i kapaciteta u modelu onda su u tablici 6 prikazani osnovni elementi ekvivalentnog kruga i njihove impedancijske relacije.

Tablica 6. Osnovni elementi ekvivalentnog kruga i njihove impedancijske relacije

| Element ekvivalentnog kruga   | Impedancijske relacije  |
|---|---|
|  | $Z = R + 0j \quad j = \sqrt{-1}$  |
|  | $Z = 0 - \frac{j}{\omega C} \quad \omega = 2\pi f$                                |
|  | $Z = R - \frac{j}{\omega C}$  |
|  | $Z = \frac{R}{1 + \omega^2 C^2 R^2} - \frac{j\omega C R^2}{1 + \omega^2 C^2 R^2}$ |

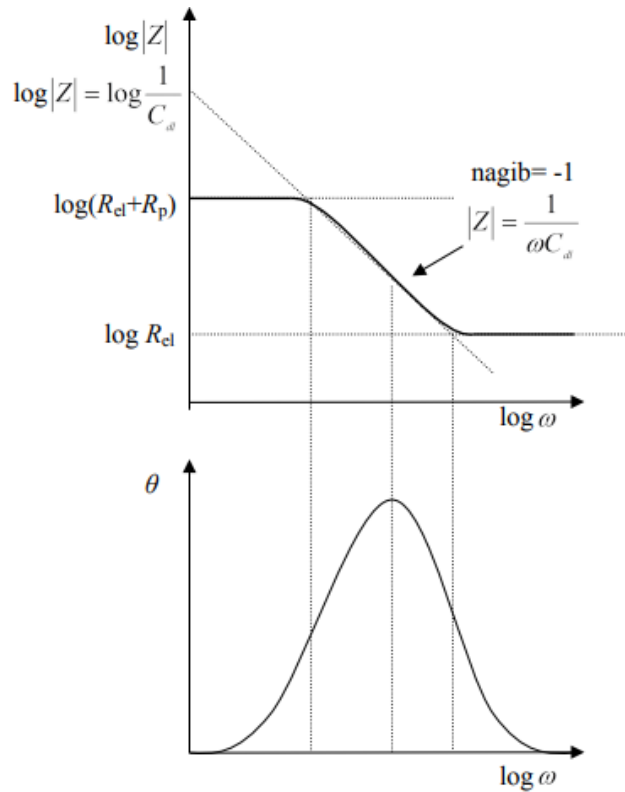
Na slici 14 prikazan je Nyquistov dijagram za jednostavni elektrokemijski sustav.



Slika 14. Nyquistov dijagram za jednostavni elektrokemijski sistem

Iz prikaza se vidi da je na najvišim frekvencijama impedancija uvjetovana Ohmskim otporom tj. otporom elektrolita,  $R_{el}$ . Na najvišim frekvencijama (gdje lijeva strana polukruga siječe os x) nalazi se otpor elektrolita,  $R_{el}$  a kod najnižih frekvencija (gdje desna strana polukruga siječe os x) nalazi se polarizacijski otpor,  $R_p$ , odn. zbroj  $R_{el} + R_p$ . U većini slučajeva polarizacijski otpor se dobiva ekstrapolacijom kapacitivne petlje na realnu os.

Na slici 15 prikazan je Bodeov dijagram za jednostavni elektrokemijski sustav.



Slika15. Bodeov dijagram za jednostavan elektrokemijski sustav

Kod najviših frekvencija otpor elektrolita je dominantna komponenta i  $\log R_{el}$  se može očitati iz visokog frekvencijskog platoa. Pri najnižim frekvencijama dominira polarizacijski otpor i može se očitati iz niskog frekvencijskog platoa kao  $\log(R_{el} + R_p)$ .

Pri srednjim frekvencijama krivulja bi trebala biti pravac s nagibom -1. Ekstrapolacijom ovog pravca na os  $\log|Z|$  kod  $\omega = 1$ , odn.  $\log\omega = 0$ ,  $f = 0,16$  Hz, dolazi se do vrijednosti kapaciteta dvosloja jer u sjecištu vrijedi:

$$\log|Z| = \log\frac{1}{C_{dl}} \quad (7)$$

U ovom slučaju fazni kut prema  $\log\omega$  daje maksimum pri:

$$\omega_{(\theta = \max)} = \sqrt{\frac{1}{C_{dl} R_p} \left(1 + \frac{R_p}{R_{el}}\right)}$$

Važno je napomenuti da ove frekvencije maksimuma nisu iste kao frekvencije maksimuma u Nyquistovom prikazu.

Gustoća korozijske struje određuje se, iz podataka o vrijednosti polarizacijskog otpora, na isti način kao i kod DC-tehnike pomoću jednadžbe:

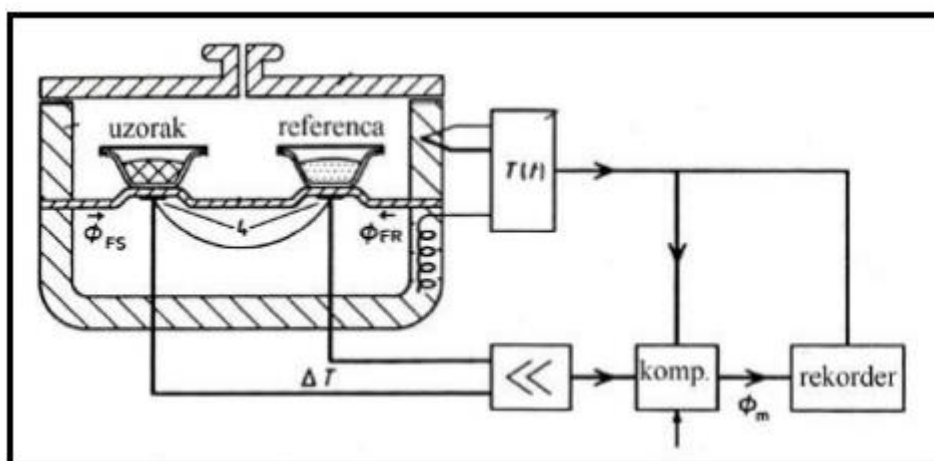


$$j_{kor} = \frac{B}{Rp} \quad (8)$$

## 2.6.2. Diferencijalna pretražna kalorimetrija (DSC)

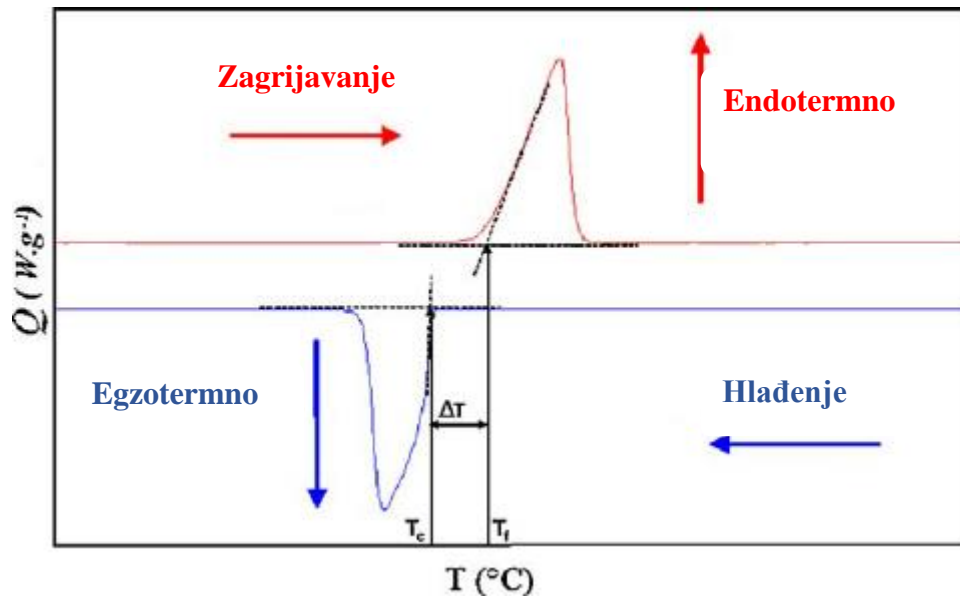
Diferencijalna pretražna kalorimetrija (DSC) je vrlo često korištena tehnika za ispitivanje toplinskih svojstva polimernih materijala odnosno tehnika toplinske analize koja mjeri razliku toplinskog toka u funkciji temperature ili vremena. Atmosfera oko uzorka je strogo kontrolirana (inertan dušik ili helij), a brzina zagrijavanja odnosno hlađenja je konstantna.

Princip rada DSC-a: u DSC uređaj (slika 16) se na jednu stranu grijača stavi Al-posudica s uzorkom (eng. sample pan), a na drugi grijač prazna Al-posudica, referentna (eng. reference pan). Tijekom mjerenja, temperature obje posudice moraju biti iste. Prirodno, treba dovesti više energije da bi se temperatura posudice s uzorkom održala istom kao i u referentnoj posudici. Stvara se razlika toplinskih tokova (eng. heat flux) između dvije posudice. Upravo je ta razlika toplinskih tokova veličina koju mjeri DSC [12].



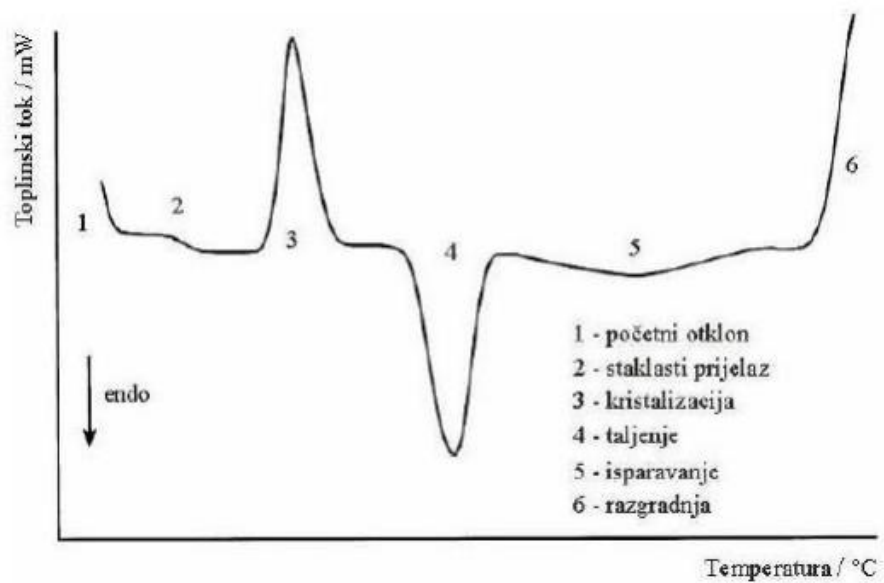
Slika 16. Shema DSC komore [12]

Količina razvijene topline u vremenu predstavlja toplinski tok, dok je porast temperature kroz vrijeme brzina zagrijavanja. Odnos između toplinskog toka i brzine zagrijavanja predstavlja specifični toplinski kapacitet uzorka (slika 17).



Slika 17. Odnos između toplinskog toka i brzine zagrijavanja

Linija na slici 18 predstavlja razliku toplinskog kapaciteta između referentne posudice i posudice s uzorkom. Toplinski kapacitet prazne aluminijske posudice prikazan je ravnom linijom, dok prijelazi predstavljaju toplinski kapacitet ispitivanog materijala. Svi prijelazi rezultat su utrošene topline potrebne da se posudice održe na istim temperaturama. Kod polimernih materijala na DSC termogramu razlikujemo barem tri fazna prijelaza. Prijelaz iz staklastog u viskoelastično stanje naziva se temperatura staklastog prijelaza ili staklište ( $T_g$ ) (eng. glass transition), a temperatura taljenja ili talište ( $T_m$ ) (eng. melting point) predstavlja fazni prijelaz kod kojeg dolazi do taljenja kristalne faze, dok je temperatura kristalizacije ili kristalište, ( $T_c$ ) (eng. crystallization point) obratan prijelaz iz taljevine u kristalnu fazu.



Slika 18. Opći oblik DSC termograma

## 3. EKSPERIMENTALNI DIO

### 3.1. Priprema uzoraka

U eksperimentalnom dijelu rada testirani su premazi na bazi otapala proizvođača Hempel na čeličnim uzorcima debljine 6 mm, dimenzija 15 x 10 mm, pri čemu su provedene 3 vrste ispitivanja.

Premazi su nanoseni i sušeni u tvrtki KONČAR - Metalne konstrukcije. Ispitan je otpor premaza pomoću impedancije (ISO 16773, dijelovi 1 do 4), toplinska svojstva premaza i prionjivost (ISO 4624), i otpornost premaza prema koroziji u agresivnim uvjetima u slanoj (ISO 9227) i vlažnoj komori (ISO 6270-2).

#### Zadatak A

Premazi kao sustav zaštite za korozivnu sredinu *offshore* nanoseni su prema standardu Norsok 501. Uspoređivala se kvaliteta istog sustava premaza sušenog na sobnoj temperaturi te sušenog pomoću IC tehnologije sušenja, prema standardu ISO 12944 – 6.

Nanošenje sustava od 2K epoksida bogatim cinkom kao temelja, 2K epoksida kao međusloja te 2K poliuretana kao završnog sloja.

Testiranje uzoraka na udaljenosti 40 cm od izvora IC zračenja, te izrada nulte probe (sušenje na sobnim uvjetima) sa istim sustavom premaza jednake debljine, radi usporedbe ta dva načina sušenja.

#### Zadatak B

Nanošenje sustava od dva sloja 2K otapalnog epoksidnog premaza približno jednake ukupne debljine, na način da interval između nanošenja ta dva sloja iznosi 15 minuta (tehnika „mokra na mokro“), nakon čega slijedi sušenje pomoću IC zračenja.

Testiranje uzoraka na udaljenostima 40, 60, 80 i 100 cm od izvora IC zračenja u svrhu određivanja utjecaja udaljenosti uzorka od izvora IC zračenja na brzinu sušenja premaza.

Izrada nulte probe (sušenje na sobnim uvjetima) sa istim sustavom premaza jednake debljine, radi usporedbe ta dva načina sušenja.

### Zadatak C

Slično kao u prethodnom zadatku, nanošenje dva sloja 2K otapalnog epoksidnog premaza. Razlika od zadatka B je u tome što se svaki od slojeva zasebno suši IC zračenjem.

Testiranje uzoraka na udaljenostima od 40, 60, 80 i 100 cm od izvora IC zračenja. Cilj je pokazati kako udaljenost od izvora zračenja utječe na brzinu sušenja premaza, te utvrđivanje da li je isplativije sušenje na način B ili C.

Također izrada nulte probe (sušenje na sobnim uvjetima) sa istim sustavom premaza jednake debljine, radi usporedbe ta dva načina sušenja.

Sve ispitivanja (zadatak B i C) odrađena su prema sustavu A (za uvjete *offshore* prema preporuci proizvođača), a prema planu aktivnosti (tablice 7, 8, 9). Ispitivanja su provedena na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije te na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

## Plan aktivnosti

Tablica 7. Priprema površine prije aplikacije boje

| STAVKA                                     | METODA                       | KRITERIJ PRIHVATLJIVOSTI                 |
|--|------------------------------|--|
| bravarski/zavarski izgled prije sačmarenja | ISO 8501-3                   | bez defekta                              |
| test prašine                               | ISO 8502-3                   | max 2                                    |
| ulje, masnoće, prašina                     | /                            | bez tragova nečistoća                    |
| test soli                                  | ISO 8502-6                   | 30 mg/m <sup>2</sup> NaCl                |
| čistoća                                    | ISO 8501-1                   | Sa 2,5<br>(unutarnje i vanjske površine) |
| hrapavost                                  | ISO 8503-1<br>comparator (G) | M  |
| br/zav izgled nakon sačmarenja             | ISO 8501-3                   | bez defekta                              |

Tablica 8. Aplikacija boje

| STAVKA               | KRITERIJ PRIHVATLJIVOSTI  |
|----------------------|---------------------------|
| sustav (A)           | bez defekta<br>max 300 µm |
| 2 x Mastic ( B i C ) | bez defekta<br>max 300 µm |

Tablica 9. Opći zahtjevi prema ISO 12944 - 6

| STAVKA   | METODA  | KRITERIJ PRIHVATLJIVOSTI              |
|--|---|---------------------------------------|
| mikroklimatski uvjeti  | mjerenje<br>T okoline, T<br>čelika, RH i T<br>rosišta | 3 °C iznad T rosišta<br>max % rh = 85 |
| adhezija prije izlaganja komorama                                    | ISO 4624  | min 5 MPa                             |
| adhezija nakon izlaganja vlažnoj komori<br>( ISO 6270-2; 720 h )     | ISO 4624  | min 5 MPa                             |
| adhezija nakon izlaganja slanoj komori<br>komori ( ISO 9227; 1440h ) | ISO 4624  | min 5 MPa                             |

### 3.2. Uvjeti mjerenja

Prije nanošenja premaza na uzorke, sukladno normi HRN EN ISO 8502-4, ispitani su klimatski uvjeti u blizini pripremljene površine pomoću uređaja Elcometer 319 (slika 19). Mjerenjem je utvrđen iznos relativne vlažnosti zraka  $RH = 50 \%$ , temperature zraka  $T_a = 24 \text{ }^\circ\text{C}$  te temperature rosišta  $T_d = 14,4 \text{ }^\circ\text{C}$ .



*Slika 19. Ispitivanje klimatskih uvjeta pomoću uređaja Elcometer 319*

Naneseni premazi su dvokomponentni, a omjer veziva i umreživača propisan je u tehničkoj specifikaciji pojedinog premaza.



### 3.3. Mehanička predobrada čelične površine

Uzorke dimenzija 10 x 15 cm te debljine lima 6 mm, potrebno je prije nanošenja premaza osaćmariti. Za tu svrhu koristi se čelična sačma granulacije GH 25 i GH 40, pri čemu GH predstavlja sačmu najveće tvrdoće (slika 20), a brojčana vrijednost označava dimenziju zrna sačme.



