

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Antonio Vujičić

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, rujan 2012.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Antonio Vujičić

**NOVE MOGUĆNOSTI PRIMJENE PARNOFAZNIH INHIBITORA KOROZIJE U  
ZAŠTITI IZOLIRANIH CIJEVI OD UGLJIČNOG ČELIKA**

**ZAVRŠNI RAD**

Voditelj rada: dr.sc.Helena Otmačić Ćurković, docent

Članovi ispitnog povjerenstva:  
dr.sc.Helena Otmačić Ćurković, docent  
dr.sc. Lidija Valek Žulj, znanstveni suradnik  
dr.sc. Vanja Kosar, izvanredni profesor

Zagreb, rujan 2012.

## **Sadržaj**

### **SAŽETAK**

### **1. UVOD**

### **2. OPĆI DIO**

2.1. Općenito o koroziji

2.2. Podjela korozije

    2.2.1. Atmosferska korozija

2.3. Korozija ispod izolacije

2.4. Metode ispitivanja korozije

    2.4.1. Vizualna analiza korozije

2.5. Korozijska zaštita

    2.5.1. Inhibitori

        2.5.1.1. Parnofazni inhibitori korozije (VpCI-vapor phase corrosion inhibitors)

2.6. Čelik

2.7. Izolacija

    2.7.1. Staklena vuna

    2.7.2. Poliuretanska pjena

### **3. EKSPERIMENTALNI DIO**

3.1. Ispitivanje migracijskih svojstava inhibitora

    3.1.1. Migracijski test na izolaciji

    3.1.2. Migracijski test na metalnoj površini

3.2. Ispitivanje promjene svojstava inhibitora toplinskim tretiranjem

    3.2.1. Toplinsko tretiranje prije nanošenja

    3.2.2. Toplinsko tretiranje nakon nanošenja

3.3. Ispitivanje migracije i zaštite ispod izolacije

3.4. Klima komora

## **4. REZULTATI**

- 4.1. Ispitivanje migracijskih svojstava inhibitora
  - 4.1.1. Migracijski test na izolaciji
  - 4.1.2. Migracijski test na metalnoj površini
- 4.2. Ispitivanje promjene svojstava inhibitora toplinskim tretiranjem
  - 4.2.1. Toplinsko tretiranje prije nanošenja
  - 4.2.2. Toplinsko tretiranje nakon nanošenja
- 4.3. Ispitivanje migracije i zaštite ispod izolacije

## **5. RASPRAVA**

- 5.1. Ispitivanje migracijskih svojstava inhibitora
  - 5.1.1. Migracijski test na izolaciji
  - 5.1.2. Migracijski test na metalnoj površini
- 5.2. Ispitivanje promjene svojstava inhibitora toplinskim tretiranjem
  - 5.2.1. Toplinsko tretiranje prije nanošenja
  - 5.2.2. Toplinsko tretiranje nakon nanošenja
- 5.3. Ispitivanje migracije i zaštite ispod izolacije

## **6. ZAKLJUČAK**

## **7. LITERATURA**

## **8. POPIS OZNAKA**

## **ŽIVOTOPIS**

## **SAŽETAK**

Cilj ovog istraživanja bio je pronaći granične uvijete unutar kojih inhibitor VpCI-658 djelotvorno štiti ugljični čelik, tj. ispitati kako se ponaša u raznim uvjetima te pronaći moguću zamjenu za njega. Osim spomenutog VpCI-658 ispitivani su i VpCI-239, Ecoline CLP te Master batch #2. Svi navedeni su komercijalni inhibitori korozije tvrtke Cortec Corporation osim Master batch #2 koji je još u razvoju.

Ispitivanja su podijeljena u 3 grupe: ispitivanje migracijskih svojstava proizvoda, ispitivanje promjene svojstava inhibitora toplinskim tretiranjem te migracija i zaštita ispod izolacije. Ispitivanja su provedena u klima komori gdje tjedan dana provedenih unutar nje predstavlja približno 6 mjeseci izloženosti stvarnoj korozivnoj atmosferi. Uvjeti u klima komori bili su 38°C, 95% relativne vlažnosti i pH 3.

Rezultati istraživanja pokazuju da je VpCI-658 vrlo dobar inhibitor sa odličnim migracijskim svojstvima te da bi, u određenim uvjetima, VpCI-239 bio odlična zamjena za njega. Tretiranje visokom temperaturom prije nanošenja na metalnu površinu poboljšava učinkovitost VpCI-658 dok je tretiranje visokom temperaturom nakon nanošenja smanjuje. Tretiranje niskom temperaturom nakon nanošenja ne mijenja učinkovitost VpCI-658.

**KLJUČNE RIJEČI:** VpCI, ugljični čelik, izolacija, klima komora, korozivna atmosfera

## **ABSTRACT**

The goal of this research was to find the boundary conditions within which VpCI-658 effectively protects carbon steel, in other words the goal was to see how the performance of VpCI-658 changes in different conditions and also to find a possible substitute for it. Other than VpCI-658 the following inhibitors were also used in this research: VpCI-239, Ecoline CLP and Master batch #2. They are all commercial corrosion inhibitors of Cortec Corporation except Master batch #2 which is still in development.

The tests were divided into 3 groups: testing the migration properties, testing the change of properties with heat treatment and testing the migration and protection under insulation. The tests were conducted in the humidity chamber where a week spent in it represents approximately 6 months of exposure to a real corrosive environment. The conditions in the humidity chamber were 38°C, 95% relative humidity and pH 3.

Results of this research show that VpCI-658 is a very good inhibitor with excellent migration properties and that, in some conditions, VpCI-239 can be used as a great substitute for it. High temperature treatment before application increases the efficiency of VpCI-658 while high temperature treatment after application decreases it. Low temperature treatment after application does not change the efficiency of VpCI-658.

**KEY WORDS:** VpCI, carbon steel, insulation, humidity chamber, corrosive environment

## 1. UVOD

Korozija je nepoželjno (štetno) trošenje konstrukcijskog materijala kemijskim djelovanjem okoline te je često povezano s fizikalnim i/ili biološkim oštećivanjem koje se može odvijati istodobno ili uzastopno s korozijom (mehaničko, erozija, abrazija, kavitacija, toplinsko, UV). Koroziju čini skup kemijskih i elektrokemijskih promjena tijekom kojih metal prelazi od elementarnog stanja u spojeve u kojima se najčešće nalazi u prirodi. <sup>[1,2]</sup>

Usprkos visokoj razini instrumentalne tehnike još je uvijek najvažnija kvalitativna metoda ispitivanja korozije vizualni pregled. Njime se prate promjene uočljive na materijalu ili u agresivnom mediju. Pregled se obavlja prije i poslije izlaganja mediju, a često i u toku ispitivanja, po mogućnosti bez prekida izlaganja. <sup>[1]</sup>

Inhibitori korozije se definiraju kao tvari koje dodane u malim količinama u agresivni medij mogu u velikoj mjeri smanjiti brzinu korozije metala. Primjena inhibitora se većinom odnosi na atmosfersku koroziju, vodene sustave te primarnu i sekundarnu tehnologiju nafte. Prilikom izbora inhibitora važno je voditi računa o metalu kojeg je potrebno zaštитiti te o sredini i uvjetima u kojima se metal nalazi. <sup>[2]</sup>

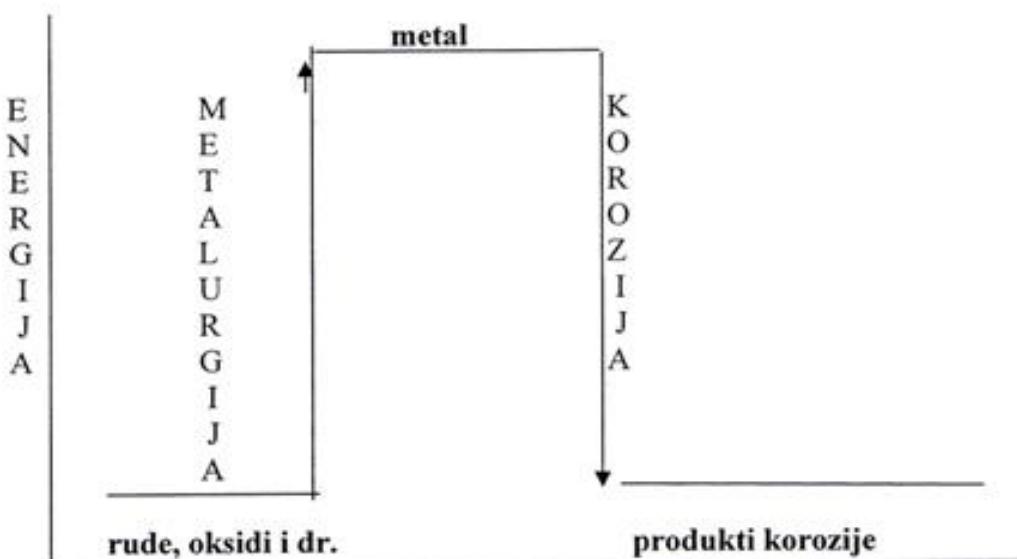
Parnofazni inhibitori korozije su hlapljive čvrste organske tvari čijim se parama zasićuje atmosfera ili drugi plin. Označavaju se sa VCI (od engleskog naziva Volatile corrosion inhibitor) ili VpCI (od engleskog naziva Vapor phase corrosion inhibitors). Najčešće se koriste za sprječavanje atmosferske korozije u zatvorenim prostorima, tijekom skladištenja ili transporta. <sup>[2]</sup>

Ovo istraživanje se odvijalo u laboratoriju tvrtke Cortec Corporation. U istraživanju su korišteni Cortec-ovi proizvodi i to: VpCI-658, VpCI-239, Ecoline CLP i Master batch #2.

## 2. OPĆI DIO

### 2.1. Općenito o koroziji

Korozija je nepoželjno (štetno) trošenje konstrukcijskog materijala kemijskim djelovanjem okoline te je često povezano s fizikalnim i/ili biološkim oštećivanjem koje se može odvijati istodobno ili uzastopno s korozijom (mehaničko, erozija, abrazija, kavitacija, toplinsko, UV). Izraz korozija potječe od latinskog glagola corrodere (nagrizati). Korozija je spontani proces koji se ne može sprječiti, samo se može usporiti. Koroziju čini skup kemijskih i elektrokemijskih promjena tijekom kojih metal prelazi od elementarnog stanja u spojeve u kojima se najčešće nalazi u prirodi. Većina metala se u prirodi nalazi u vezanom stanju u obliku raznih ruda. Da bi se te rude preradile u čisti (elementarni metal) potrebno ih je podvrgnuti pirometalurškim procesima što podrazumijeva dovođenje velike količine energije. Dakle, metal u svojem čistom obliku sadrži visoku količinu energije. Prirodna težnja metala je da reagiraju s drugim tvarima te odgovarajućim oslobađanjem energije prelaze u stanja niže energije i upravo to smanjivanje slobodne energije je pokretačka sila korozije. Energetsku promjenu metala pri metalurškom procesu i pri koroziji prikazuje slika 1.<sup>[1,2]</sup>



Slika 1. Prikaz energetske promjene pri postupcima dobivanja čistog metala, te pri koroziji istog metala<sup>[2]</sup>

## 2.2. Podjela korozije

Koroziski procesi mogu se podijeliti prema:

- mehanizmu procesa
  - mediju u kojem se odvija
  - materijalu koji korodira (uglavnom za nemetale)
  - industrijskoj grani ili vrsti postrojenja
  - odnosu korozije i drugih štetnih procesa
  - izgledu koroziskog napada

S obzirom na to da korodiraju i metalni i nemetalni materijali, temeljna podjela korozije je na koroziju metala i koroziju nemetala. Korozija metala se dalje, prema mehanizmu procesa, dijeli na kemijsku (korozija u neelektrolitima) i elektrokemijsku (korozija u elektrolitima).

Kemijska korozija je reakcija atoma metala iz kristalne rešetke s molekulama nekog elementa ili spoja iz okoline, pri čemu izravno nastaju molekule spoja koji je koroziski produkt. Kemijska korozija metala zbiva se u neelektrolitima, tj. u medijima koji ne provode električnu struju, pri čemu nastaju spojevi metala s nemetalnim elementima (najčešće oksidi i sulfidi). Najvažniji neelektroliti koji u praksi izazivaju kemijsku koroziju metala su vrući plinovi (samo ako su suhi) i organske tekućine (organske tekućine mogu izazvati kemijsku koroziju samo ako su bezvodne jer inače dolazi do elektrokemijske korozije).

Elektrokemijska korozija teče tako da atomi metala, izlazeći iz kristalne rešetke u okolinu, gube elektrone (elektrokemijska oksidacija), pri čemu primarno nastaju slobodni ioni, a oni tek sekundarnim procesima mogu dati molekule spoja koji je produkt korozije. Elektrolitska korozija se odvija u vodi, u vodenim otopinama kiselina, lužina, soli i drugih tvari, u vlažnom tlu, u sokovima biološkog porijekla, u talinama soli, oksida i hidroksida te u atmosferi. Atmosfera zapravo nije elektrolit, ali se atmosferska korozija zbiva uz oborine, odnosno u vodenom adsorbatu ili kondenzatu koji zbog vlažnosti zraka nastaju na površini metala i imaju karakter elektrolita. S obzirom na važnu ulogu koju onečišćenja zraka imaju u procesu atmosferske korozije često se odvojeno razmatra korozija u seoskoj (ruralnoj), morskoj (primorskoj), gradskoj i industrijskoj atmosferi.