*Slika 20. Alat za sačmarenje čelične površine*

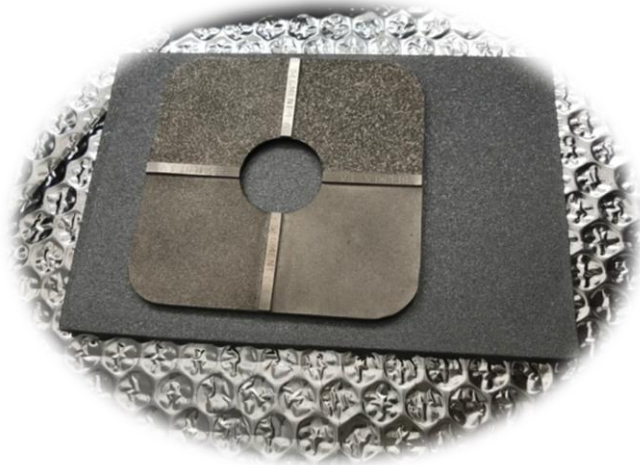
### 3.4. Određivanje čistoće površine nakon sačmarenja

Nakon sačmarenja određena je čistoća površine čelika. Prema standardu ISO 8501-1, koristi se knjiga u kojoj se nalaze prikazi čistoće površine, te je vizualnom usporedbom sa čeličnom površinom utvrđena čistoća površine Sa3.0 i kategorija lima B.

### 3.5. Test hrapavosti površine

Nakon određivanja čistoće površine, napravljen je test hrapavosti tako osaćmarene površine čelika prema standardu ISO 8503-1, pri čemu postoje tri kategorije hrapavosti: „fine“ „medium“ i „coarse“. Sukladno normi, izvršena je metoda stupnjevanja profila površine čelika čišćenog mlazom abraziva - postupak s komparatorom oznake G zbog korištenja lomljene oštroidne sačme (slika 21).

Prema standardu ISO 19840 u obzir se uzima i faktor hrapavosti površine prilikom određivanja debljine suhog filma. Dobivena vrijednost je zbog granulacije sačme „medium“ što odgovara faktoru korekcije od -25  $\mu\text{m}$ .



*Slika 21. Određivanje hrapavosti površine pomoću uređaja Elcometar grit*

*Tablica 10. Segmenti definirani standardom ISO 8503-1*

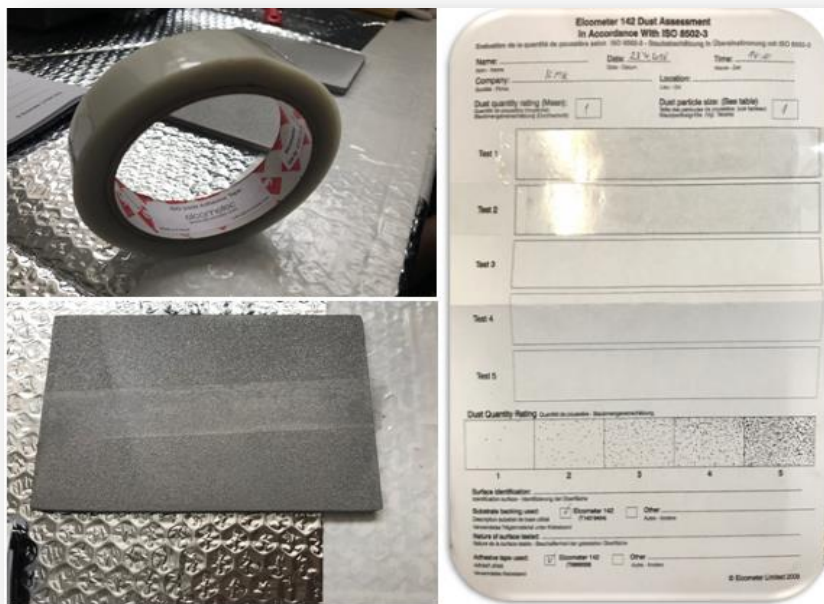
| Segment  | Nominalno čitanje<br>Ry5 ( $\mu\text{m}$ ) | Tolerancija ( $\mu\text{m}$ ) |
|----------|--|-------------------------------|
| 1        | 25   | 3                             |
| <b>2</b> | <b>60</b>                                  | <b>10</b>                     |
| 3        | 100  | 15                            |
| 4        | 150  | 20                            |

*Tablica 11. Profili hrapavosti površine [13]*

|                   |   |
|-------------------|---|
| Fine (G)          | Profil jednak segmentu 1 i više, ali ne uključuje segment 2.        |
| <b>Medium (G)</b> | <b>Profil jednak segmentu 2 i više, ali ne uključuje segment 3.</b> |
| Coarse (G)        | Profil jednak segmentu 3 i više, ali ne uključuje segment 4.        |

### 3.6. Test prašine

Test prašine proveden je prema standardu ISO 8502-3 te je namijenjen određivanju količine prašine nakon sačmarenja čelične površine stupnja korozije A, B ili C. Metoda nije pogodna za metale stupnja korozije D, jer traka nije dovoljno elastična da uđe u pore čelika. Test se provodi na način da se komad ljepljive trake zalijepi za površinu čelične pločice te odlijepi, nakon čega slijedi vizualna usporedba prašine na traci sa prikazima kategorijama prašine iz standardiziranog izvješća o prašini [13].



Slika 13. Test prašine

Ovim testom određena je količina prašine kategorije 1, te veličina čestica prašine kategorije 1 (slika 22).

### 3.7. Bresle test

Bresle test je test slanosti površine kojim se određuje količina odnosno koncentracija topljivih soli na prethodno osaćmarenom metalu, prema standardu ISO 8502- 6 i ISO 8502 - 9 [13]. Maksimalnu količinu soli na površini metala prije nanošenja premaza određuje ili proizvođač premaza ili kupac.

U tu je svrhu na površinu čelika zalijepljen pamučni okvir, unutar kojeg se špricom unese 3 ml destilirane vode poznate vodljivosti. Nakon par minuta, otopina se pokupi špricom te se uzorkuje i pomoću uređaja Horiba prikazanog na slici 23 određuje vodljivost otopine odnosno koncentracija soli izražena u  $\text{mg}/\text{cm}^2$  NaCl.



*Slika 23. Određivanje slanosti površine*

### 3.8. Nanošenje i mjerenje debljine mokrog filma nanesenog premaza

Nakon predobrade čelične površine, potrebno je zamiješati boju odnosno određeni omjer baze, umreživača te razrjeđivača (slika 24), prema tehničkoj specifikaciji pojedinog proizvoda [14].



*Slika 24. Priprema dvokomponentnog premaza*



Na slici 25 prikazano je nanošenje premaza pomoću zračnog pištolja.



*Slika 25. Nanošenje premaza zračnim pištoljem u tvrtki Končar – Metalne konstrukcije*

Debljina mokrog filma određuje da li će boja biti nanosena u odgovarajućoj debljini. Potrebno ju je odrediti ubrzo nakon nanošenja premaza, odnosno prije nego što previše otapala ispari iz boje.

Ukoliko je potrebno postići određenu debljinu suhog filma, prilikom nanošenja premaza je nužno očitati odgovarajuću debljinu mokrog filma, te iz te vrijednosti, postotka potrebnog razrjeđivača i volumena suhe tvari, izračunati debljinu suhog filma, prema formuli:

$$DMF = DSF \times \frac{(100 + \% \text{ razrjeđivača})}{Vst} \quad (9)$$

Preporučena debljina suhog i mokrog filma obično je dana od strane proizvođača premaza, u tehničkoj informaciji određenog proizvoda.

Debljina sloja bitna je za zaštitno djelovanje premaza te je uzeta iz tehničke specifikacije proizvoda. Pretanki sloj zbog moguće poroznosti ili nedovoljne pokrivenosti površine najčešće ne daje zadovoljavajuće zaštitno djelovanje dok predebeli sloj može dovesti do pojave curenja, sporog sušenja premaza te do toga da otapalo ostane zarobljeno u filmu, čime

se svojstva premaza bitno narušavaju. Iz tog razloga potrebno je izvršiti mjerenje debljine premaza. Korozijska otpornost kod većine prevlaka raste povećanjem debljine, ali također rastu i proizvodni troškovi pa je stoga poznavanje minimalne zaštitne vrijednosti potrebno iz ekonomskih razloga.

Sukladno normi HRN EN ISO 2808 provedeno je mjerenje debljine mokrog i suhog filma premaza na svim uzorcima prije korozijskih ispitivanja. Za kontrolu debljine mokrog filma boje primjenjuje se instrument lakirerski češalj koji po stranicama ima redove zubaca s rastućim razmacima od zamišljene površine. Sa zupca na kojemu je vidljiv otisak boje nakon pritiska instrumenta u svjež premaz, očita se visina razmaka koja označuje debljinu mokrog filma boje (slika 26).



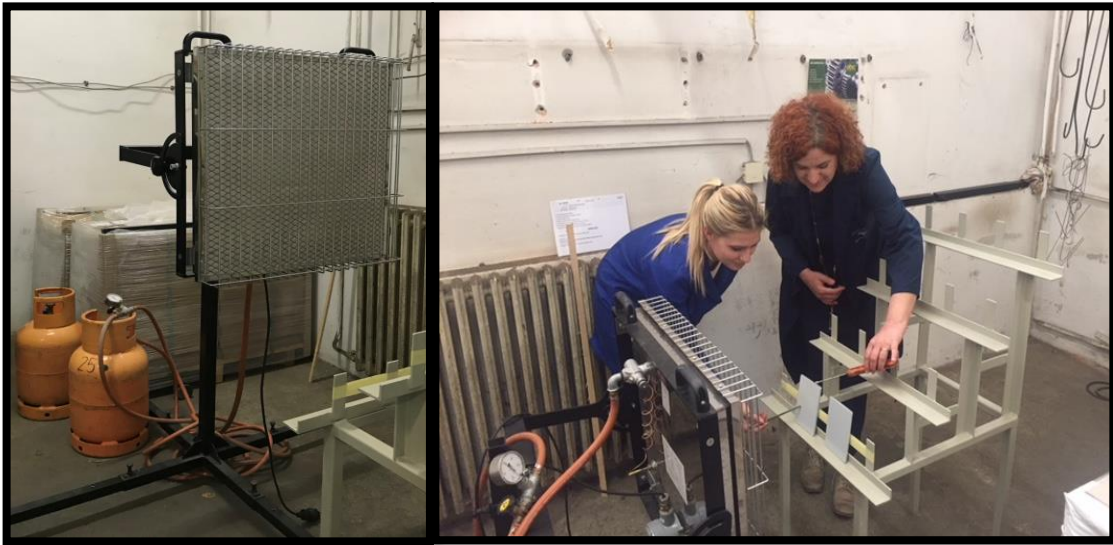
*Slika 26. Mjerenje debljine mokrog filma premaza (DMF) češljem*

Provedeno je po 10 mjerenja debljine suhog filma za svaki uzorak uređajem Elcometer 456.

### 3.9. Sušenje premaza IC tehnologijom te mjerenje debljine suhog filma

U ovom radu za potrebe ispitivanja korišten je katalitički IC emiter, prikazan na slici 27.

Končar – Metalne konstrukcije provodi eksperimentalnu fazu primjene pomoću jedne lampe, a u svrhu donošenja odluke o gradnji IC sušare.



*Slika 27. Katalitički IC emiter*

#### Karakteristike uređaja:

- ❖ Dimenzije: 60 x 60 cm
- ❖ Snaga: 6 kW
- ❖ Gorivo: prirodni plin ili propan/butan
- ❖ Potrošnja plina: 0,45 kg/h
- ❖ Broj radnih sati: 20.000 h
- ❖ Valna duljina zračenja: 2 – 10  $\mu\text{m}$
- ❖ „ATEX“ i „CE“ oznaka IC emitera

Za mjerenje debljine suhog filma korišten je uređaj Elcometar 456 prema normi HRN EN ISO 2808.





*Slika 28. Određivanje DSF pomoću uređaja Elcometar 456*

### 3.10. Metode karakterizacije i određivanja svojstava premaza

#### 3.10.1. Ispitivanje u vlažnoj komori

Ispitivanje uzoraka u vlažnoj komori provođeno je prema normi HRN EN ISO 6270-2 u Laboratoriju za zaštitu materijala na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, pomoću uređaja Humidity cabinet model AB6 prikazanog na slici 29. Temperatura ispitivanja je iznosila  $40 \pm 3^{\circ}\text{C}$ , a relativna vlažnost zraka 100 %. Da bi zadovoljio kategoriju korozivnosti C5-M *high*, prema standardu ISO 6270, premaz u komori mora izdržati 720 h.



*Slika 29. Vlažna komora*

### 3.10.2. Ispitivanje u slanoj komori

Ispitivanje uzoraka u slanoj komori provođeno je prema normi HRN ISO 9227. Da bi zadovoljio kategoriju korozivnosti C5-M *high*, prema standardu ISO 6270, premaz u komori mora izdržati 1440 h, no zbog kvara slane komore ispitivanje je trajalo 168h. Ispitivanje je provedeno u laboratoriju Zavoda za elektrokemiju, Fakulteta kemijskog inženjerstva i tehnologije u slanoj komori tvrtke CW Specialist Equipment model SF/100 (slika 30).



Slika 30. Slana komora SF/100 na Zavodu za elektrokemiju

Tablica 12. Parametri ispitivanja uzoraka u slanoj komori

| Parametri  | Vrijednosti parametara |
|--|------------------------|
| Vodena otopina NaCl, %                               | 5                      |
| Temperatura u slanoj komori, °C                      | 35±2                   |
| Tlak raspršivanja 5 % vodene otopine NaCl, bar       | 1                      |
| Temperatura raspršivanja 5 % vodene otopine NaCl, °C | 48                     |
| Protok 5 % vodene otopine NaCl, L/h                  | 0,2                    |
| pH 5 % vodene otopine NaCl                           | 6,5-7,2                |
| Vrijeme ispitivanja, sati                            | 168                    |

U slanu komoru stavljeno je ukupno 11 testnih pločica (slika 31).



*Slika 31. Testne pločice u slanoj komori prije početka ispitivanja (desna strana)*

### 3.10.3. Elektrokemijska impedancija spektroskopija

Elektrokemijsko impedancijsko ispitivanje sustava zaštitnih premaza provedeno je na Zavodu za elektrokemiju, Fakulteta kemijskog inženjerstva i tehnologije pomoću uređaja PalmSens<sup>4</sup> (slika 32) upravljanim pomoću računala i programa PSTrace.



Slika 32. Uređaj PalmSens<sup>4</sup>

Za impedancijsko ispitivanje korištene su dvije ugljikove elektrode presvučene vodljivim gelom od kojih je jedna elektroda predstavljala radnu, a druga je predstavljala referentnu i protuelektrodu.

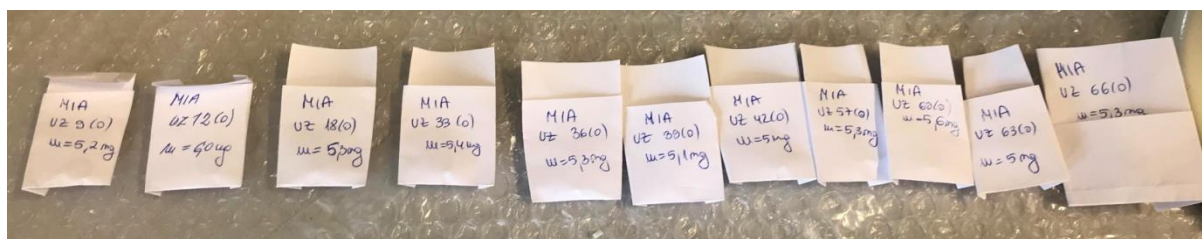
Prije provedbe elektrokemijske impedancije u programu PSTrace postavljeni su parametri prikazani u tablici 13.

Tablica 13. Parametri EIS ispitivanja

| Parametri                           | Vrijednosti parametara |
|-------------------------------------|------------------------|
| Površina elektrode, cm <sup>2</sup> | 16                     |
| Frekvencijski raspon, Hz            | 0,01-100000            |
| Točaka po dekadi                    | 10                     |
| E <sub>DC</sub> , V                 | 0                      |
| E <sub>AC</sub> , mV                | 50                     |

### 3.10.4. Diferencijalna pretražna kalorimetrija

Toplinska svojstva uzoraka određena su tehnikom DSC – a na instrumentu Mettler Toledo DSC 822e (slika 34). Uzorci premaza (5 - 6 mg) najprije su ohlađeni na 0°C, nakon 5 min zagrijani na 90°C, nakon 5 min ponovo ohlađeni na 0°C te nakon 5 min ponovo zagrijani na 90°C brzinom zagrijavanja od 20°C/min (tablica 14). Interval od 5 min između ciklusa hlađenja i grijanja potreban je da se „zaboravi“ toplinska povijest uzorka u postupku pripreve. Iz ova dva ciklusa dobivene su vrijednosti faznih prijelaza i entalpija prodiskutiranih u radu. Hlađenje na niske temperature provedeno je tekućim dušikom. Kroz cijeli eksperiment kao inertni plin korišten je dušik.



Slika 33. Priprema uzoraka za DSC analizu



Slika 34. Uređaj za DSC analizu

Tablica 14. Temperaturni parametri programa





| Parametar                         | Jedinica | Vrijednosti za uzorke |
|-----------------------------------|----------|-----------------------|
| Brzina promjene temperature       | °C/min   | 20                    |
| Polazna temperatura 1. ciklusa T1 | °C       | 0                     |
| Vrijeme na T1                     | min      | 5                     |
| Krajnja temperatura T2            | °C       | 90                    |
| Vrijeme na T2                     | min      | 5                     |
| Polazna temperatura 2. ciklusa T3 | °C       | 0                     |
| Vrijeme na T3                     | min      | 5                     |
| Krajnja temperatura 2. ciklusa T4 | °C       | 90                    |



### 3.10.5. Određivanje kvalitete premaza prema normi ISO 12944 - 6

Prema standardu ISO 12944 – 6 određena je kvaliteta premaza prema normi ISO 4624 metodom povlačenja premaza (*pull off test*), korištenjem uređaja Elcometer 108 [13], čime se određuje adhezija premaza nanesenog na podlogu. Odvajanje se događa na najslabijem dijelu sustava koji se sastoji od ispitnog čunjića, adheziva, sustava premaza i podloge. Za premaze sušene pomoću IC – a, ispitivanje je provedeno nakon 3 dana, dok je za premaze sušene na sobnoj temperaturi provedeno tjedan dana od nanošenja. Radno područje uređaja je od 0 do 25 MPa, a premaz će osigurati prolaznu ocjenu ako je iznos adhezije veći od 5 MPa.