Druga klasifikacija atmosferske korozije temelji se na klimi jer temperatura, vlažnost i oborine jako utječu na koroziju. Osobito je agresivna vlažna tropска (prašumska)

klima u kojoj gotovo uvijek vladaju visoke temperature i relativne vlažnosti, a usto obiluje oborinama. Elektrokemijska je korozija vrlo raširena jer je velik broj metalnih predmeta, strojeva i postrojenja izložen vodi ili vodenim otopinama, vlažnom tlu ili vlažnoj atmosferi. Posebno teški uvjeti u tom pogledu postoje u energetskim i metalurškim postrojenjima te u kemijskoj, prehrambenoj, tekstilnoj i metaloprerađivačkoj industriji.

Opisana podjela prema mehanizmu procesa i prema medijima koji ga izazivaju omogućuje sustavno proučavanje korozije metala, pa se najčešće primjenjuje. Klasifikacija korozije prema vrsti metala rjeđe se upotrebljava jer korozione pojave na različitim metalima često imaju mnogo zajedničkog, osobito s obzirom na mehanizam procesa, medij koji ga izaziva i izgled korozionskog napada.

Korozija nemetala u svim medijima je srodnina koroziji metala u neelektrolitima jer nemetali, uglavnom, nisu električni vodiči pa ne mogu izravnom elektrokemijskom reakcijom prijeći u ione. Korozija nemetala redovito se klasificira prema vrsti materijala jer se oni međusobno znatno razlikuju. Posebno velike razlike postoje između anorganskih i organskih nemetalnih materijala pa se pojave korozije na tim materijalima proučavaju odvojeno. Korozija nemetala samo je dio općeg procesa njihove degradacije ili razgradnje koji se obično promatra kao cjelina. Na nemetale mogu štetno utjecati i neki procesi korozije metala (npr. korozija čelične armature u poroznom betonu).

Klasifikacija korozije prema industrijskim granama (npr. u rudarstvu, metalurgiji te u kemijskoj i prehrambenoj industriji) ili prema vrstama postrojenja (npr. u generatorima pare, u sustavima za grijanje ili hlađenje, u motorima s unutrašnjim izgaranjem, na podzemnim cjevovodima itd.) nalazi opravdanje u specifičnosti pojave korozije u pojedinim granama industrije, odnosno na pojedinim vrstama postrojenja. Odvojeno proučavanje korozije prema industrijskim granama može biti korisno za pronalaženje i provedbu najracionalnijih metoda zaštite u određenom postrojenju.

Prema izgledu korozionskog napada, tj. prema raspodjeli na materijalu, korozija se dijeli na opću, lokalnu, selektivnu i interkristalnu.

Opća korozija zahvaća čitavu izloženu površinu materijala, a može biti ravnomjerna ili neravnomjerna. Treba istaknuti da, mikroskopski promatrano, ni ravnomjerna korozija nije svuda jednako brza, pa i uz nju glatka površina materijala postaje hrapavija. Ravnomjerna opća korozija tehnički je najmanje opasna jer se proces može lako pratiti i predvidjeti kada određeni dio treba popraviti ili ga zamijeniti novim. Do opće korozije dolazi kada je čitava površina materijala izložena agresivnoj sredini pod približno jednakim uvjetima s obzirom na

unutrašnje i vanjske faktore korozije. Ta je vrsta korozije najčešća na velikim plohamama (npr. limovima). Karakter opće korozije obično ima plinska korozija metala te atmosfersko hrđanje čelika i patiniranje bakra, bakrenih legura, nikla i srebra na otvorenom prostoru.

Najraširenija je pojava lokalne korozije koja napada samo neke dijelove izložene površine materijala. Ona je pjegasta, tj. ograničena na pojedine veće dijelove površine, ili točkasta (jamasta), tj. usko lokalizirana na žarištu približno kružnog presjeka, pri čemu je dubina oštećenja nakon dovoljno dugog vremena nekoliko puta veća od njegove širine na površini materijala (slika 2.). Razumljivo je da su pojave pjegaste, a pogotovo točkaste korozije mnogo opasnije od opće korozije jer je lokalni proces teže kontrolirati, pa često dolazi do iznenadnih havarija mada je gubitak materijala neznatan. To se obično pojavljuje na konstrukcijama koje su mehanički opterećene. Točkasta korozija naziva se i pitting (engl. pitting, nastajanje udubina). Točkasta korozija čelika, kroma i nehrdajućeg čelika česta je u kloridnim elektrolitima. Poseban oblik pjegaste ili točkaste korozije zapaža se pri dodiru dvaju dijelova u elektrolitu. Ako su ti dijelovi od različitih metala, dolazi do galvanske kontaktne korozije (bimetalne korozije), a ako se radi o dvama dijelovima od istog metalova ili od metala i nemetala, pojavljuje se pukotinska kontaktna korozija (korozija u procjepu između dijelova). U nekim se slučajevima žarišta pittinga šire u dubini materijala raslojavajući ga. Takva se korozija naziva potpovršinskom ili slojevitom, a najraširenija je na valjanim metalima u dodiru s morskom vodom i s kiselinama. Na površini materijala pritom često nastaju mjeđuri jer se u njegovoj unutrašnjosti gomilaju čvrsti korozionski produkti kojima je volumen veći od volumena metala.

Selektivna korozija napada samo jednu (ili samo neke) od faza ili komponenata višefaznog ili višekomponentnog materijala. Očito je da selektivna korozija može biti fazna samo na višefaznim materijalima (npr. grafitizacija sivog lijeva). Komponentna selektivna korozija obično se pojavljuje na jednofaznim legurama (npr. decinkacija mjeđi s  $>64\%$  Cu). Selektivna korozija može biti opća i lokalna, a češća je u elektrolitima nego u nedejstvu elektrolitima.

Interkristalna (intergranularna) korozija razara materijal na granicama zrna (granula, kristalita) šireći se na taj način u dubinu. Ova vrsta korozije se uglavnom pojavljuje na legurama. Amorfni materijali (npr. mnogi poliplasti) ne mogu, naravno, biti napadnuti na ovaj način. Interkristalna korozija je najopasniji oblik korozije jer može dugo ostati neprimjećena, a naglo smanjuje čvrstoću i žilavost materijala. Konačna je posljedica ovakve korozije lom ili čak raspad materijala u zrna.

Bitno je napomenuti da se u praksi više oblika korozije može pojaviti istodobno. Tako se npr. uz pitting pod određenim okolnostima pojavljuju opća ili pjegasta korozija. To je

osobito opasno ako su korodirane plohe pokrivene čvrstim korozijskim produktima koji prikrivaju piting. Općenito se može reći da produkti korozije, bilo čvrsti bilo otopljeni u agresivnoj sredini, redovito utječu na koroziski proces kao promjenjivi vanjski faktor. Osobite pojave korozije zapažaju se ispod zaštitnih prevlaka ili na mjestima njihova oštećenja (na porama, na pukotinama i sl.). Svakako su i zaštitne prevlake vrlo važan faktor korozije. U nekim slučajevima one djeluju i na geometrijski oblik korozije pa se, npr. ispod organskih premaza, često zbiva filiformna (vlaknasta, nitasta) korozija. Produkti korozije pritom stvaraju krivudave, kao vlas fine niti na površini materijala, što znači da je ova pojava posebni oblik lokalne korozije.<sup>[1]</sup>

JEDNOLIKA KOROZIJA



PJEGASTA KOROZIJA



JAMASTA KOROZIJA



IGLIČASTA (TOČKASTA)  
KOROZIJA



Slika 2. Različiti oblici korozije<sup>[2]</sup>

### 2.2.1. Atmosferska korozija

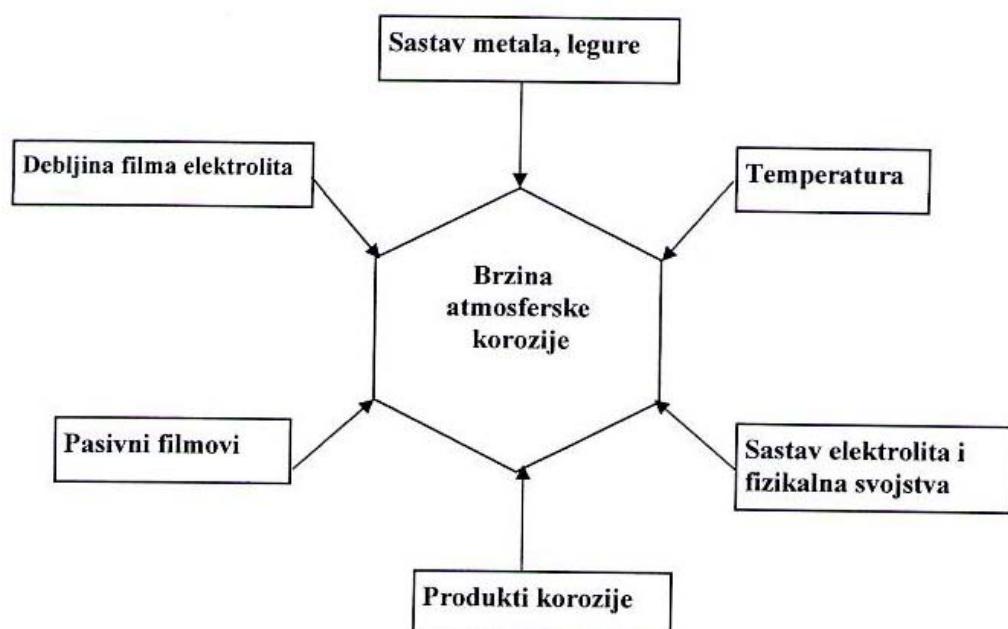
Atmosferska korozija je rezultat djelovanja kisika i vlage. Ukoliko jedan od čimbenika izostaje, neće doći do atmosferske korozije. Kada se metalna površina izlaže atmosferskim uvjetima na njoj nastaje tanki film elektrolita ukoliko je postignut određeni kritični nivo vlažnosti. Za željezo je kritični nivo vlažnosti 60%. U prisutnosti tankog filma elektrolita, atmosferska korozija se odvija u ravnoteži anodnih i katodnih reakcija. Anodna reakcija je reakcija oksidacije i ima za posljedicu otapanje metala, dok je katodna reakcija redukcija kisika. Kod atmosferske korozije u približno neutralnoj otopini elektrolita odvija se slijedeća katodna reakcija redukcije kisika:



Reakcija anodne oksidacije metala može se pojednostavljeno prikazati jednadžbom:



Na ukupnu brzinu anodnog otapanja metala utječu stvaranje korozijских produkata, topljivost korozijских produkata u površinskom elektrolitu i stvaranje pasivnog filma.<sup>[2]</sup>