Tablica 15. Postupak provođenja pull - off testa

|  |   |
|--|---|
|                            |    |
| <p>1. ravnomjerno nanošenje adheziva na čunjić</p>   | <p>2. lijepljenje čunjića na ispitnu podlogu i čekanje sušenja adheziva</p>   |
|                           |   |
| <p>3. uklanjanje viška stvrdnutog adheziva kako ispitna igla ne bi zapela u čunjiću prilikom ispitivanja</p> | <p>4. priključimo uređaj na ispitni valjak i okretanjem ručice u smjeru kazaljke na satu postupno povećavamo tlak sve dok ne dođe do odvajanja čunjića od podloge</p> |



## 4. REZULTATI I RASPRAVA

### 4.1. Rezultati Bresle testa prije aplikacije premaza

Ispitivanjem vodljivosti dobivena vrijednost destilirane vode iznosi 2  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , dok vodljivost uzorkovane otopine iznosi 25  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Za računanje koncentracije soli na površini, prema standardu ISO 8502 - 6 i ISO 8502 - 9, treba pomnožiti vrijednost očitane vodljivosti (u  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) sa odgovarajućim faktorom.

#### Račun

Vrijednost vodljivosti uzorkovane otopine sa površine metala, bez početne vrijednosti čiste destilirane vode iznosi:

$$25 \mu\text{S}/\text{cm} - 2 \mu\text{S}/\text{cm} = 23 \mu\text{S}/\text{cm}$$

Dobivenu vrijednost potrebno je pomnožiti sa faktorom 1,2, čime je koncentracija soli (NaCl) izražena u  $\text{mg}/\text{cm}^2$ :

$$23 \mu\text{S}/\text{cm} \times 1,2 = 27,6 \text{ mg}/\text{cm}^2 \text{ NaCl}$$

## 4.2. Izmjerene brzine sušenja premaza te debljine suhog filma

### Zadatak A

Sustav premaza: 2K epoksid obogaćen cinkom – 2K epoksid – 2K poliuretana (Hempel)

Izrađeno je 6 uzoraka istog sustava i približno jednake ukupne debljine premaza. Tri uzorka sušena su tehnologijom IC zračenja, radi ispitivanja svojstava prije, te nakon slane i klima komore. Svi slojevi premaza zasebno su sušeni IC tehnologijom. Ostala tri uzorka istog sustava sušena su na sobnoj temperaturi, radi usporedbe sa brzinom sušenja premaza pomoću IC-a. Izrađena su tri uzorka na sobnoj temperaturi zbog testiranja svojstava prije, te nakon slane i klima komore.

Tablica 16. Brzina sušenja premaza udaljenih 40 cm od izvora IC zračenja

| broj uzorka | Proizvod                | DSF ( $\mu\text{m}$ ) | vrijeme sušenja (min) | Ukupno vrijeme sušenja (min) |
|-------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------|
| 7           | Hempadur Avantguard 750 | 70                    | 10                    | 62                           |
|             | Hempadur Mastic 4588W   | 290                   | 25                    |                              |
|             | Hempathane HS 55610     | 332                   | 27                    |                              |
| 8           | Hempadur Avantguard 750 | 68                    | 10                    | 61                           |
|             | Hempadur Mastic 4588W   | 225                   | 25                    |                              |
|             | Hempathane HS 55610     | 287                   | 26                    |                              |
| 9           | Hempadur Avantguard 750 | 58                    | 10                    | 61                           |
|             | Hempadur Mastic 4588W   | 180                   | 25                    |                              |
|             | Hempathane HS 55610     | 240                   | 26                    |                              |

Vrijeme potrebno za sušenje istog sustava približne debljine suhog filma na sobnoj temperaturi, prema tehničkoj specifikaciji navedenih proizvoda, dostavljenoj od Hempela, navedeno je u tablici 17.

Tablica 17. Vrijeme potrebno za sušenje istog sustava premaza pri sobnoj temperaturi

| <b>BROJ UZORKA</b>            | <b>PROIZVOD</b>                | <b>VRIJEME SUŠENJA (min)</b> | <b>VRIJEME SUŠENJA (h)</b> |
|-------------------------------|--------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| <b>10, 11, 12</b>             | <b>Hempadur Avantguard 750</b> | 60                           | 1                          |
|                               | <b>Hempadur Mastic 4588W</b>   | 420                          | 7                          |
|                               | <b>Hempathane HS 55610</b>     | 360                          | 6                          |
| <b>UKUPNO VRIJEME SUŠENJA</b> |                                | <b>840</b>                   | <b>14</b>                  |

Tablica 18. Izmjerene debljine suhog filma premaza sušenih pri sobnoj temperaturi

| <b>broj uzorka</b> | <b>DSF (µm)</b> |
|--------------------|-----------------|
| <b>10</b>          | 289             |
| <b>11</b>          | 310             |
| <b>12</b>          | 269             |

Iz dobivenih rezultata može se zaključiti da je za sušenje sustava premaza pomoću tehnologije IC – a potrebno približno 60 min, dok je za sušenje istog sustava premaza približne debljine suhog filma na sobnoj temperaturi, potrebno 840 min, što čini bitnu razliku.

Ovdje nije uzeto u obzir vrijeme potrebno za nanošenje premaza.

## Zadatak B

Na 15 uzoraka nanese su po dva sloja 2K epoksidnog otapalnog premaza Hempadur Mastic 4588W uz međuslojni interval od 15 min tehnikom “mokro na mokro”. Tri uzorka sušena su na sobnoj temperaturi, a ostalih 12 uzoraka pomoću IC zračenja na udaljenostima 40, 60, 80 i 100 cm od izvora zračenja.

*Tablica 19. Brzina sušenja premaza na udaljenosti 40 cm od izvora IC zračenja*

| broj uzorka | Proizvod                  | DSF ( $\mu\text{m}$ ) | ukupno vrijeme sušenja (min) |
|-------------|---------------------------|-----------------------|------------------------------|
| 55          | 2 x Hempadur Mastic 4588W | 342                   | 35                           |
| 56          | 2 x Hempadur Mastic 4588W | 380                   | 35                           |
| 57          | 2 x Hempadur Mastic 4588W | 440                   | 45                           |

*Tablica 20. Brzina sušenja premaza na udaljenosti 60 cm od izvora IC zračenja*

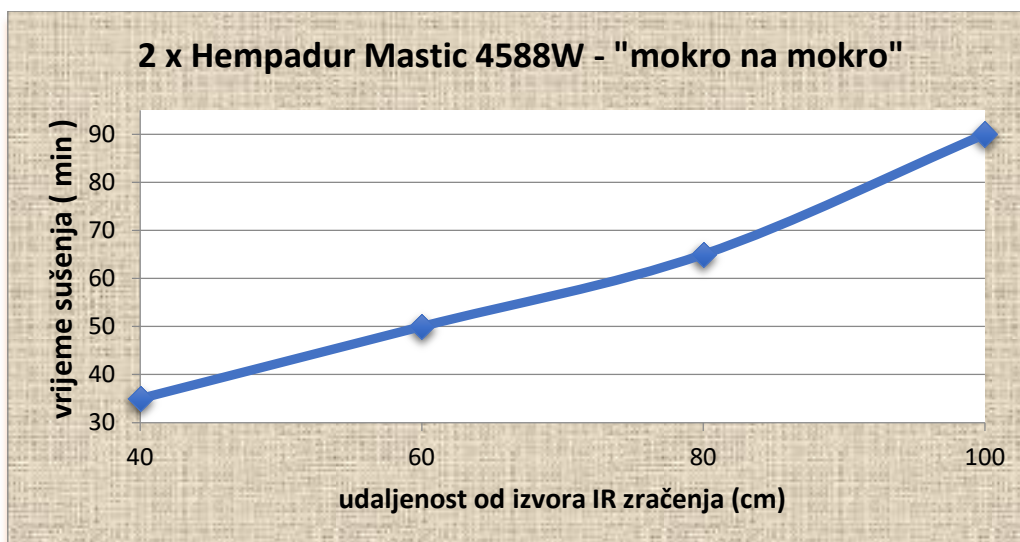
| broj uzorka | Proizvod                  | DSF ( $\mu\text{m}$ ) | ukupno vrijeme sušenja (min) |
|-------------|---------------------------|-----------------------|------------------------------|
| 58          | 2 x Hempadur Mastic 4588W | 400                   | 50                           |
| 59          | 2 x Hempadur Mastic 4588W | 345                   | 50                           |
| 60          | 2 x Hempadur Mastic 4588W | 321                   | 50                           |

Tablica 21. Brzina sušenja premaza na udaljenosti 80 cm od izvora IC zračenja

| broj uzorka | Proizvod                  | DSF ( $\mu\text{m}$ ) | ukupno vrijeme sušenja (min) |
|-------------|---------------------------|-----------------------|------------------------------|
| 61          | 2 x Hempadur Mastic 4588W | 382                   | 65                           |
| 62          | 2 x Hempadur Mastic 4588W | 416                   | 65                           |
| 63          | 2 x Hempadur Mastic 4588W | 370                   | 65                           |

Tablica 22. Brzina sušenja premaza na udaljenosti 100 cm od izvora IC zračenja

| broj uzorka | Proizvod                  | DSF ( $\mu\text{m}$ ) | ukupno vrijeme sušenja (min) |
|-------------|---------------------------|-----------------------|------------------------------|
| 64          | 2 x Hempadur Mastic 4588W | 375                   | 90                           |
| 65          | 2 x Hempadur Mastic 4588W | 330                   | 90                           |
| 66          | 2 x Hempadur Mastic 4588W | 367                   | 90                           |



*Graf 1. Utjecaj udaljenosti uzorka od izvora IC zračenja na brzinu sušenja premaza.*

Iz dobivenih rezultata vidljivo je da porastom udaljenosti uzoraka od izvora IC zračenja, raste i vrijeme sušenja premaza na tim uzorcima.

Vrijeme potrebno za sušenje oba sloja 2K epoksidnog premaza Hempadur Mastic 4588W ukupne debljine 300  $\mu\text{m}$  na sobnoj temperaturi, prema tehničkoj specifikaciji proizvoda, iznosi 14h, odnosno po 7h za svaki sloj (tablica 23).

*Tablica 23. Vrijeme potrebno za sušenje istog sustava premaza pri sobnoj temperaturi*

| <b>BROJ UZORKA</b> | <b>PROIZVOD</b>           | <b>VRIJEME SUŠENJA /h</b> |
|--------------------|---------------------------|---------------------------|
| <b>16, 17, 18</b>  | 1 x Hempadur Mastic 4588W | 7                         |
|                    | 1 x Hempadur Mastic 4588W | 7                         |
| <b>UKUPNO /h</b>   |                           | <b>14</b>                 |

Tablica 24. Izmjerene debljine suhog filma premaza sušenih pri sobnoj temperaturi

| broj uzorka | DSF ( $\mu\text{m}$ ) |
|-------------|-----------------------|
| 16          | 261                   |
| 17          | 257                   |
| 18          | 243                   |

Vrijeme sušenja premaza na sobnoj temperaturi traje dulje od vremena sušenja premaza pomoću IC tehnologije. Na sobnoj temperaturi, oba sloja suše se 14h, dok se pomoću IC tehnologije, na udaljenosti od 40 cm od izvora zračenja premaz suši oko 40 min. Na udaljenosti od 100 cm, vrijeme sušenja iznosi 90 min.

#### Zadatak C

Na 15 uzoraka nanosena su po dva sloja 2K epoksidnog otapalnog premaza Hempadur Mastic 4588W. 3 uzorka sušena su na sobnoj temperaturi, a ostalih 12 uzoraka pomoću IC zračenja na udaljenostima 40, 60, 80 i 100 cm od izvora zračenja, pri čemu je svaki sloj zasebno sušen pomoću IC zračenja.

Tablica 25. Brzina sušenja premaza na udaljenosti 40cm od izvora IC zračenja

| broj uzorka | Proizvod                  | DSF ( $\mu\text{m}$ ) | vrijeme /min |         | Ukupno vrijeme sušenja (min) |
|-------------|---------------------------|-----------------------|--------------|---------|------------------------------|
|             |                           |                       | 1. sloj      | 2. sloj |                              |
| 31          | 1 x Hempadur Mastic 4588W | 128                   | 27           | 36      | 63                           |
|             | 1 x Hempadur Mastic 4588W | 279                   |              |         |                              |
| 32          | 1 x Hempadur Mastic 4588W | 148                   | 27           | 30      | 57                           |
|             | 1 x Hempadur Mastic 4588W | 340                   |              |         |                              |
| 33          | 1 x Hempadur Mastic 4588W | 138                   | 27           | 33      | 60                           |
|             | 1 x Hempadur Mastic 4588W | 310                   |              |         |                              |

Tablica 26. Brzina sušenja premaza na udaljenosti 60 cm od izvora IC zračenja

| broj uzorka | Proizvod                  | DSF ( $\mu\text{m}$ ) | vrijeme /min |         | Ukupno vrijeme sušenja (min) |
|-------------|---------------------------|-----------------------|--------------|---------|------------------------------|
|             |                           |                       | 1. sloj      | 2. sloj |                              |
| 34          | 1 x Hempadur Mastic 4588W | 135                   | 36           | 28      | 64                           |
|             | 1 x Hempadur Mastic 4588W | 311                   |              |         |                              |
| 35          | 1 x Hempadur Mastic 4588W | 141                   | 36           | 28      | 64                           |
|             | 1 x Hempadur Mastic 4588W | 307                   |              |         |                              |
| 36          | 1 x Hempadur Mastic 4588W | 118                   | 36           | 28      | 64                           |
|             | 1 x Hempadur Mastic 4588W | 311                   |              |         |                              |

Tablica 27. Brzina sušenja premaza na udaljenosti 80 cm od izvora IC zračenja

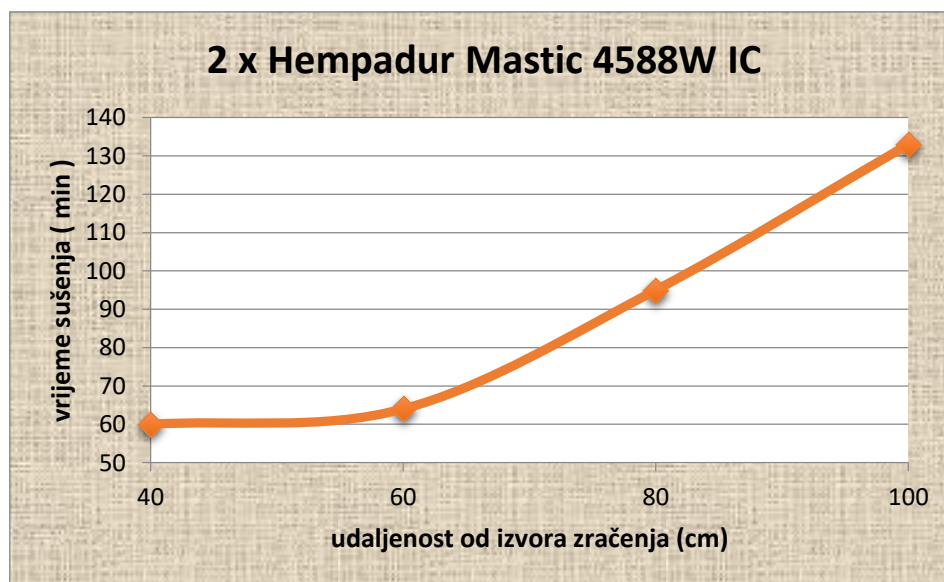
| broj uzorka | Proizvod                  | DSF ( $\mu\text{m}$ ) | vrijeme /min |         | Ukupno vrijeme sušenja (min) |
|-------------|---------------------------|-----------------------|--------------|---------|------------------------------|
|             |                           |                       | 1. sloj      | 2. sloj |                              |
| 37          | 1 x Hempadur Mastic 4588W | 138                   | 45           | 50      | 95                           |
|             | 1 x Hempadur Mastic 4588W | 303                   |              |         |                              |
| 38          | 1 x Hempadur Mastic 4588W | 120                   | 45           | 50      | 95                           |
|             | 1 x Hempadur Mastic 4588W | 322                   |              |         |                              |
| 39          | 1 x Hempadur Mastic 4588W | 96                    | 45           | 50      | 95                           |
|             | 1 x Hempadur Mastic 4588W | 319                   |              |         |                              |



Tablica 28. Brzina sušenja premaza na udaljenosti 100 cm od izvora IC zračenja

| broj uzorka | Proizvod                  | DSF ( $\mu\text{m}$ ) | vrijeme /min |         | Ukupno vrijeme sušenja (min) |
|-------------|---------------------------|-----------------------|--------------|---------|------------------------------|
|             |                           |                       | 1. sloj      | 2. sloj |                              |
| 40          | 1 x Hempadur Mastic 4588W | 68                    | 68           | 65      | 133                          |
|             | 1 x Hempadur Mastic 4588W | 275                   |              |         |                              |
| 41          | 1 x Hempadur Mastic 4588W | 130                   | 68           | 65      | 133                          |
|             | 1 x Hempadur Mastic 4588W | 269                   |              |         |                              |
| 42          | 1 x Hempadur Mastic 4588W | 144                   | 68           | 65      | 133                          |
|             | 1 x Hempadur Mastic 4588W | 321                   |              |         |                              |

Iz dobivenih rezultata, kao i u prethodnom primjeru, vidljivo je da porastom udaljenosti uzoraka od izvora IC zračenja, raste i vrijeme sušenja premaza na tim uzorcima (graf 2).



Graf 2. Utjecaj udaljenosti uzorka od izvora IC zračenja na brzinu sušenja premaza

Vrijeme potrebno za sušenje oba sloja 2K epoksidnog premaza Hempadur Mastic 4588W ukupne debljine 300  $\mu\text{m}$  na sobnoj temperaturi, prema tehničkoj specifikaciji proizvoda, iznosi 14h, odnosno po 7h za svaki sloj (tablica 29).

Tablica 29. Vrijeme potrebno za sušenje istog sustava premaza pri sobnoj temperaturi

| <b>BROJ UZORKA</b> | <b>PROIZVOD</b>              | <b>VRIJEME SUŠENJA /h</b> |
|--------------------|------------------------------|---------------------------|
| <b>16, 17, 18</b>  | 1 x Hempadur Mastic<br>4588W | 7                         |
|                    | 1 x Hempadur Mastic<br>4588W | 7                         |
| <b>UKUPNO /h</b>   |                              | <b>14</b>                 |

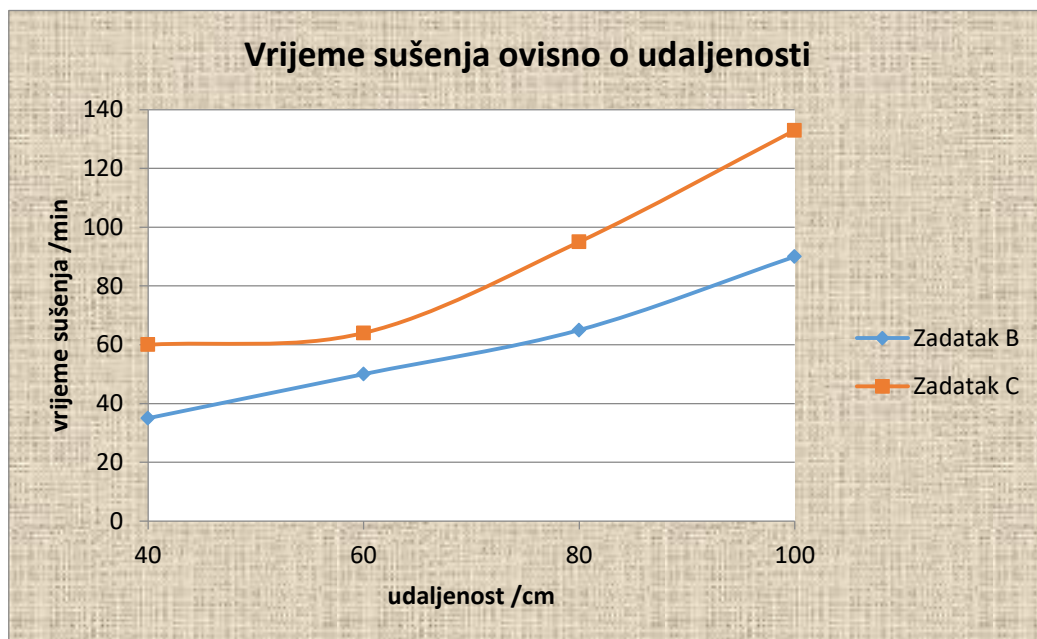
Tablica 30. Izmjerene debljine suhog filma premaza sušenih pri sobnoj temperaturi

| <b>broj uzorka</b> | <b>DSF (<math>\mu\text{m}</math>)</b> |
|--------------------|---------------------------------------|
| <b>16</b>          | 261                                   |
| <b>17</b>          | 257                                   |
| <b>18</b>          | 243                                   |

Vrijeme sušenja premaza na sobnoj temperaturi traje dulje od vremena sušenja premaza pomoću IC tehnologije. Na sobnoj temperaturi, oba sloja suše se 14h, dok se pomoću IC tehnologije, na udaljenosti od 40 cm od izvora zračenja premaz suši oko 60 min, a na udaljenosti od 100 cm, vrijeme sušenja iznosi 133 min.

Također, uspoređujući zadatak B (Hempadur Mastic 4588W “mokro na mokro”) i C (Hempadur Mastic 4588W IC), za zadatak B ukupno vrijeme sušenja dva sloja na udaljenosti 40 cm od izvora IC zračenja iznosi 35 min, dok za zadatak C oko 60 min (graf 3), iz čega se

može zaključiti da je bolje nakon nanošenja prvog sloja napraviti *flash off* od 15 min te odmah nanijeti 2. sloj, bez zračenja 1. sloja IC tehnologijom.



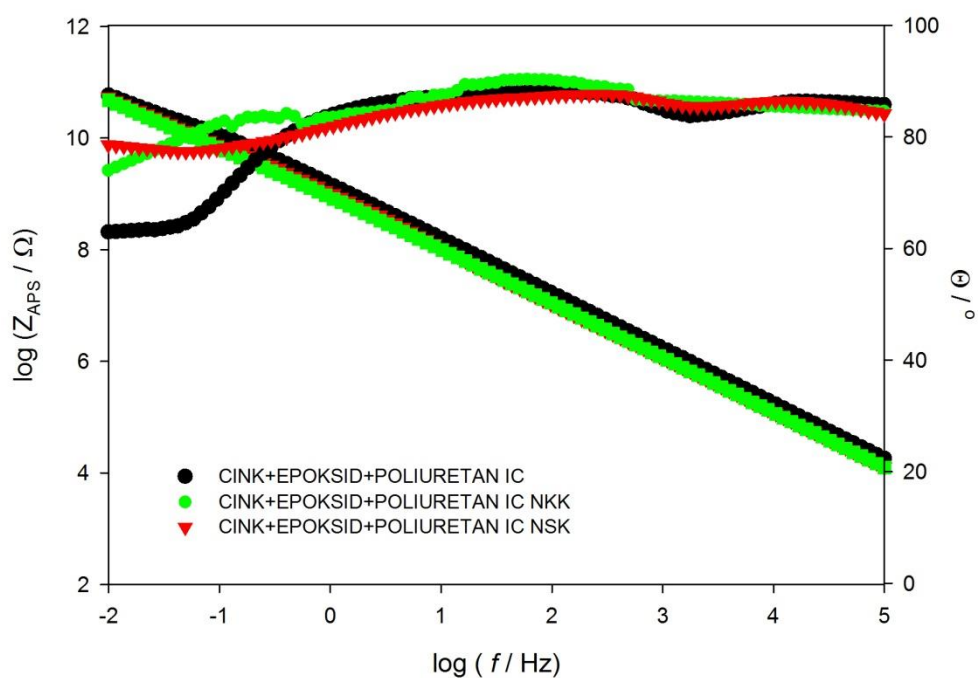
Graf 3. Usporedba vremena sušenja premaza iz zadataka B i C ovisno o udaljenosti od izvora IC zračenja

### 4.3. Rezultati dobiveni EIS tehnikom

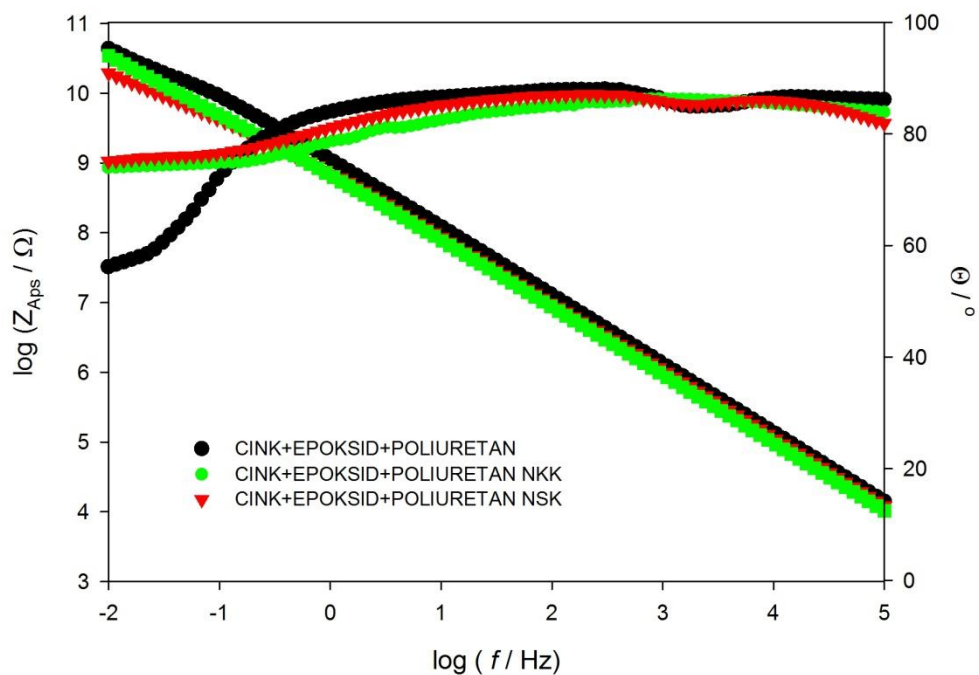
Rezultati elektrokemijske impedancijske spektroskopije prikazani su na grafovima (slike 35 - 39). Svaki graf prikazuje po 3 pločice na koje je nanesen isti premaz ili isti sustav premaza približno jednake debljine, u uvjetima prije, te nakon izlaganja slanoj i klima komori.

Također, iz Bodeovih prikaza za svaku testnu pločicu određena je vrijednost impedancije kod frekvencije 0,1 Hz (tablica 31). Na temelju dobivenih vrijednosti može se zaključiti kolika je korozijska otpornost ispitivanih premaznih sustava.

Zadatak A (2K epoksid obogaćen cinkom – 2K epoksid – 2K poliuretan)

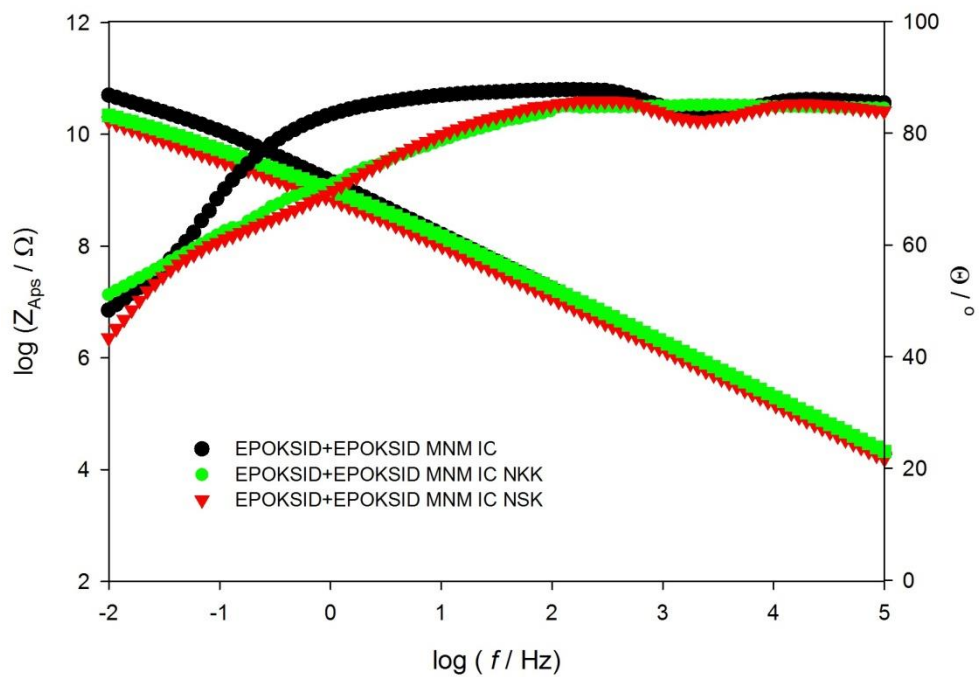


Slika 35. Bodeov grafički prikaz za testne pločice 7, 8, 9



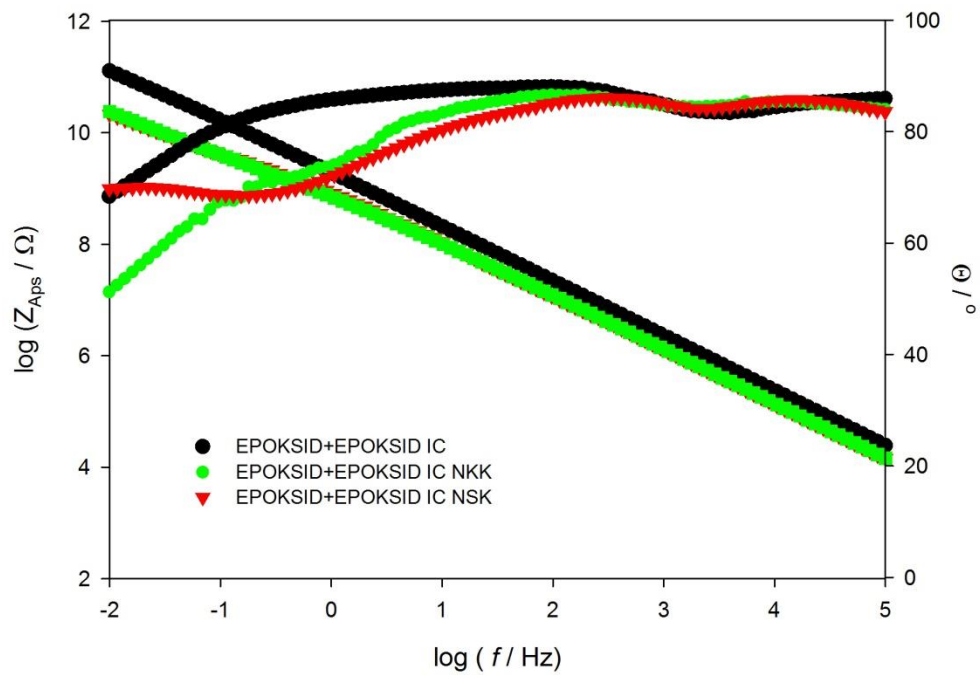
Slika 14. Bodeov grafički prikaz za testne pločice 10, 11, 12

Zadatak B (2x Hempadur Mastic 4588W “mokra na mokro”)



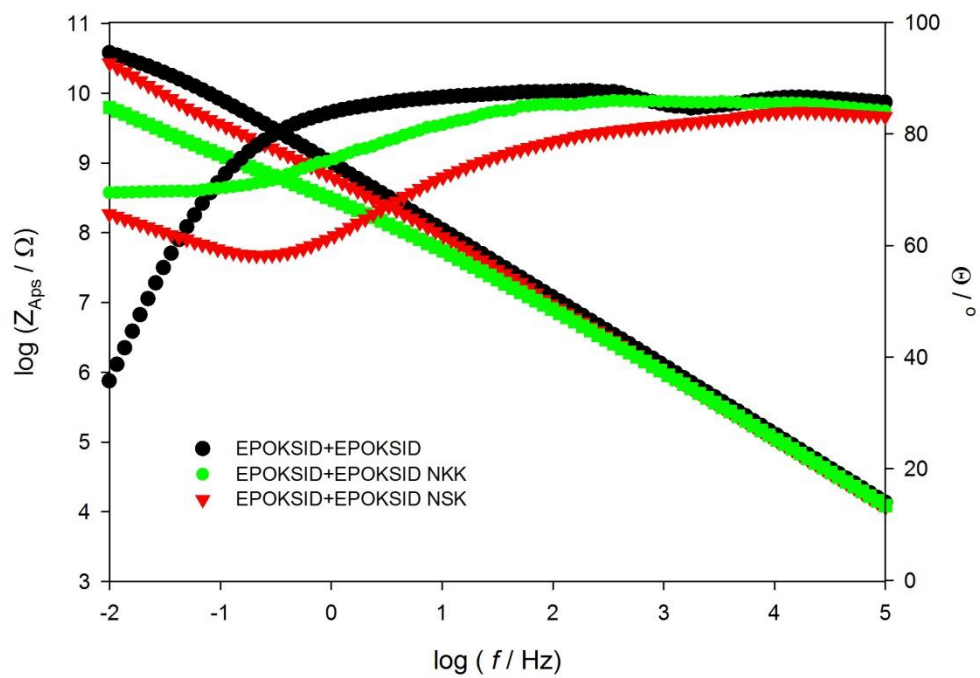
Slika 15. Bodeov grafički prikaz za testne pločice 55, 56, 57

Zadatak C (2x Hempadur Mastic 4588W IC)



*Slika 16. Bodeov grafički prikaz za testne pločice 31, 32, 33*

Zadatak B i C (2x Hempadur Mastic 4588W sobna)



*Slika 39. Bodeov grafički prikaz za testne pločice 16, 17, 18*

Tablica 31. Vrijednosti otpora premaznih sustava dobivene impedancijskom spektroskopijom

| Uzorak                            | Otpor pri<br>0,1 Hz<br>/ GΩ | Otpornost<br>premaza pri 0,1 Hz<br>/ GΩ cm <sup>2</sup> | Log10( otpornosti<br>premaza / Ω cm <sup>2</sup> )<br>pri 0,1 Hz |
|-----------------------------------|-----------------------------|---|--|
| 10. CINK+EPOKSID+POLIURETAN       | 9.98                        | 119.77  | <b>11.0784</b>   |
| 11. CINK+EPOKSID+POLIURETAN NKK   | 9.63                        | 115.62  | <b>11.0630</b>   |
| 12. CINK+EPOKSID+POLIURETAN NSK   | 9.71                        | 116.46  | <b>*11.0662</b>  |
| 7. CINK+EPOKSID+POLIURETAN IC     | 10.07                       | 120.88  | <b>11.0824</b>   |
| 8. CINK+EPOKSID+POLIURETAN IC NKK | 9.89                        | 118.71  | <b>11.0745</b>   |
| 9. CINK+EPOKSID+POLIURETAN IC NSK | 9.83                        | 117.99  | <b>*11.0719</b>  |
| 16. EPOKSID+EPOKSID               | 9.93                        | 119.17  | <b>11.0762</b>   |
| 17. EPOKSID+EPOKSID NKK           | 9.57                        | 114.87  | <b>11.0602</b>   |
| 18. EPOKSID+EPOKSID NSK           | 9.13                        | 109.53  | <b>*11.0395</b>  |
| 31. EPOKSID+EPOKSID IC            | 10.2                        | 122.95  | <b>11.0897</b>   |
| 32. EPOKSID+EPOKSID IC NKK        | 9.6373                      | 115.65  | <b>11.0631</b>   |
| 33. EPOKSID+EPOKSID IC NSK        | 9.62                        | 115.45  | <b>*11.0624</b>  |
| 55. EPOKSID+EPOKSID MNM IC        | 10.0                        | 120.91  | <b>11.0825</b>   |
| 56. EPOKSID+EPOKSID MNM IC NKK    | 9.54                        | 114.52  | <b>11.0589</b>   |
| 57. EPOKSID+EPOKSID MNM IC NSK    | 9.74                        | 116.84  | <b>*11.0676</b>  |