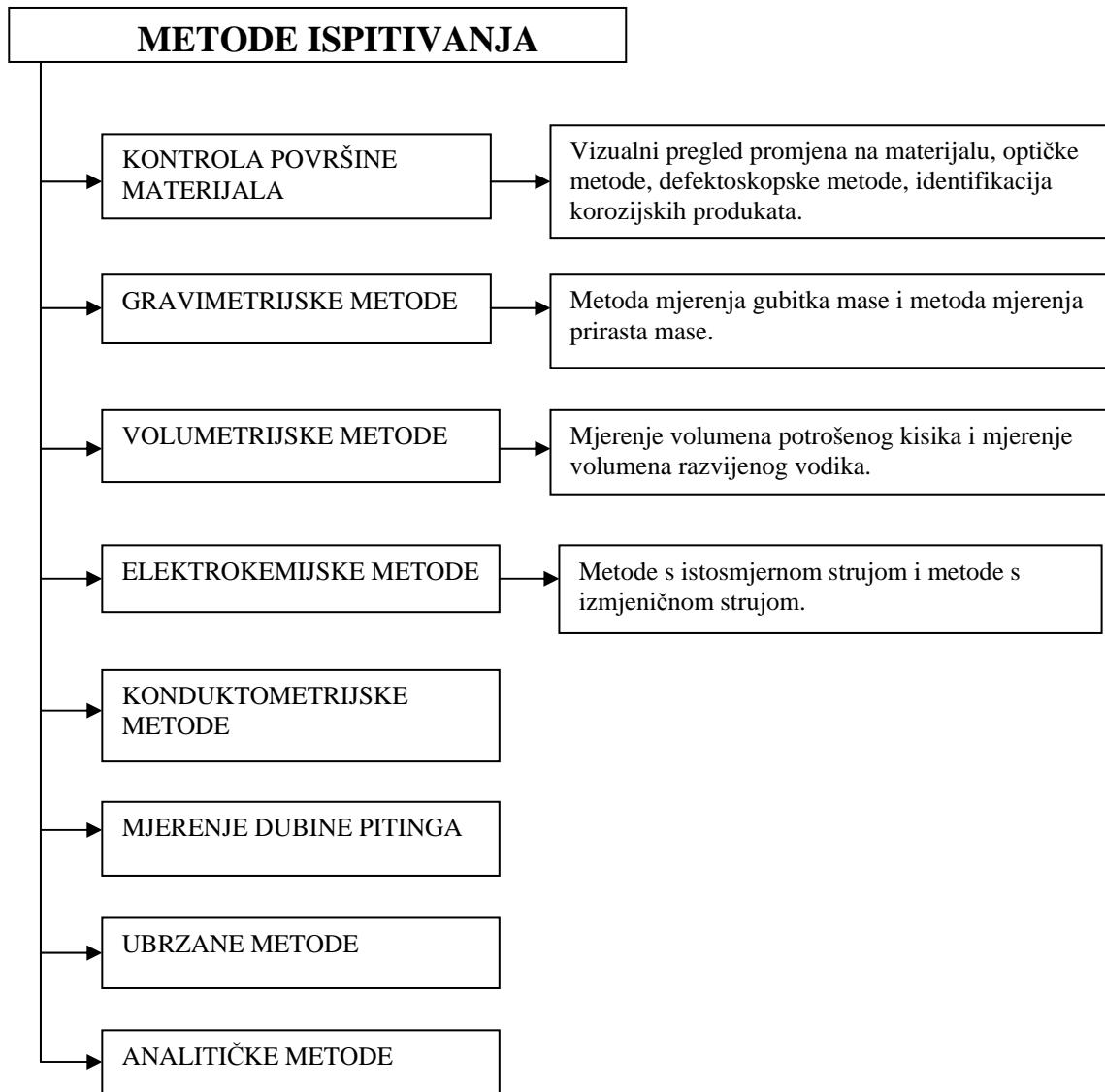
Slika 3. Čimbenici koji utječu na atmosfersku koroziju<sup>[2]</sup>

### **2.3. Korozija ispod izolacije**

Korozija ispod izolacije je degradacijski fenomen koji zahvaća cijevi i cjevovode u petrokemijskoj i drugim industrijama. Uklanjanje izolacije da bi se omogućio vizualni pregled cijevi je jako skupo pa su alternativne metode inspekcije, koje bi omogućile rano detektiranje problema ispod izolacije, jako poželjne. Korozija ispod izolacije se događa zbog prisutnosti vlage i kisika kad je temperatura cijevi između -10°C i 175°C. Kisik je prisutan u svim izolacijskim sustavima a vlaga može biti uzrokovana prodiranjem kroz izolaciju ili kondenzacijom. <sup>[3]</sup>

### **2.4. Metode ispitivanja korozije**

Ispitivanje korozije može biti laboratorijsko, eksploatacijsko (pogonsko) i terensko. Razlika je u tome što se laboratorijska ispitivanja provode na uzorcima, najčešće ubrzanim metodama, dok se eksploatacijska i terenska provode u stvarnim uvjetima na predmetima od uporabne vrijednosti. <sup>[1]</sup> *Slika 4.* prikazuje metode ispitivanja korozije.



*Slika 4.* Metode ispitivanja korozije

#### 2.4.1. Vizualna analiza korozije

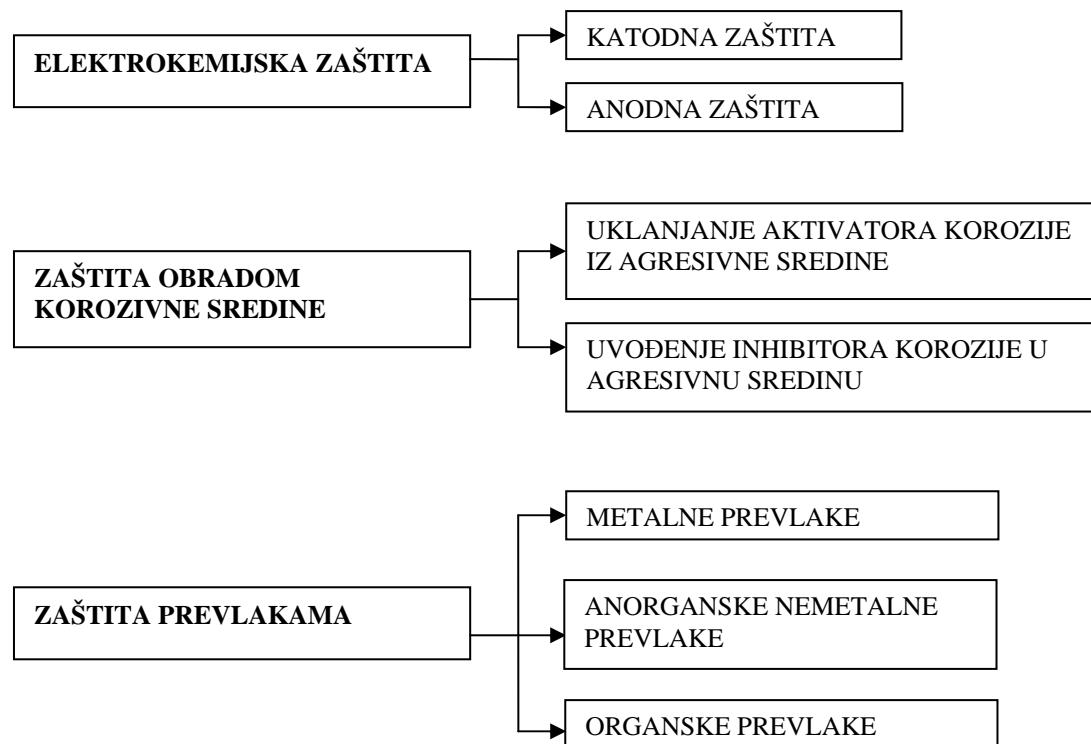
Usprkos visokoj razini instrumentalne tehnike još je uvjek najvažnija kvalitativna metoda ispitivanja korozije vizualni pregled. Njime se prate promjene uočljive na materijalu ili u agresivnom mediju. Pregled se obavlja prije i poslije izlaganja mediju, a često i u toku ispitivanja, po mogućnosti bez prekida izlaganja.

Vizualnim pregledom može se utvrditi da li je uopće došlo do korozije, da li je ona zahvatila cijelu izloženu površinu ili samo određeni dio površine, da li su nastali čvrsti koroziski produkti, koje boje su ti produkti, određene karakteristike produkata korozije, itd. Metoda vizualne analize korozije je jednostavna i primjenjiva je na svim vrstama korozije.

Osnovni nedostatak ove metode je subjektivnost. Iz tog razloga usporedno s ovom metodom primjenjuju se i druge metode. <sup>[1]</sup>

## 2.5. Korozija zaštita

Korozijijski procesi su u suštini spontani procesi između metala i komponenata okoline pri čemu metali prelaze u termodinamički stabilnije stanje. Korozija smanjuje uporabnu vrijednost metala, skraćuje vijek trajanja konstrukcija, poskupljuje njihovo održavanje, uzrokuje gubitke u proizvodnji, havarije, nesreće, zastoje u radu, ugrožava zdravlje ljudi i dr. Ekonomsko značenje korozije je veliko, raste industrijalizacijom i potrebno mu je posvetiti posebnu pažnju. Naime, četvrtina šteta od korozije može se spriječiti primjenom suvremenih tehnologija zaštite. Metal se od procesa korozije može zaštititi na različite načine: elektrokemijskom zaštitom, zaštitom obradom korozivne sredine te zaštitom prevlakama (slika 5.). <sup>[2]</sup>



Slika 5. Različite metode zaštite od korozije

## **2.5.1. Inhibitori**

Inhibitori korozije se definiraju kao tvari koje dodane u malim količinama u agresivni medij mogu u velikoj mjeri smanjiti brzinu korozije metala.

Primjena inhibitora se većinom odnosi na atmosfersku koroziju, vodene sustave te primarnu i sekundarnu tehnologiju nafte.

Prilikom izbora inhibitora važno je voditi računa o metalu kojeg je potrebno zaštititi te o sredini i uvjetima u kojima se metal nalazi.

Neke od glavnih klasifikacija inhibitora su prema sastavu i svojstvima, prema sigurnosti i prema mehanizmu djelovanja.

Prema sastavu i svojstvima se mogu podijeliti na više kategorija:

- anorganski i organski
- alkalni i neutralni
- hlapivi i nehlapivi
- oksidirajući i neoksidirajući i dr.

Prema sigurnosti mogu biti sigurni i nesigurni. Ova klasifikacija odnosi se na vrstu korozije koja će nastupiti kada je koncentracija inhibitora ispod minimalne ili kritične vrijednosti. Naime, ako je prisutan u nedovoljnoj koncentraciji, sigurni inhibitor će omogućiti nastavak samo jednolikog (uniformnog) tipa korozije s brzinom ne većom nego što je ona u neinhibiranom stanju, dok opasni inhibitor omogućava pojačanu koroziju, redovito lokaliziranu koroziju i u mnogim slučajevima čini više štete nego odsutnost inhibitora.

Prema mehanizmu djelovanja inhibitori se dijele na anodne koji koče anodnu reakciju, katodne koji koče katodnu reakciju i mješovite koji koče i anodnu i katodnu reakciju.<sup>[2]</sup>

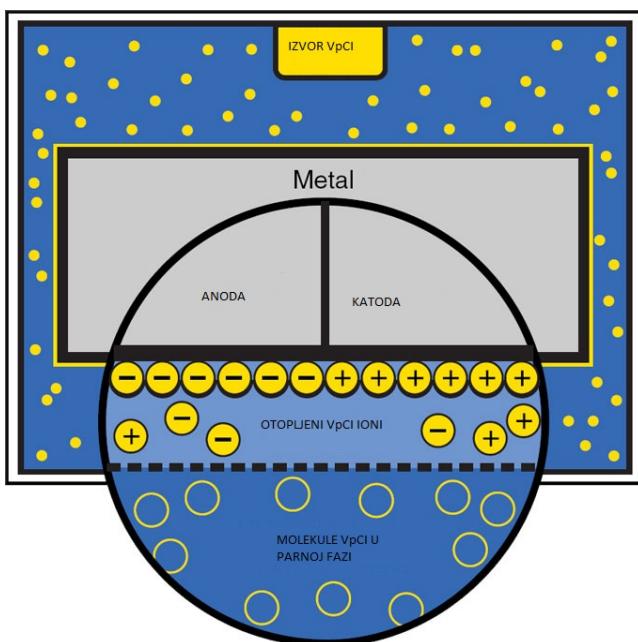
### 2.5.1.1. Parnofazni inhibitori korozije (VpCI- Vapor phase corrosion inhibitors)

Parnofazni inhibitori korozije su hlapljive čvrste organske tvari čijim se parama zasićuje atmosfera ili drugi plin. Označavaju se sa VCI (od engleskog naziva Volatile corrosion inhibitor) ili VpCI (od engleskog naziva Vapor phase corrosion inhibitors). Najčešće se koriste za sprječavanje atmosferske korozije u zatvorenim prostorima, tijekom skladištenja ili transporta.

Parnofazni inhibitori usporavaju anodni ili katodni proces adsorpcijom na površinu metala. Komponente parnofaznih inhibitora moraju imati dovoljno visok tlak para kao i sposobnost stvaranja stabilne veze s površinom metala. Inhibitor mora imati optimalan tlak para kako bi bio djelotvoran. Ukoliko inhibitor ima previsok tlak para doći će do brzog oslobađanja velike količine inhibitora i kratkotrajne zaštite. Ako je tlak para nizak, osigurana je duža i postojanija zaštita, ali je nedostatak taj što treba puno više vremena za postizanje zaštitne koncentracije. Na slici 6. prikazan je mehanizam djelovanja parnofaznih inhibitora.

Parnofazni inhibitori su najčešće organski spojevi s dušikovim atomom koji, zahvaljujući slobodnom elektronskom paru, stvara koordinativne veze s metalima. Sastoje se od alifatskih i cikličkih amina, karboksilata ili nitrita s visokim tlakom para. Sloj inhibitora na površini metala predstavlja difuzijsku barijeru kisiku i smanjuje reakciju katodne redukcije. Djelotvornost parnofaznih inhibitora raste s porastom duljine lanca alifatskih kiselina.<sup>[2]</sup>

Parnofazni inhibitori se koriste u obliku praha ili se njihovom alkoholnom otopinom natapaju papiri, odnosno spužvaste tvari.