- \* uzorci testirani u slanoj komori tijekom 168h, što nije prema standardu ISO 16773

Primjer izračunavanja impedancije premaznih sustava prikazano je sljedećim jednadžbama:

$$P = 12 \text{ cm}^2$$

$$\log(|Z|@ 0,1 \text{ Hz}) = \log (10^{|z|} * P) \quad (10)$$

$$|Z|_{10@ 0,1 \text{ Hz}} = \mathbf{9.98}$$

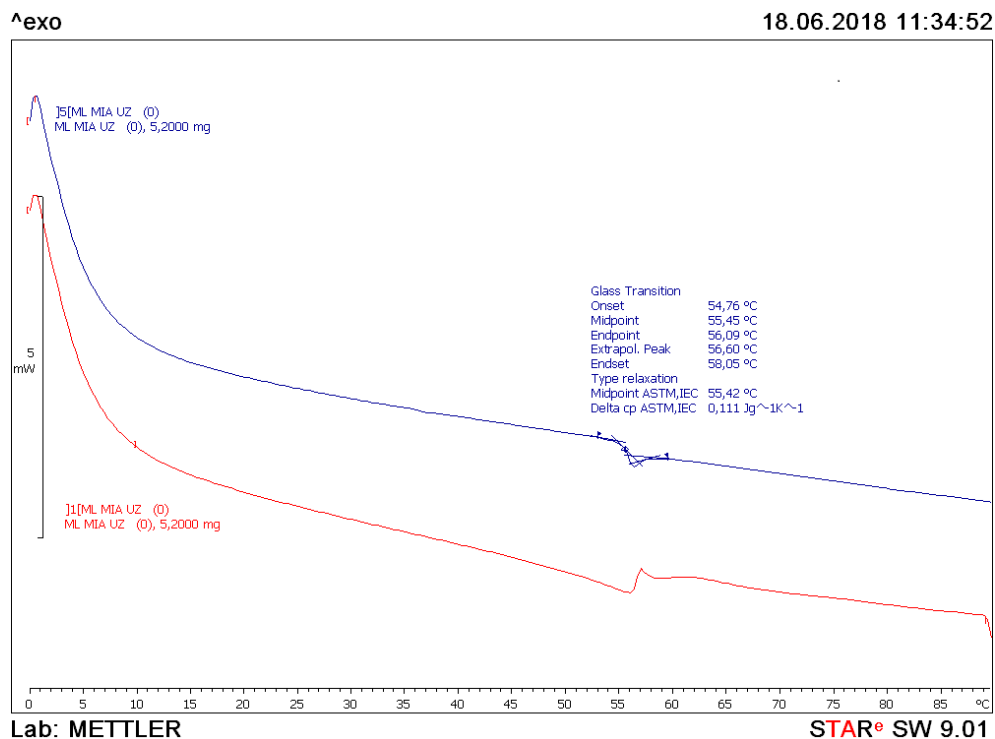
Iz rezultata je vidljivo da se otpor premaza izlaganjem u klima i slanoj komori snizio. Najviši otpor nakon izlaganja korozivnoj sredini zadržao je sustav sa poliuteranom sušen na 40 cm od izvora IC. Najvišu vrijednost otpora ima uzorak 31 čiji su slojevi zasebno sušeni na udaljenosti od 40 cm od IC izvora, te taj otpor pada utjecajem klima i slane komore. Također, visoke vrijednosti otpora pokazuje i sustav sa nanošenjem „*mokro na mokro*“ u odnosu na isti sustav sušen konvencionalnom metodom, te je nešto manji od slučaja kada se oba sloja zasebno suše IC tehnikom.

Uspoređujući uzorke sušene tehnikom IC zračenja sa uzorcima sušenim na sobnoj temperaturi, može se zaključiti da je vrijednost otpora premaza sušenih IC zračenjem veća, jer je i veći stupanj umreženja ( umreženje ide od metalne podloge prema van ).

#### 4.4. Rezultati dobiveni DSC tehnikom

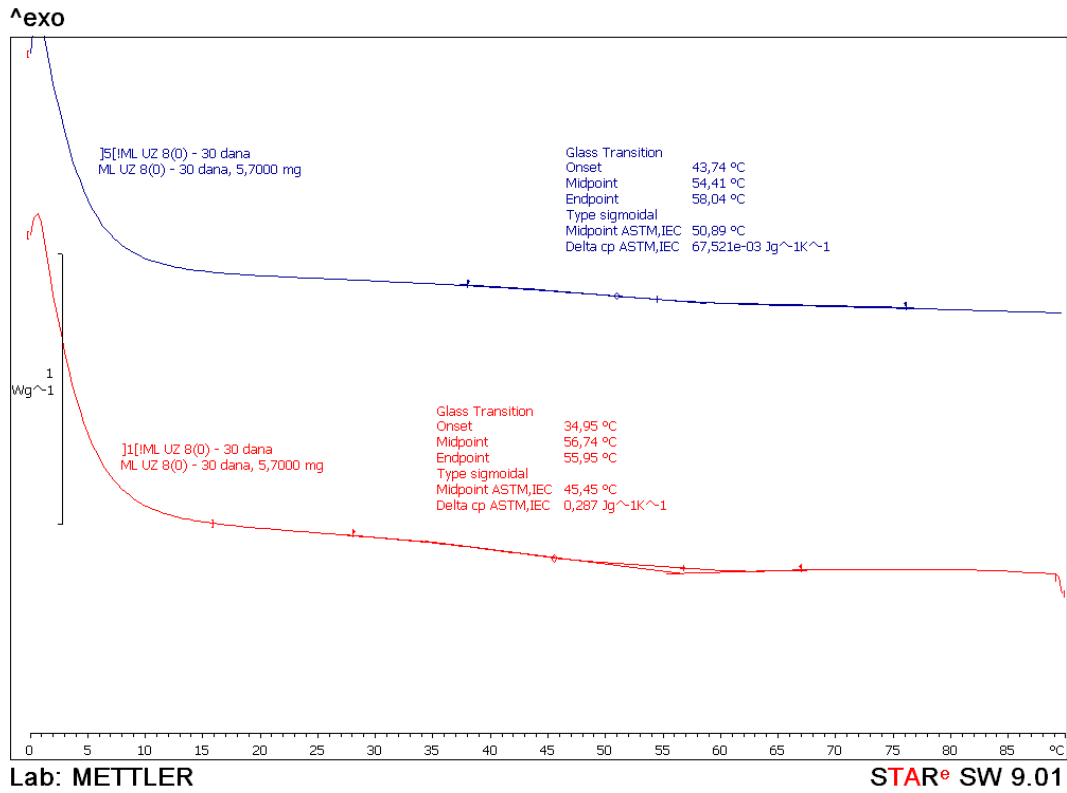
DSC tehnikom dobivene su temperature staklišta, kako bi se odredio utjecaj sušenja premaza IC zračenjem na toplinska svojstva premaza. DSC krivulje za 2 ciklusa zagrijavanja ( prvi ciklus potreban da se zaboravi toplinska povijest uzorka ) prikazane su na slikama 40 – 54, a temperature staklišta očitane su iz krivulja te su date u tablicama 32 - 37.

Zadatak A (2K epoksid obogaćen cinkom – 2K epoksid – 2K poliuretan)