Slika 6. Mehanizam djelovanja parnofaznih inhibitora<sup>[4]</sup>

## 2.6. Čelik

U literaturi postoji nekoliko definicija čelika. Europske norme definiraju čelik kao željezni materijal pogodan za topnu preradu. Također, čelik se može definirati kao slitina (legura) željeza i ugljika (<2%) sa ili bez dodatka ostalih legirajućih elemenata. Korisne primjese u čeliku su npr. krom, nikal, molibden itd., dok su štetni uglavnom fosfor i sumpor. Pored navedenih elemenata čelik može sadržavati i oligoelemente (bakar, kositar, arsen i dr.), te plinove (kisik, dušik, vodik) koji u pravilu pogoršavaju svojstva konačnog proizvoda. Važnost čelika u razvoju civilizacije očituje se u činjenici da je trenutna godišnja količina proizvedenog čelika u svijetu oko deset puta veća od ukupne proizvedene količine svih ostalih metala i legura. Godišnje se u svijetu proizvede više od milijardu tona čelika.



Slika 7. Otpadni čelik spremан за recikliranje [5]

Višestruka upotreba čelika prvenstveno proizlazi iz njegovih uporabnih svojstava odnosno mogućnosti postizanja dobre kombinacije čvrstoće, žilavosti, rastezljivosti, oblikovanja deformiranjem, promjene sastava legiranjem, toplinskom obradom itd. Osnovna svojstva čelika ovise o kemijskom sastavu, mikrostrukturi, te stanju, obliku i dimenzijama gotovog proizvoda. Zbog ekonomičnog načina proizvodnje (u odnosu na druge metalne materijale) i povoljnih svojstava čelik može poslužiti za raznovrsnu primjenu. Čelik se kao

materijal koristi u svim granama industrije, prometu, građevinarstvu, poljoprivredi, obrtništvu kao i svim drugim djelatnostima.

Ovisno o kemijskom sastavu čelike se može podijeliti u dvije osnovne grupe: specijalni (posebni) i masovni čelici. Pojam "specijalni" čelik podrazumijeva željezne legure koje se svojim posebnim svojstvima razlikuju od uobičajenih masovnih čelika. Takva posebna svojstva se mogu postići na tri načina: utjecajem na kemijski sastav, proizvodnjom te preradom čelika. Čelik se smatra posebnim ukoliko su mu svojstva poboljšana barem jednim od tri spomenuta načina. Opća podjela čelika prema namjeni prikazana je pregledno na slici 8.

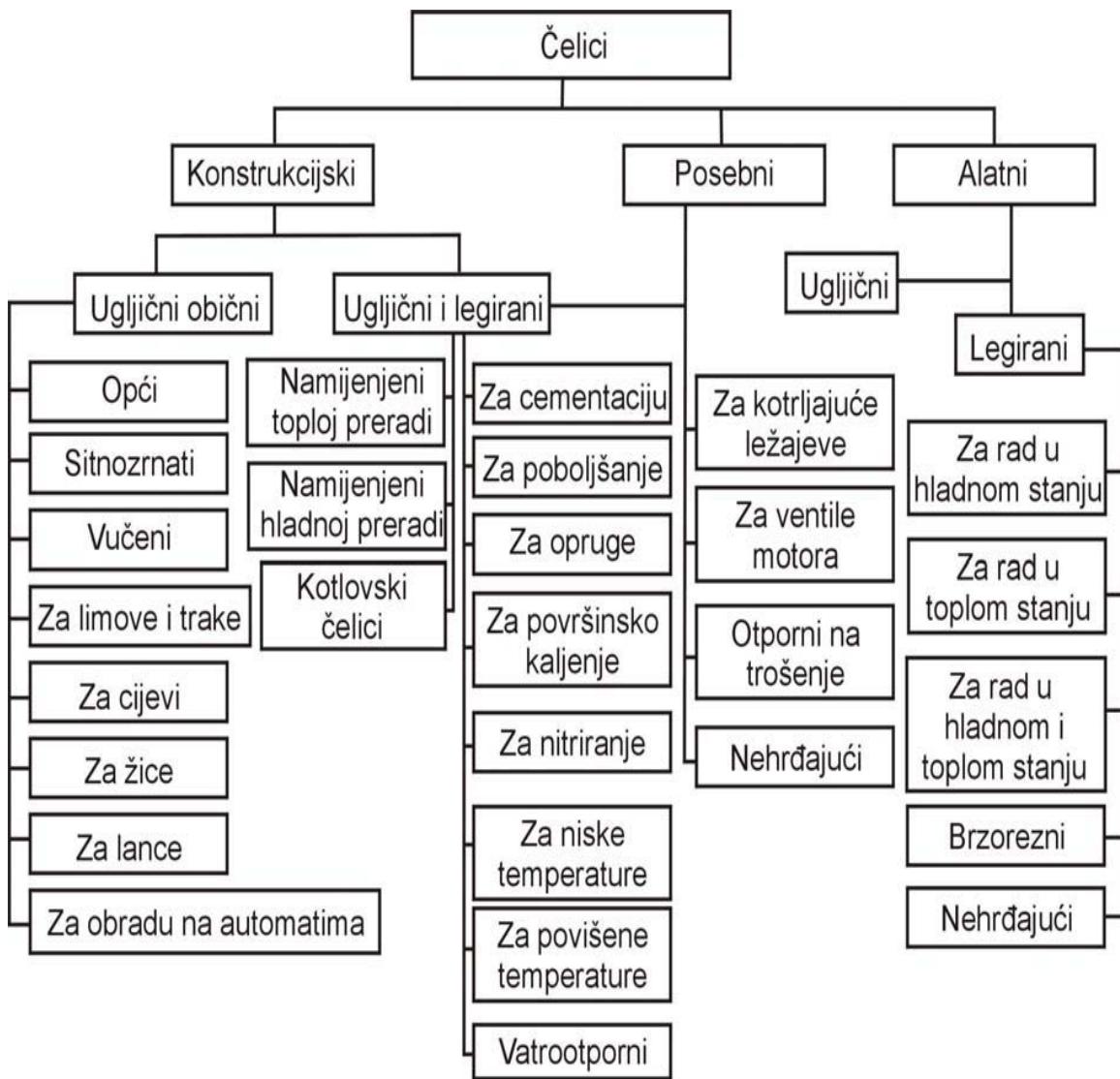
E. Houdremont definira specijalne čelike kao željezne legure, koje odgovaraju definiciji čelika, ali se od "običnih" (masovnih) čelika razlikuju po specijalnim svojstvima.<sup>[6]</sup> Specijalni čelici su uglavnom legirani s jednim ili više elemenata. Dobivanje specijalnih čelika najčešće se provodi pojedinačnim ili kombiniranim legiranjem sa silicijem, manganom, kromom, niklom, volframom, molibdenom, vanadijem, kobaltom, titanom, bakrom, aluminijem, borom, niobijem, tantalom i dr. Glavni uvjet da bi neki od navedenih elemenata bio legirajući je da njegov maseni udio bude viši od određene granične vrijednosti (*tablica 1*). Ukoliko se u nekom čeliku utvrди niži udio elementa od granične vrijednosti navedene u *tablici 1*, tada se takav element smatra primjesom koja je u čelik dospjela nemljerno tijekom procesa proizvodnje. U *tablici 2*. prikazane su granične vrijednosti masenih udijela elemenata u ugljičnom čeliku.