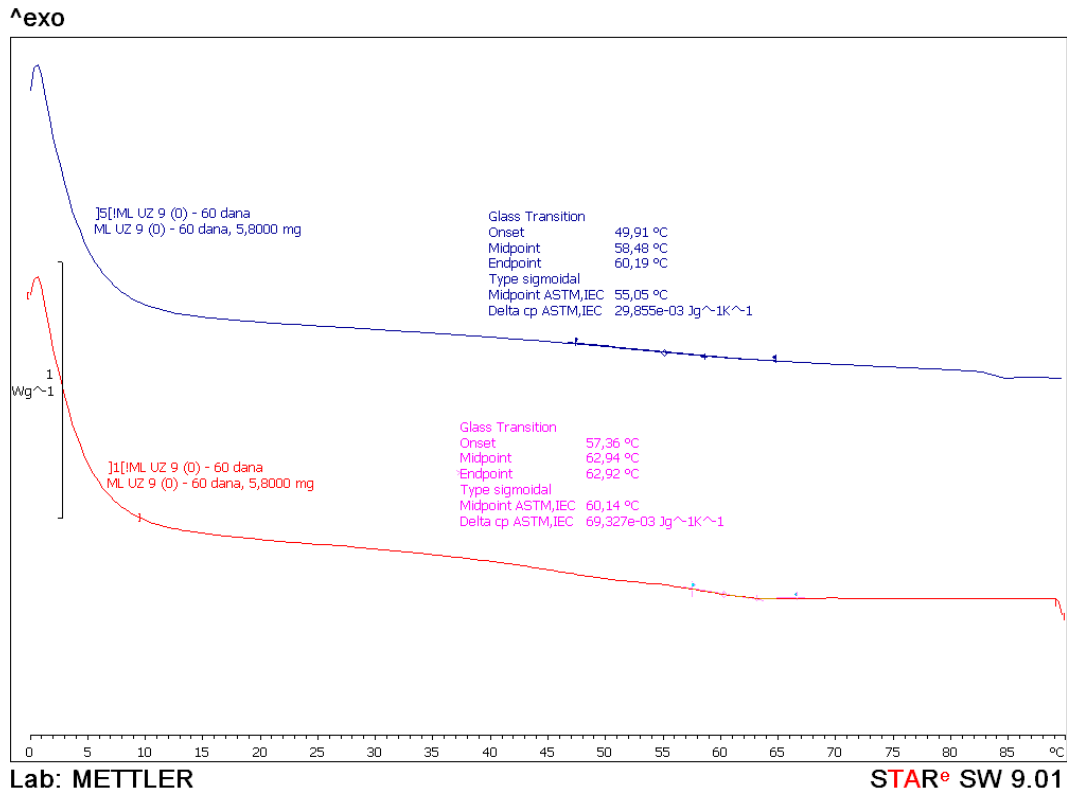


Slika 40. Termogram uzorka 7





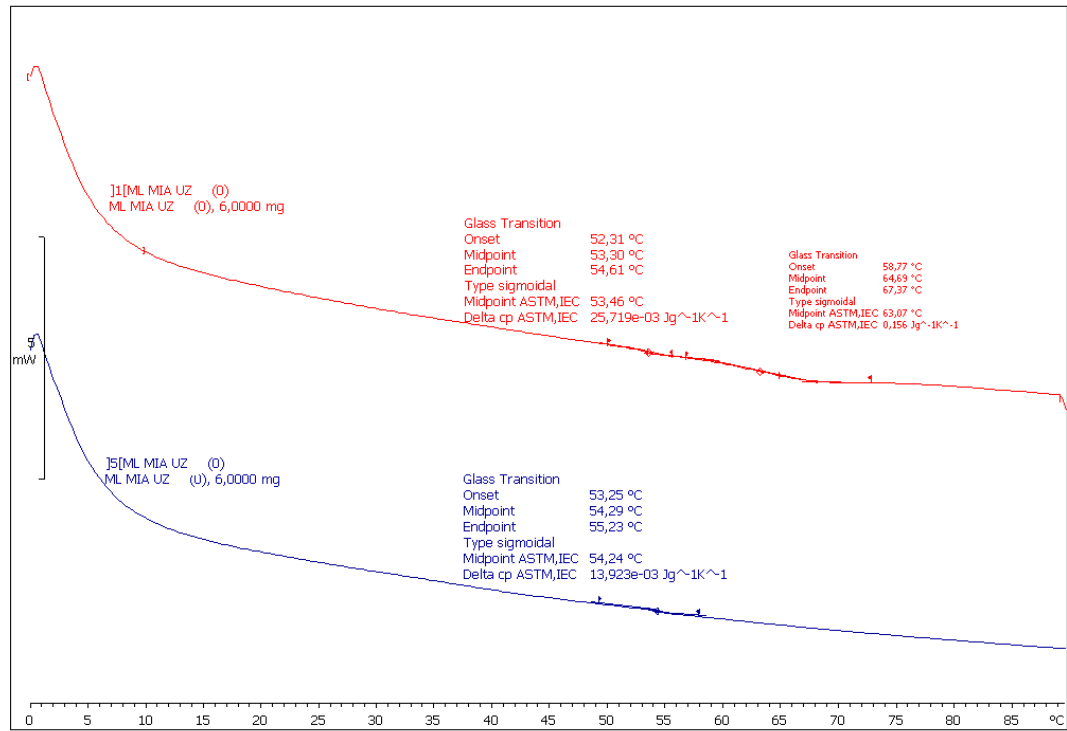
Slika 41. Termogram uzorka 8



Slika 42. Termogram uzorka 9

^exo

18.06.2018 11:42:31

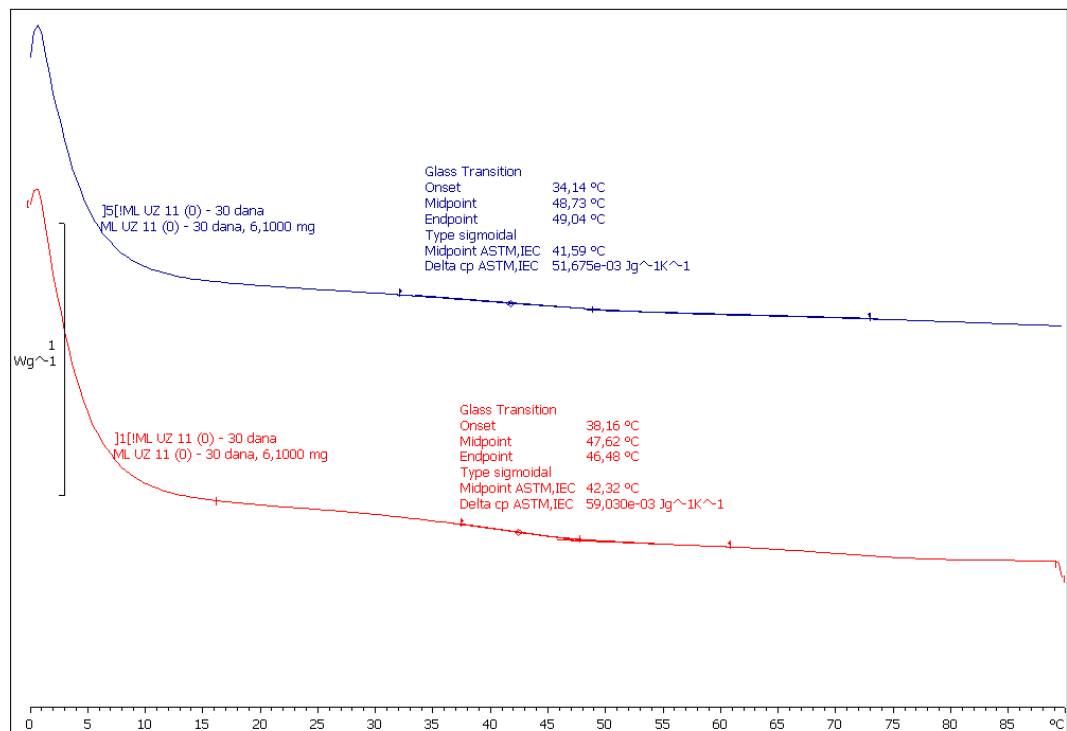


Lab: METTLER

STAR<sup>e</sup> SW 9.01

Slika 43. Termogram uzorka 10

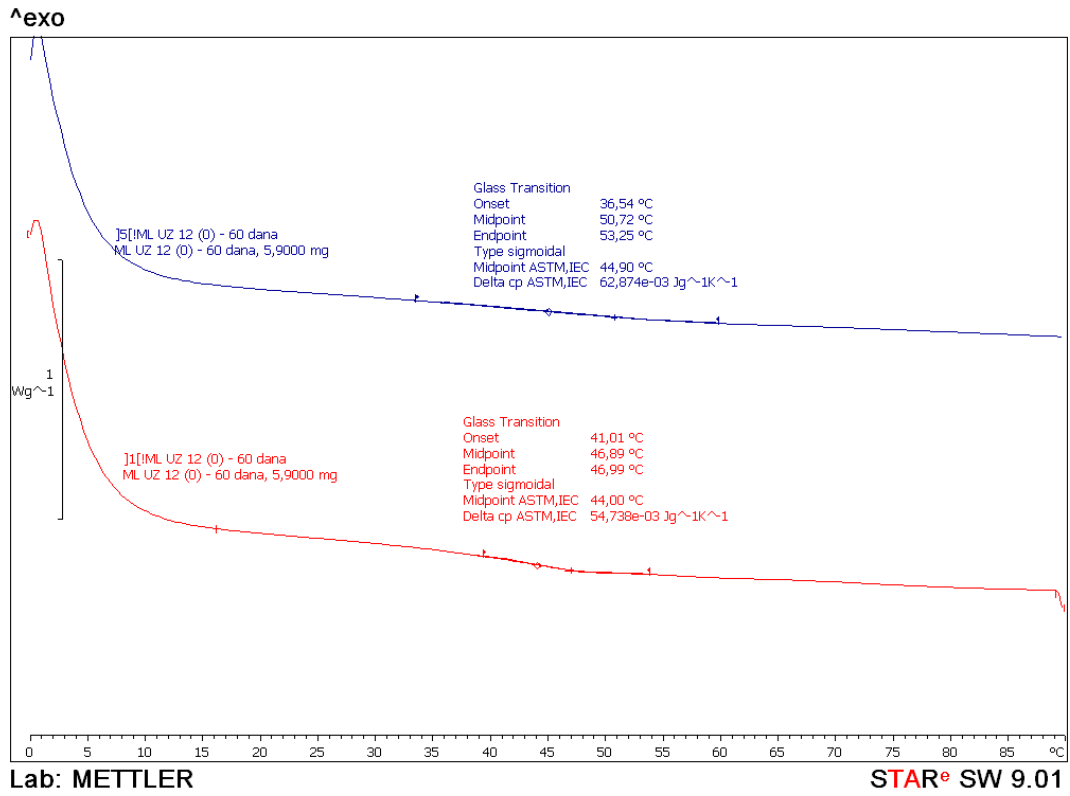
^exo



Lab: METTLER

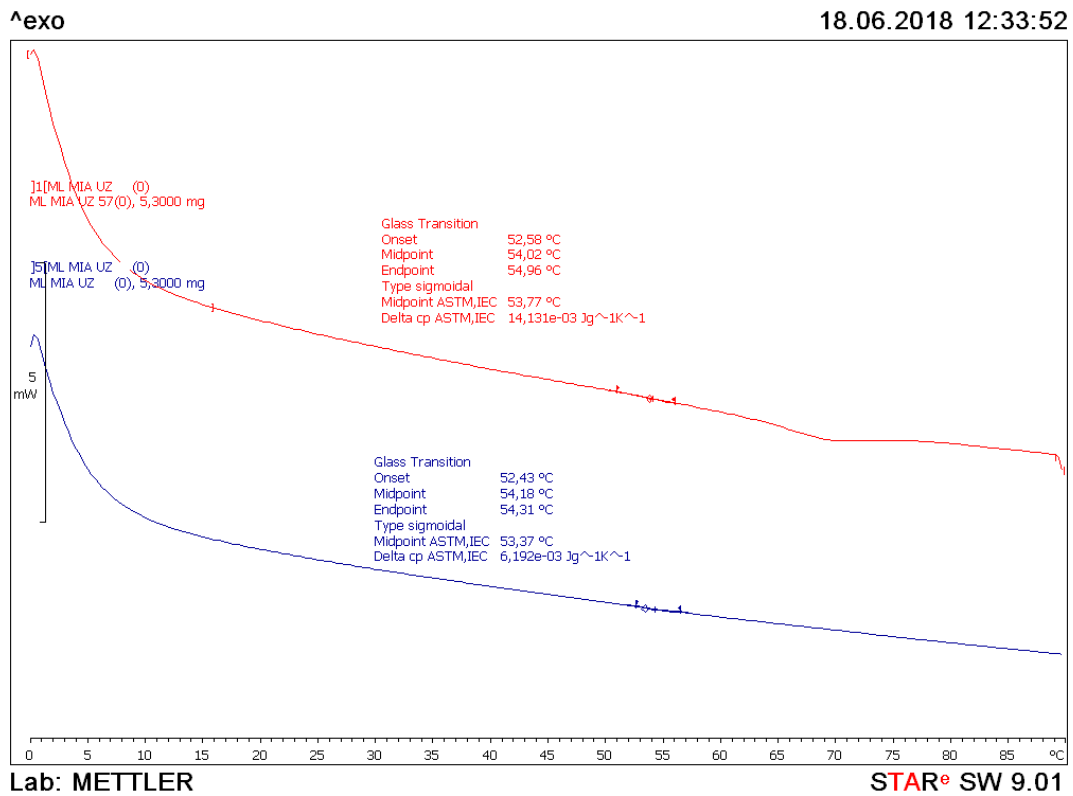
STAR<sup>e</sup> SW 9.01

Slika 44. Termogram uzorka 11

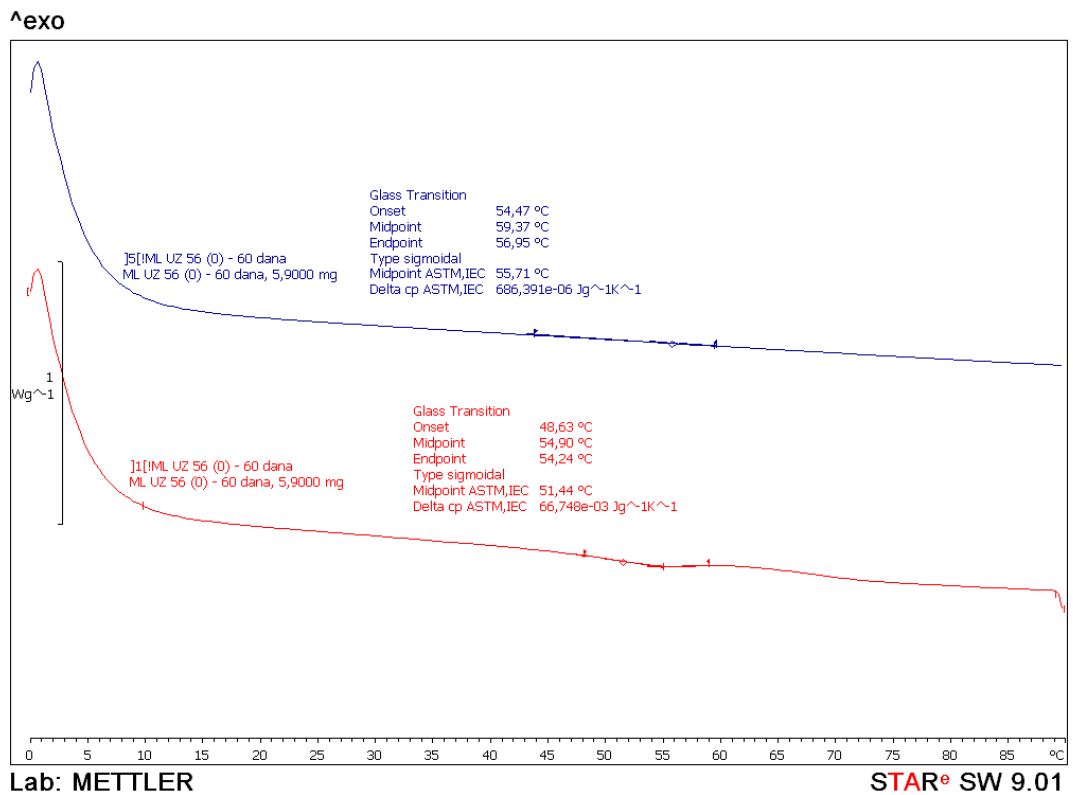


Slika 45. Termogram uzorka 12

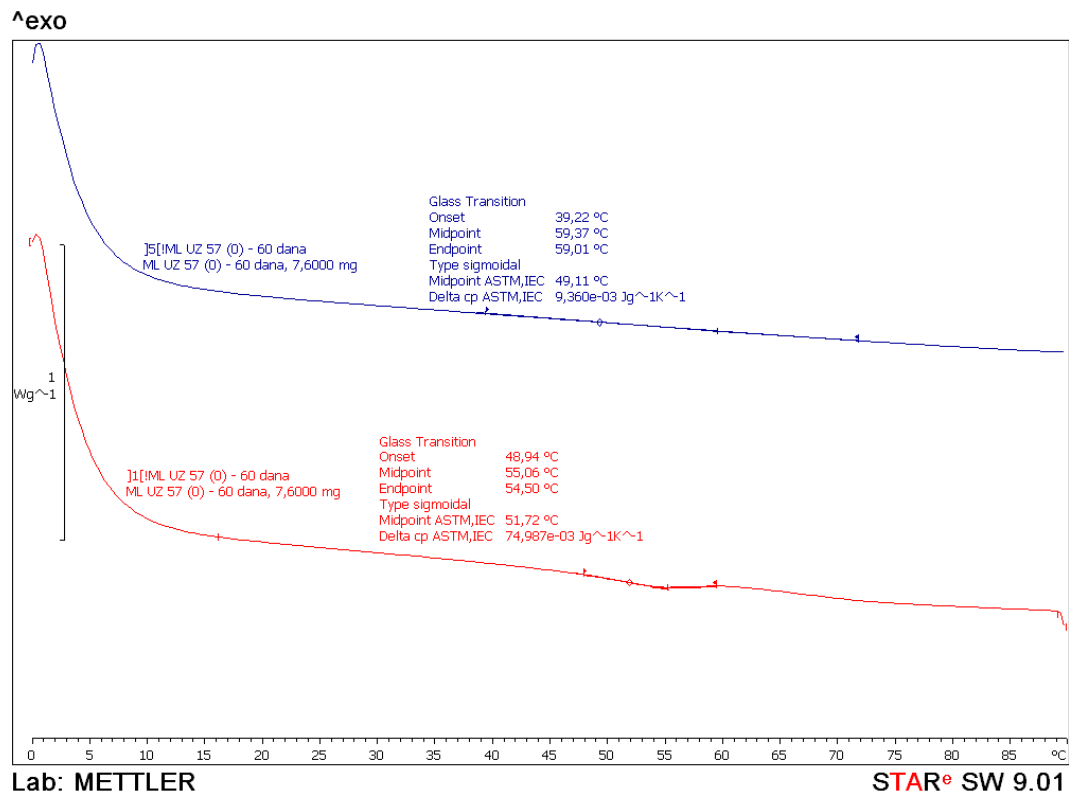
Zadatak B (2x Hempadur Mastic 4588W “mokro na mokro”)



Slika 46. Termogram uzorka 55

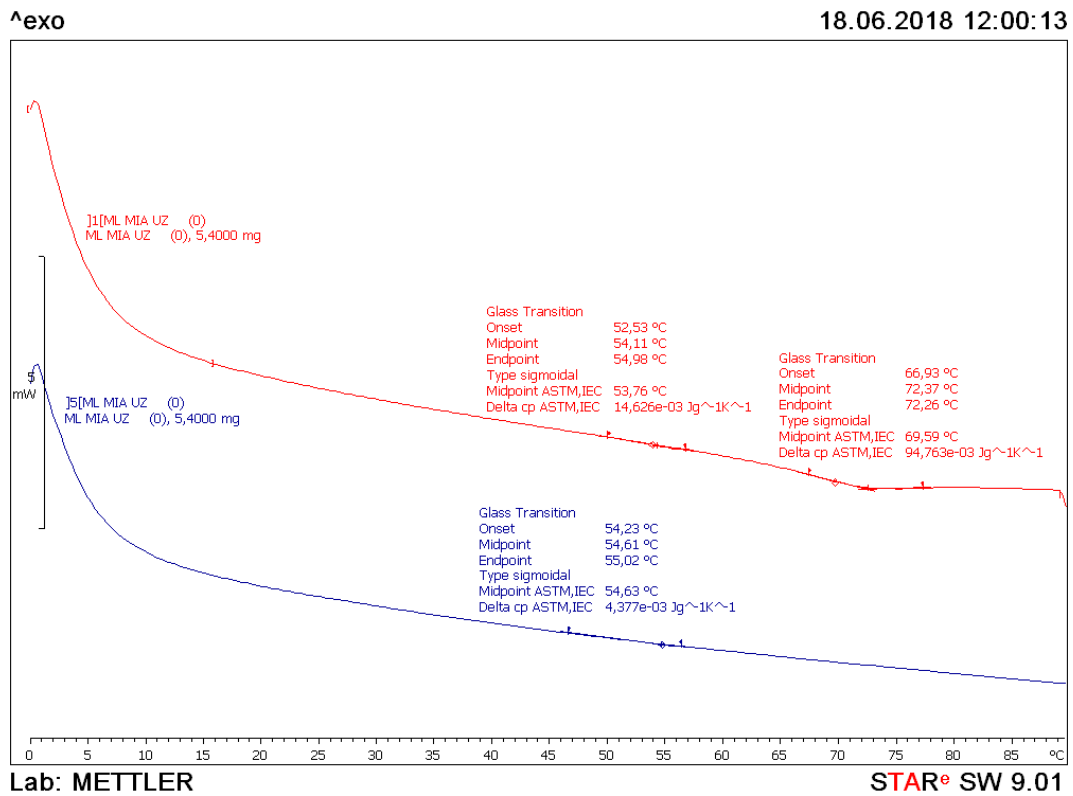


Slika 47. Termogram uzorka 56

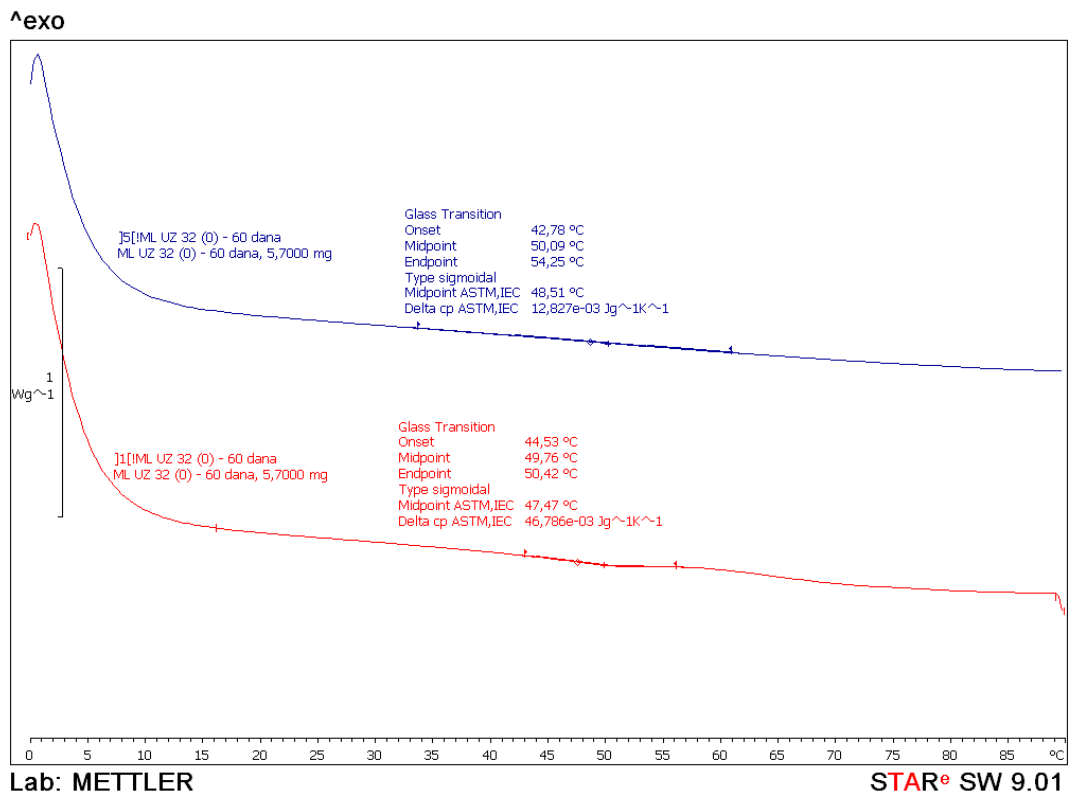


Slika 48. Termogram uzorka 57

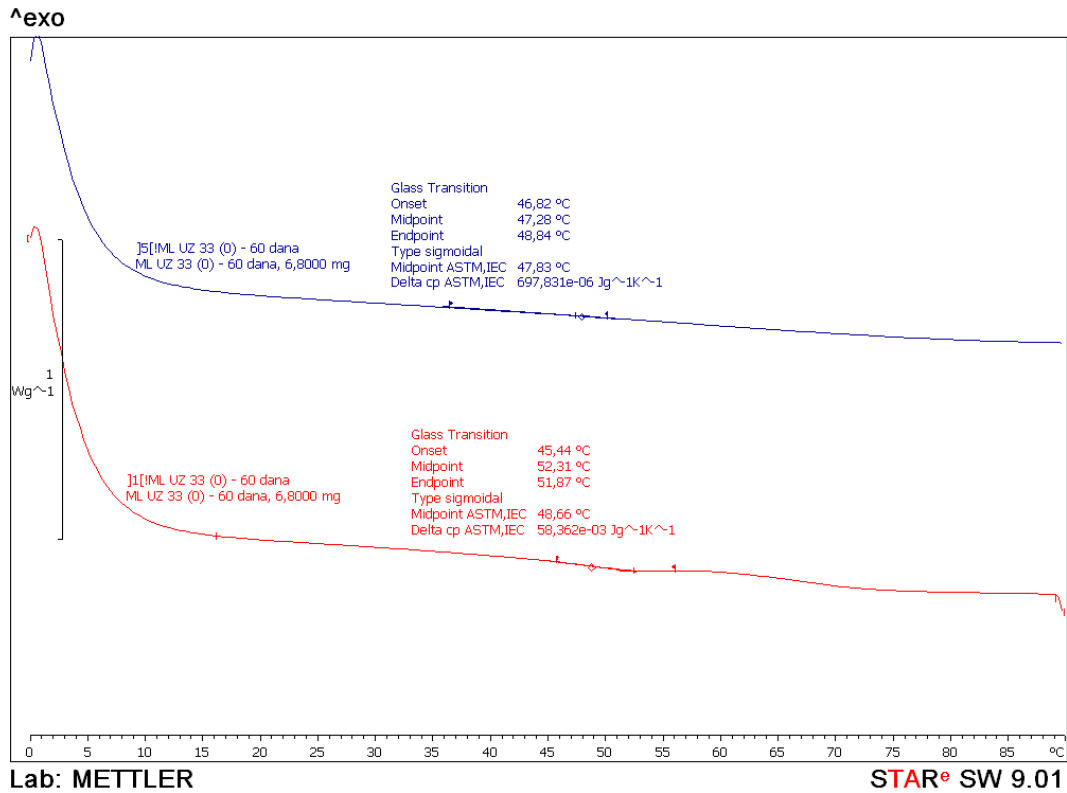
ZADATAK C (2x Hempadur Mastic 4588W IC)



Slika 49. Termogram uzorka 31

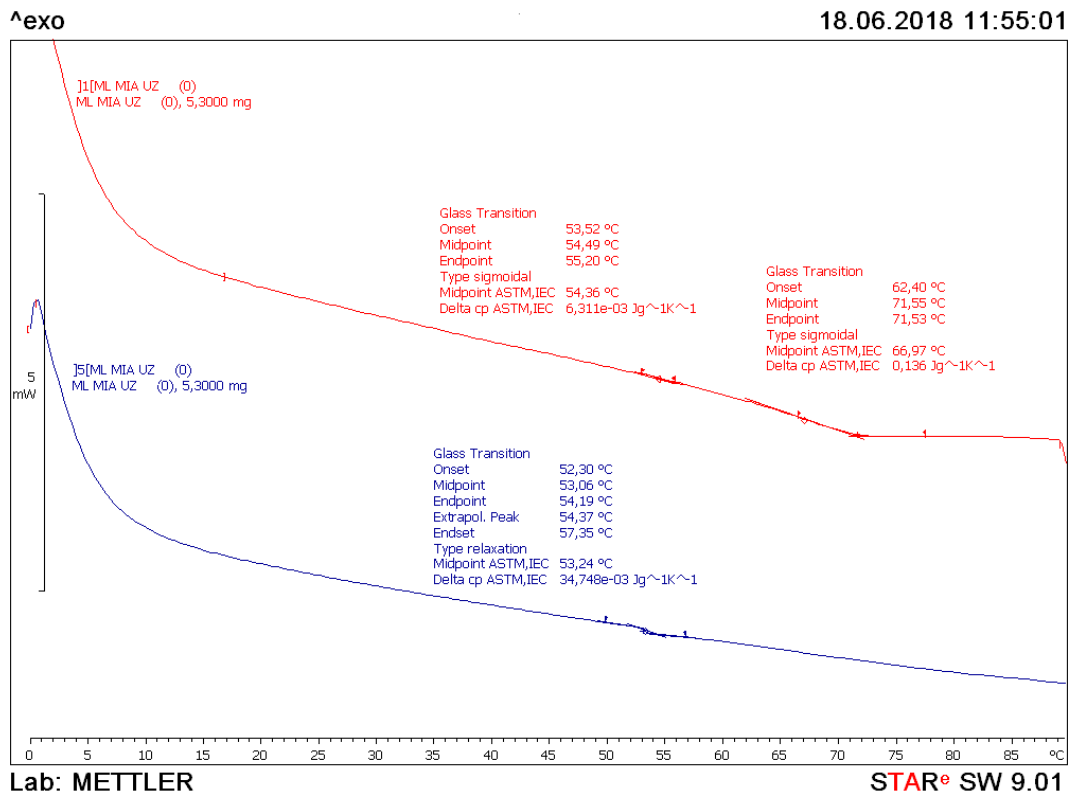


Slika 50. Termogram uzorka 32

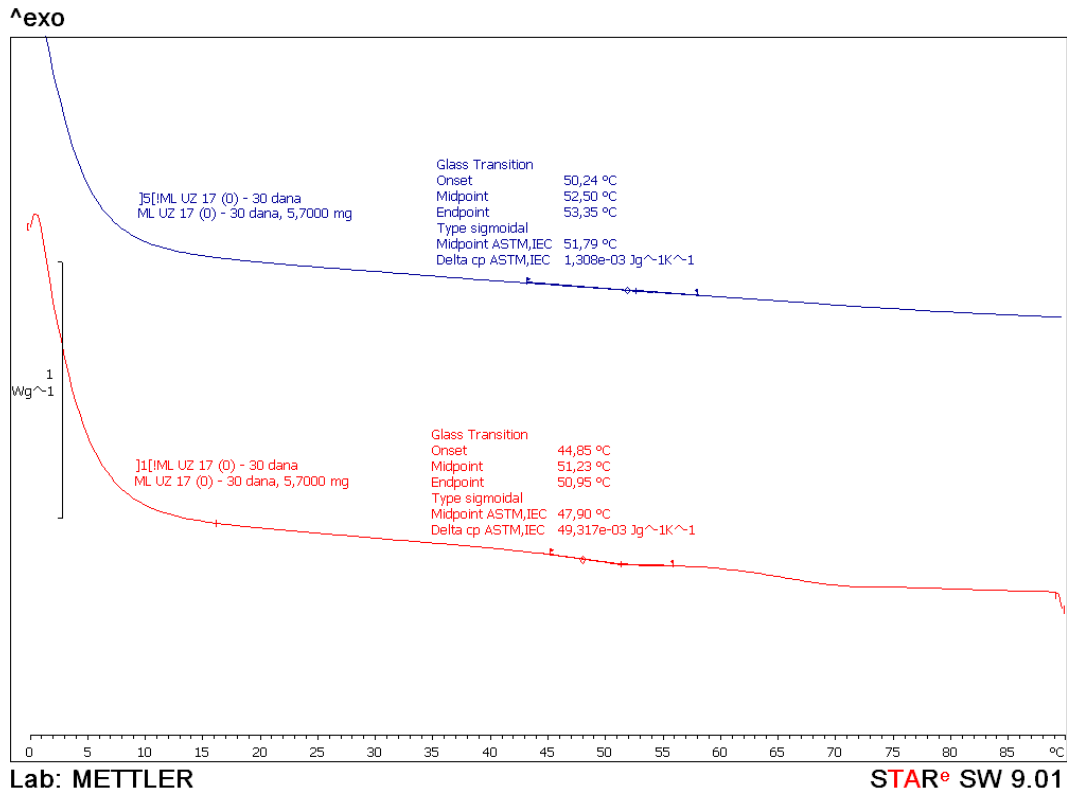


Slika 51. Termogram uzorka 33

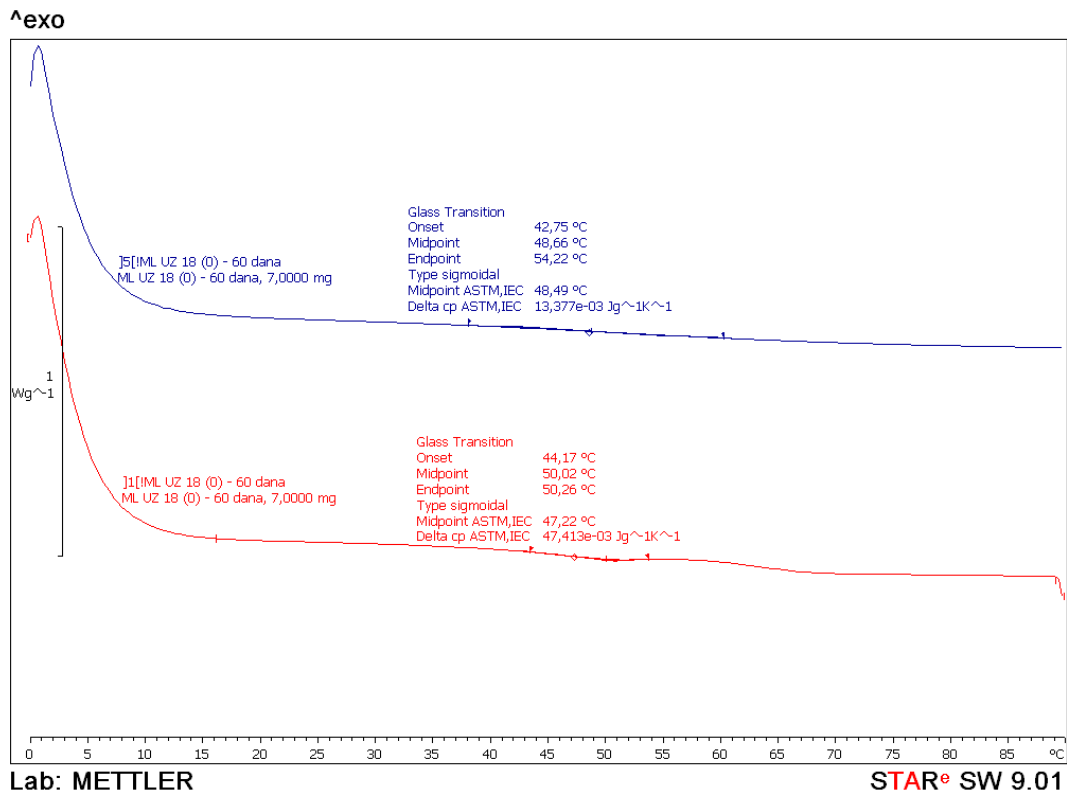
Zadatak B i C (2x Hempadur Mastic 4588W sobna)



Slika 52. Termogram uzorka 16



Slika 53. Termogram uzorka 17



Slika 54. Termogram uzorka 18



Zadatak A (2K epoksid obogaćen cinkom – 2K epoksid – 2K poliuretan)

*Tablica 32. Vrijednosti temperature staklišta premaza sušenih pomoću IC tehnologije*

|                           | <b>broj uzorka</b> | <b>Tg /°C</b> |
|---------------------------|--------------------|---------------|
| <b>prije komora</b>       | 7                  | 55,42         |
| <b>nakon klima komore</b> | 8                  | 50,89         |
| <b>nakon slane komore</b> | 9                  | 55,05         |

*Tablica 33. Vrijednosti temperature staklišta premaza sušenih na sobnoj temperaturi*

|                           | <b>broj uzorka</b> | <b>Tg /°C</b> |
|---------------------------|--------------------|---------------|
| <b>prije komora</b>       | 10                 | 54,24         |
| <b>nakon klima komore</b> | 11                 | 41,59         |
| <b>nakon slane komore</b> | 12                 | 44,90         |

Zadatak B (2x Hempadur Mastic 4588W “mokro na mokro”)

*Tablica 34. Vrijednosti temperature staklišta premaza sušenih pomoću IC tehnologije*

|                           | <b>broj uzorka</b> | <b>Tg /°C</b> |
|---------------------------|--------------------|---------------|
| <b>prije komora</b>       | 55                 | 53,37         |
| <b>nakon klima komore</b> | 56                 | 55,71         |
| <b>nakon slane komore</b> | 57                 | 49,11         |

Tablica 35. Vrijednosti temperature staklišta premaza sušenih na sobnoj temperaturi

|                    | broj uzorka | Tg /°C |
|--------------------|-------------|--------|
| prije komora       | 16          | 53,24  |
| nakon klima komore | 17          | 51,79  |
| nakon slane komore | 18          | 48,49  |

Zadatak C (2x Hempadur Mastic 4588W IC)

Tablica 36. Vrijednosti temperature staklišta premaza sušenih pomoću IC tehnologije

|                    | broj uzorka | Tg /°C |
|--------------------|-------------|--------|
| prije komora       | 31          | 54,63  |
| nakon klima komore | 32          | 48,51  |
| nakon slane komore | 33          | 47,83  |

Tablica 37. Vrijednosti temperature staklišta premaza sušenih na sobnoj temperaturi

|                    | broj uzorka | Tg /°C |
|--------------------|-------------|--------|
| prije komora       | 16          | 53,24  |
| nakon klima komore | 17          | 51,79  |
| nakon slane komore | 18          | 48,49  |

Iz DSC krivulja te očitanih vrijednosti staklišta vidljivo je da se staklište premaza smanjuje nakon boravka u slanoj i klima komori. Također je vidljivo manje smanjenje staklišta kod uzoraka sušenih IC zračenjem u odnosu na uzorke sušene pri sobnoj temperaturi. Prema rezultatima, veće staklište ima dvoslojni premaz u slučaju nanošenja slojeva “mokra na mokro” od dvoslojnog premaza čiji su slojevi zasebno sušeni IC zračenjem.

#### 4.5. Rezultati *pull off* testa

Zadatak A (2K epoksid obogaćen cinkom – 2K epoksid – 2K poliuretan)

Tablica 38. Rezultati *pull off* testa premaza sušenih pomoću IC tehnologije

|                    | broj uzorka | Rezultati <i>pull off</i> testa (MPa) |
|--------------------|-------------|---------------------------------------|
| prije komora       | 7           | 20,19                                 |
| nakon klima komore | 8           | 9,87                                  |
| nakon slane komore | 9           | 11,16                                 |

Tablica 39. Rezultati *pull - off* testa premaza sušenih na sobnoj temperaturi

|                    | broj uzorka | Rezultati <i>pull off</i> testa (MPa) |
|--------------------|-------------|---------------------------------------|
| prije komora       | 10          | 9,89                                  |
| nakon klima komore | 11          | 10,89                                 |
| nakon slane komore | 12          | 12,42                                 |

Zadatak B (2x Hempadur Mastic 4588W “mokro na mokro”)

Tablica 40. Rezultati pull off testa premaza sušenih pomoću IC tehnologije

|                           | broj uzorka | Rezultati pull off testa (MPa) | udaljenost od izvora IC zračenja |
|---------------------------|-------------|--------------------------------|----------------------------------|
| <b>prije komora</b>       | 55          | 8,30                           | 40                               |
| <b>nakon klima komore</b> | 56          | 14,79                          |                                  |
| <b>nakon slane komore</b> | 57          | 16,88                          |                                  |
| <b>prije komora</b>       | 58          | 7,19                           | 60                               |
| <b>nakon klima komore</b> | 59          | 10,34                          |                                  |
| <b>nakon slane komore</b> | 60          | 15,32                          |                                  |
| <b>prije komora</b>       | 61          | 11,99                          | 80                               |
| <b>nakon klima komore</b> | 62          | 14,20                          |                                  |
| <b>nakon slane komore</b> | 63          | 14,70                          |                                  |
| <b>prije komora</b>       | 64          | 15,47                          | 100                              |
| <b>nakon klima komore</b> | 65          | 12,60                          |                                  |
| <b>nakon slane komore</b> | 66          | 13,93                          |                                  |

Zadatak C (2x Hempadur Mastic 4588W IC)

*Tablica 41. Rezultati pull off testa premaza sušenih pomoću IC tehnologije*

|                           | <b>broj uzorka</b> | <b>Rezultati pull off testa (MPa)</b> | <b>udaljenost od izvora IC zračenja</b> |
|---------------------------|--------------------|---------------------------------------|---|
| <b>prije komora</b>       | 31                 | 19,40                                 | 40                                      |
| <b>nakon klima komore</b> | 32                 | 6,64                                  |   |
| <b>nakon slane komore</b> | 33                 | 16,81                                 |   |
| <b>prije komora</b>       | 34                 | 19,75                                 | 60                                      |
| <b>nakon klima komore</b> | 35                 | 9,50                                  |   |
| <b>nakon slane komore</b> | 36                 | 15,23                                 |   |
| <b>prije komora</b>       | 37                 | 19,52                                 | 80                                      |
| <b>nakon klima komore</b> | 38                 | 10,75                                 |   |
| <b>nakon slane komore</b> | 39                 | 16,89                                 |   |
| <b>prije komora</b>       | 40                 | 19,45                                 | 100                                     |
| <b>nakon klima komore</b> | 41                 | 9,69                                  |   |
| <b>nakon slane komore</b> | 42                 | 16,45                                 |   |

Zadatak B i C (2x Hempadur Mastic 4588W sobna)

*Tablica 42. Rezultati pull off testa premaza sušenih na sobnoj temperaturi*

|                           | <b>broj uzorka</b> | <b>Rezultati pull off testa (MPa)</b> |
|---------------------------|--------------------|---------------------------------------|
| <b>prije komora</b>       | 16                 | 15,59                                 |
| <b>nakon klima komore</b> | 17                 | 5,17                                  |
| <b>nakon slane komore</b> | 18                 | 14,70                                 |

Tretiranjem u komorama, po standardu ISO 4624 uzorci iz svih zadataka imaju vrijednost adhezije iznad 5 MPa, čime je postavljeni kriterij zadovoljen.

## 4.6. Ekološki aspekt

*Usporedba potrošnje HOS-a konvencionalnim sušenjem premaza u odnosu na sušenje premaza pomoću IC zračenja:*

Kao što je već prethodno spomenuto, Hrvatska je usklađena sa zakonodavstvom EU od dana pristupanja Europskoj uniji prema HOS EU Direktivi 2004 / 42 EC. Zbog toga postoji tendencija smanjenju količine HOS-a, a tvrtke primjenom ove tehnologije sušenja nastoje smanjiti količine HOS – a, čime doprinose očuvanju okoliša, a također i zdravlju zaposlenika koji su svakodnevno okruženi bojama, i otapalima koja iz njih isparavaju.

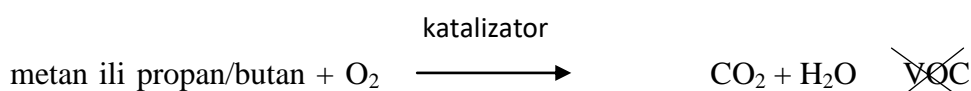
Kao pokazatelj smanjenja količine HOS- a, napravljena je približna usporedba količine HOS – a ispuštene pri sušenju premaza na sobnoj temperaturi u usporedbi sa količinom ispuštenom primjenom IC tehnologije sušenja.

### Primjer računa

60% od ukupne površine za lakiranje odnosi se na male dijelove. Upravo premazi nanесeni na male dijelove predstavljaju potencijal za sušenje pomoću IC zračenja.

Uzme li se za primjer iznos ukupne količine potrošene boje od oko 100 t, to odgovara količini HOS - a od oko 25,5 t (uzeta vrijednost količine HOS – a iz tehničke specifikacije proizvoljno uzetog proizvoda). Kada uzmemo da od te količine 60% boje odlazi na male dijelove, to odgovara količini potrošene boje od 60 t, odnosno količini HOS - a od 15,3 t.

Pretpostavka je da oko 50% HOS - a odlazi u zrak prilikom samog nanošenja premaza, što iznosi oko 7,65 t HOS - a, dok drugih 50% odnosno 7,65 t isparava tijekom samog sušenja premaza. Od tih preostalih 7,6 t HOS – a koji isparava u atmosferu prilikom sušenja premaza, 70-80 % odnosno 5,7 t uništava samo IC zračenje te pretvara HOS u CO<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>O, pri čemu nastali CO<sub>2</sub> koristi kao gorivo za pogon, prema reakciji:



U navedenom primjeru, **IC tehnologijom** sušenja premaza u odnosu na konvencionalno sušenje, ispušta se **oko 5,7 t odnosno 22% HOS-a manje**. Umjesto 25,5 t HOS - a koja bi bila ispuštena prilikom konvencionalnog sušenja, prilikom sušenja pomoću IC zračenja ispušta se oko 19,8 t. Time je pokazano da je primjenom tehnike sušenja premaza pomoću IC zračenja smanjena količina HOS - a, a time i štetan utjecaj otapala na okoliš. Samim time tvrtke mogu prijaviti manju količinu HOS - a nadležnim državnim službama. Nije manje važno istaknuti da na taj način brinu o zdravlju svojih zaposlenika i okolišu.

## 4.7. Energetski aspekt

Kako bi dobili uvid u energetska prednost tehnologije sušenja premaza IC zračenjem, kao primjer je uzeta lakirnica u kojoj se provodi proces lakiranja i sušenja, dimenzija 12 x 7 x 7 m sa poluvertikalnim strujanjem zraka, te IC sušara manjih dimenzija u koju je instalirano npr. 16 IC emitera. Za IC sušaru potrebne su manje dimenzije od lakirnice jer se proces u IC sušari odvija na manjim udaljenostima nego što je to u lakirnici. Naime, u lakirnici je potrebno osigurati prostor oko predmeta zbog odnosa lakirerske šprice i površine. Treba napomenuti da će se povećati protočnost dijelova kroz lakirnicu zbog bržeg sušenja u IC sušari. Usporedba sušenja provodit će se za temperaturu od 80 °C.

Uzmimo da će se na objekte nanositi 2 sloja premaza. Prvi sloj bit će 2K epoksidni premaz, a drugi 2K poliuretanski završni premaz.

### Lakirnica sa poluvertikalnim strujanjem zraka

Potrebno vrijeme sušenja na 80 °C: 2K epoksidni premaz: 2 h

2K poliuretanski premaz: 4h

Kao gorivo je korišten prirodni plin.

U lakirnici će se provoditi nanošenje i sušenje boje.

Za zagrijavanje kabine (20 °C potrebnih za nanošenje boje) potroši se 41 m<sup>3</sup>/h prirodnog plina odnosno 82 m<sup>3</sup> tijekom 2 sata, a za sušenje premaza (80 °C) potroši se 48,2 m<sup>3</sup>/h prirodnog plina odnosno 96,4 m<sup>3</sup> tijekom 2 sata rada. To je ukupno 178,5 m<sup>3</sup> prirodnog plina utrošenog za 1. sloj premaza.

Nakon sušenja prvog sloja, kabinu je potrebno ohladiti do najmanje 28 °C radi nanošenja idućeg sloja premaza. Također ju je nakon nanošenja 1. sloja potrebno opet zagrijati do 80 °C radi postizanja temperature sušenja, čime se potroši još 82 m<sup>3</sup> plina tijekom 2 sata. Sušenje PU premaza na temperaturi od 80 °C traje 4h, na što se potroši 192,8 m<sup>3</sup> plina. To je ukupno 275 m<sup>3</sup> prirodnog plina utrošenog za 2. sloj premaza (tablica 43).

Sveukupno je za sušenje oba sloja premaza na 80 °C potrebno **12 h** te **453 m<sup>3</sup> prirodnog plina**, pri čemu cijena jednog m<sup>3</sup> iznosi 3 kn, što ukupno iznosi **1360 kn**.



Tablica 43. Vrijeme i volumen prirodnog plina potrebni za sušenje premaza u kabini sa poluvertikalnim strujanjem zraka

| proces              | potrebno vrijeme /h | Potrošnja prirodnog plina (m <sup>3</sup> ) |
|---------------------|---------------------|---|
| zagrijavanje kabine | 2                   | 82  |
| sušenje EP premaza  | 2                   | 96,4  |
| hlađenje kabine     | 2                   | -   |
| zagrijavanje kabine | 2                   | 82  |
| sušenje PU premaza  | 4                   | 192,8                                       |
| <b>ukupno</b>       | <b>12h</b>          | <b>453 m<sup>3</sup></b>                    |

#### Sušara sa IC tehnologijom sušenja

Potrebno vrijeme sušenja na 80 °C: 2K epoksidni premaz: 30 min

2K poliuretanski premaz: 30 min

Kao gorivo je korišten ukapljeni naftni plin, a biti će izračunata i potrošnja prirodnog plina za iste uvjete.

U kabini će se provoditi samo sušenje premaza, što znači da se paralelno može provoditi nanošenje boje što omogućuje otprilike 3x veću protočnost objekata kroz kabinu za sušenje nego u slučaju lakirnice sa poluvertikalnim strujanjem zraka.

Potrošnja UNP – a za emiter snage 6 kW dimenzija 60 x 60 cm iznosi 0,45 kg/h. Pretpostavka je da bi u takvoj kabini bilo instalirano 16 IC emitera, jednakih karakteristika.

Za zagrijavanje katalizatora prisutnih u 16 emitera snage 6 kW koji daju ukupnu snagu od 96 kW, pri čemu se svaki zagrijava 10 min, to ukupno iznosi 160 min odnosno 2,7h:

$$96 \text{ kW} \times 2,7 \text{ h} = 260 \text{ kWh}$$

Cijena struje je 0,92 kn/kWh, što znači da bi utrošak struje iznosio 240 kn.

Za sušenje 1. sloja premaza tijekom pola sata svaki emiter potrošio bi 0,23 kg UNP - a, što je ukupno 3,68 kg UNP - a, a isto toliko bilo bi potrošeno i za sušenje 2. sloja premaza. Dakle, za oba sloja bilo bi potrebno ukupno 7,4 kg UNP – a.

Gustoća UNP – a iznosi 2,46 kg/ m<sup>3</sup>, što znači da 7,4 kg odgovara volumenu od 3 m<sup>3</sup> UNP – a. Kako prirodni plin ima nižu kalorijsku vrijednost od UNP – a, da bi se postigla ista kalorijska vrijednost prirodnog plina i UNP- a, potrebno je uzeti 2,5 puta veći volumen prirodnog plina od volumena UNP –a, što iznosi 7,5 m<sup>3</sup> prirodnog plina (tablica 44).

Prethodno je spomenuto da kroz kabinu može proći 3x više objekata jer je kraće vrijeme sušenja i moguće je trenutno nanošenje novih slojeva. To bi značilo i da se troši 3x više prirodnog plina, što sada iznosi 22,5 m<sup>3</sup> prirodnog plina, odnosno 67,5 kn. (cijena prirodnog plina iznosi 3 kn/m<sup>3</sup>).

Dakle, za sušenje oba sloja bilo bi potrebno 70 min za jedan ciklus sušenja, odnosno **210 min** za 3 ciklusa sušenja u kabini ,što je **307,5 kn**.

*Tablica 44. Vrijeme, volumen prirodnog plina i potrošnja električne energije potrebni za 1 ciklus sušenja premaza u kabini sa 16 IC emitera*

| proces               | potrebno vrijeme /min | Potrošnja prirodnog plina ( m <sup>3</sup> ) | Potrošnja električne energije ( kWh ) |
|----------------------|-----------------------|--|---------------------------------------|
| zagrijavanje emitera | 10                    | -  | 260                                   |
| sušenje EP premaza   | 30                    | 3,75   | -                                     |
| hlađenje kabine      | -                     | -  | -                                     |
| sušenje PU premaza   | 30                    | 3,75   | -                                     |
| <b>ukupno</b>        | <b>70 min</b>         | <b>7,5 m<sup>3</sup></b>                     | <b>260 kWh</b>                        |

Iz analize se može zaključiti da je IC sušara vremenski i novčano mnogo isplativija od sušenja u lakirnici. Kao što je prethodno objašnjeno, kod lakirnice je potrebno višestruko grijanje i hlađenje što također IC sušaru čini isplativijom.

Prilikom postavljanja predmeta za lakiranje u lakirnicu, zauzima se veći prostor kako bi sve površine bile dostupne za lakiranje te zbog grešaka lakiranja (ukoliko su predmeti preblizu - suhi sprej boje). U IC sušari se predmeti mogu postaviti bliže (onoliko blizu koliko to dopušta dizajn predmeta da se ne oštete), te pošto je manji međupremazni interval i moguće trenutno nanošenje daljnjih slojeva premaza, time je i veća protočnost objekata.

## 5. ZAKLJUČAK

Iz rezultata se može zaključiti da je sušenje premaza tehnologijom IC zračenja prema primijenjenim tehnikama ispitivanja brže od sušenja premaza na sobnoj temperaturi.

### VRIJEME SUŠENJA PREMAZA OVISNO O:

#### ❖ Udaljenosti uzorka od IC zračenja

Povećanjem udaljenosti premaza od izvora IC zračenja povećava se vrijeme sušenja premaza, jer intenzitet zračenja opada povećanjem udaljenosti uzorka od izvora IC zračenja.

#### ❖ Sušenju pomoću IC zračenja u odnosu na sušenje premaza pri sobnim uvjetima

Uvelike je kraće vrijeme sušenja premaza IC tehnikom u odnosu na brzinu sušenja pri sobnim uvjetima, upravo jer IC zračenje suši premaz i iznutra prema van, odnosno od površine metala do vanjske površine premaza i obrnuto, za razliku od konvekcijskog sušenja pri kojem se zagrijavaju samo površinski slojevi premaza.

#### ❖ Nanošenju slojeva metodom „mokro na mokro“ ili metodom zasebnog sušenja svakog sloja IC zračenjem

Uspoređujući zadatak B (2x Hempadur Mastic 4588W) i C (2x Hempadur Mastic 4588W IC), brže je nakon nanošenja prvog sloja napraviti *flash off* od 15 min te odmah nanijeti 2. sloj, bez zračenja 1. sloja IC tehnologijom, jer je kvaliteta premaza ostala gotovo jednaka. Time se troši manje vremena na nanošenje premaza kao i za transport predmeta od lakirnice do IC sušare.

### KVALITETA UZORAKA PRIJE TE NAKON SLANE I KLIMA KOMORE

#### ❖ EIS

Otpor premaza nije se značajno promijenio izlaganjem uzoraka slanoj i klima komori.

Vrijednost otpora uzoraka sušenih IC zračenjem veći je od vrijednosti otpora uzoraka sušenih na sobnoj temperaturi.

Nanošenjem slojeva metodom “mokro na mokro” otpor dvoslojnog premaza nije znatno niži u odnosu na otpor istog dvoslojnog premaza nanesenog na način da se svaki sloj zasebno suši IC tehnikom.

#### ❖ DSC

Nakon izlaganja uzoraka komorama, rezultati DSC analize pokazuju manje sniženje temperature staklišta na uzorcima sušenim IC zračenjem. Pretpostavka je da je do smanjenja staklišta premaza došlo zbog preostale vode u uzorku, zbog čega je ona djelovala kao plastifikator, i na taj način povećala fleksibilnost polimernih lanaca, a time i snizila temperaturu staklišta.

#### ❖ *Pull off* test

Prionjivost premaza testirana metodom *pull off* testa za sve uzorke prije i nakon izlaganja komorama zadovoljava kriterij od minimalno 5 MPa, prema normi ISO 4624.

### PREDNOSTI I NEDOSTACI SUŠENJA PREMAZA POMOĆU IC TEHNOLOGIJE U ODNOSU NA KONVENCIONALNO SUŠENJE PREMAZA [15] [16]

#### ➤ Prijenos topline

Konvekcija ovisi o temperaturi i brzini protoka zraka, dok se kod IC tehnologije može postići veća fleksibilnost u temperaturama i jačini zračenja koristeći različite valne duljine zračenja.

#### ➤ Energetska učinkovitost

IC zrake djeluju na površinu na koju su usmjerene, što znači da se površine koje nisu tretirane ne griju što znači da ih se ne treba hladiti što utječe na uštedu energije <sup>[15]</sup>.

Također, brzina sušenja je 70-80 % veća u usporedbi sa konvencionalnim sustavima jer IC zračenje dubinski suši premaz.

#### ➤ Reakcijsko vrijeme

Dođe li do promjene u procesu, konvekcijskoj peć treba 30 min do 2h, ovisno o veličini, da reagira na tu promjenu, dok se IC uređaj samo isključi i uključi.

#### ➤ Broj komponenata za sušenje

U konvekcijskoj peći, zagrijavanje ovisi o broju i masi komponenata koju treba zagrijati, dok je sam IC uređaj izvor energije i ne ovisi o broju komponenata.

#### ➤ Prostor

U slučaju IC sušenja premaza, moguće je trenutno nanošenje daljnjih slojeva premaza ( međupremazni interval mnogo kraći ), iz čega proizlazi velika ušteda vremena,

energije ( do 80 % ) te smanjenje zahtjeva za prostorom u smislu bržeg protoka dijelova( 70-80 % ) jer IC paneli zauzimaju za 60-90 % manje prostora u odnosu na konvencionalne sustave grijanja.

➤ Utjecaj na okoliš

Smanjenje emisija HOS-eva do 70 % u fazi sušenja - IC zračenje uništava hlapive organske spojeve prisutne u premazima koji isparavaju tijekom sušenja, na način da izgaranjem nastaju CO<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>O, pri čemu IC lampa koristi nastali CO<sub>2</sub> kao gorivo za daljnji rad što je ekološki prihvatljivije od konvencionalnog sušenja kod kojeg se ti spojevi ne uništavaju (smanjenje emisije CO<sub>2</sub> do 70 % ).

ATEX odobrenje, katalitička tehnologija utemeljena na izgaranju bez plamena, što znači da se može koristiti u zapaljivom okolišu, no potencijalni nedostatak je zbrinjavanje otpada.

Također, velike konveksijske peći često proizvode buku zbog ventilatora.

➤ Održavanje

Vrlo fleksibilna i laka instalacija IC uređaja, zamjena filtera ili emitera.

Kod konveksijske peći potrebno održavanje filtera, cijevi, ventilatora, brtvi te nekada i skidanje peći

➤ Investicijski troškovi

Veći početni investicijski troškovi samih IC lampi.

➤ Parametri testiranja

Mogućnost nastanka defekata na premazima, zbog neodgovarajućih parametara udaljenosti IC emitera ( preblizu ili predaleko postavljen emiter ).

Reflektirajući premazi nisu pogodni za IC zračenje jer ga reflektira i nema dubinskog sušenja premaza.

Nedostupna mjesta – emiter djeluje samo na površinu koja je direktno izložena IC zračenju.

Relativno nova tehnologija, nema mnogo literature, niti podrške za ispitivanja od strane proizvođača premaza

## 6. POPIS OZNAKA

| Oznaka     | Jedinica | Opis  |
|------------|----------|---|
| DMF        | μm       | Debljina mokrog filma                                   |
| DSF        | μm       | Debljina suhog filma                                    |
| HOS        | g/l      | Hlapivi organski spojevi                                |
| 2K premazi |          | Dvokomponentni premazi                                  |
| ISO        |          | Međunarodna organizacija za normizaciju                 |
| IR         |          | Infrared light  |
| IC         |          | Infracrvena svjetlost                                   |
| UV         |          | Ultraljubičasta svjetlost                               |
| VOC        | g/l      | Hlapivi organski spojevi                                |
| EIS        |          | Elektrokemijska impedancijska spektroskopija            |
| DSC        |          | Diferencijalna pretražna kalorimetrija                  |
| EU         |          | Europska unija  |
| ATEX       |          | Atmosphere explosibles                                  |
| UNP        |          | Ukapljeni naftni plin (C <sub>3</sub> /C <sub>4</sub> ) |

## 7. LITERATURA

- [1] Juraga I., Alar V., Stojanović I., Korozija i zaštita premazima, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [2] [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2013\\_06\\_69\\_1366.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2013_06_69_1366.html) (9.8.2018.)
- [3] Kovačić, T., Struktura i svojstva polimera. Udžbenici Sveučilišta u Splitu, Split, 2010.
- [4] <http://protective.sherwin-williams.com/pdf/Epoxy%20Coatings%20Guide.pdf> (9.8.2018.)
- [5] <http://www.hempel.hr/hr-HR/products/hempadur-mastic-4588W> (20.4.2018.)
- [6] Juraga I., Šimunović V., Stojanović I., Alar V., Mehanizmi zaštite od korozije, skripta, FSB, Zagreb, 2012.
- [7] <http://www.hempel.com/en/products/hempadur-avantguard-750> (20.4.2018.)
- [8] <http://www.hempel.hr/hr-HR/products/hempathane-hs-55610> (20.4.2018.)
- [9] Hempel coatings (Croatia). (2017) Odabir odgovarajućeg sustava premaza: smjernice za zaštitu u skladu sa ISO 12944.
- [10] Dubravić, M. Primjena infracrvenog zračenja za sušenje premaza na metalnim površinama. // Reaktor ideja 5/2017., vol 2, str. 23
- [11] Otmačić Ćurković, H. (2008) Konstrukcijski materijali i zaštita. Interna skripta za vježbe, FKIT, Zagreb: Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije
- [12] T. Kovačić, Struktura i svojstva polimera, sveučilišni udžbenik, Kemijsko-tehnološki fakultet Sveučilišta u Splitu, 2010.
- [13] Kjærsmo, D., Kleven, K. i Scheie, J. (2003) Corrosion protection: inspector's book of reference. Danska, Hempel A/S.
- [14] Norsok M-501, Edition 6.
- [15] Division of The McGraw Hill Companies, Inc. Curing and Drying Operations: The Pros and Cons of Infrared Heating. // Platts 2005.
- [16] [www.noblelight.net](http://www.noblelight.net) (10.09.2018.)