*Tablica 1.* Granične vrijednosti sadržaja elemenata (mas.%) između nelegiranih i legiranih čelika prema pojedinim normama [6]

| Element                      | HRN EN<br>10020:2000 | ISO 4948/1 | HRN C.B0.002 |
|------------------------------|----------------------|------------|--------------|
| Al                           | 0,30                 | 0,10       | 0,10         |
| B                            | 0,0008               | 0,0008     |              |
| Bi                           | 0,10                 | 0,10       | 0,10         |
| Co                           | 0,30                 | 0,10       | 0,10         |
| Cr                           | 0,30                 | 0,30       | 0,30         |
| Cu                           | 0,40                 | 0,40       | 0,40         |
| La (lantanidi)               | 0,10                 | 0,05       |              |
| Mn                           | 1,65 <sup>a)</sup>   | 1,65       | 0,80 (1,80)  |
| Mo                           | 0,08                 | 0,08       | 0,08         |
| Nb                           | 0,06                 | 0,06       |              |
| Ni                           | 0,30                 | 0,30       | 0,30         |
| Pb                           | 0,40                 | 0,40       |              |
| Se                           | 0,10                 | 0,10       |              |
| Si                           | 0,60                 | 0,60       | 0,60         |
| Te                           | 0,10                 |            |              |
| Ti                           | 0,05                 | 0,05       | 0,05         |
| V                            | 0,10                 | 0,10       | 0,01         |
| W                            | 0,30                 | 0,10       | 0,10         |
| Zr                           | 0,05                 | 0,05       |              |
| ostali<br>(osim C, P, S I N) | 0,10                 |            |              |

a) ako je utvrđen samo najveći udjel mangana, granična je vrijednost 1,80% i ne primjenjuje se pravilo 70%

Ukoliko je zbroj masenih udjela svih legirajućih elemenata prisutnih u čeliku ispod 5% takav čelik se smatra niskolegiranim. Visokolegirani čelik sadrži ukupno  $\geq 5\%$  legirajućih elemenata. Međutim, u skupinu specijalnih čelika mogu se ubrojiti i ugljični nelegirani čelici posebnih svojstava (npr. kvalitetni konstrukcijski čelici, alatni nelegirani čelici, čelici za hladno oblikovanje i dr.).



Slika 8. Opća podjela čelika prema namjeni [6]

Tablica 2. Granične vrijednosti elemenata u ugljičnim čelicima [7]

| Element | Maseni % |
|---------|----------|
| C       | 1,00     |
| Cu      | 0,60     |
| Mn      | 1,65     |
| P       | 0,40     |
| Si      | 0,60     |
| S       | 0,05     |



Slika 9. Atmosferska korozija čelika [8]

## **2.7. Izolacija**

### **2.7.1. Staklena vuna**

Staklena vuna se ubraja u grupu mineralnih toplinsko-izolacijskih materijala i sastoji se od tankih i elastičnih staklenih niti. Sirovine za proizvodnju staklene vune i staklenih vlakana su stakleni otpad i osnovne sirovine za proizvodnju stakla (kvarcni pjesak, vapnenac, soda, itd.). U novije vrijeme se za proizvodnju staklene vune sve više koristi stakleni otpad (prozorska stakla, staklena ambalaža). Udio otpada u sirovini se kreće 30-60%, a u pojedinim tvornicama i do 80%.

Proizvodnja staklene vune sastoji se od dvije faze:

- dobivanje silikatno – staklene taljevine
- dobivanje tankih staklenih niti iz taljevine

Tanka staklena vlakna i staklena vuna mogu se dobiti na jedan od sljedeća tri načina, ili njihovom kombinacijom:

- izvlačenjem niti iz rastopljene staklene mase kroz sita s malim otvorima (2-3 mm) i motanjem na koloture koji se okreću velikom brzinom, pri čemu se dobivaju niti duge i do nekoliko desetaka kilometara
- rasprskavanjem staklene taljevine upuhavanjem pare ili plina pod visokim tlakom, pri čemu se dobiva kratka i gruba staklena vuna
- centrifugalnom metodom s horizontalnim pločama koje se okreću.

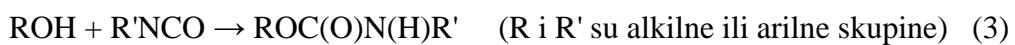
[9]



Slika 10. Staklena vuna<sup>[10]</sup>

### 2.7.2. Poliuretanska pjena

Poliuretan (PUR) je polimer sastavljen od lanca organskih jedinica povezanih karbamatnim (uretanskim) vezama. Poliuretanski polimeri nastaju spajanjem dva ili više funkcionalnih monomera. Jedan sadrži dvije ili više izocijanatne grupe ( -N=C=O ) a drugi sadrži dvije ili više hidroksilne grupe ( -OH ). Spajanjem alkoholne i izocijanatne skupine nastaje uretanska veza:



Ova reakcija, koja se često naziva kondenzacijom, obično zahtjeva prisutnost katalizatora. Često se koriste i komplikiraniji monomeri.<sup>[11]</sup>

PUR pjena se koristi za izolaciju gotovo svih cjevovoda u kojima je bitno da temperatura ostane nepromijenjena. PUR pjena bolje kvalitete je nepropustljiva što znači da voda ne može prodrijeti kroz materijal. To je posebno važno kod izolacije "hladnih" cijevi jer se na taj način spriječava nakupljanje vlage između izolacijskog materijala i površine cijevi što uvelike pospješuje koroziju.<sup>[12]</sup>



*Slika 11.* Cijevi izolirane poliuretanskom pjenom <sup>[13]</sup>

### **3. EKSPERIMENTALNI DIO**

Eksperimentalni dio ovog rada proveden je u tvrtci Cortec Corporation koja proizvodi inhibitore korozije. Jedan od njihovih proizvoda, VpCI-658, koristi se za zaštitu cijevi od ugljičnog čelika ispod izolacije, međutim nije poznato kako se ponašanje tog proizvoda mijenja s promjenom temperaturnih uvjeta u kojima se nalazi, drugim riječima, nije poznato koji su granični temperaturni uvjeti u kojima inhibitor djelotvorno štiti ugljični čelik. Upravo pronalaženje tih uvjeta je bio glavni cilj ovog rada. Uz to, ispitivane su i moguće zamjene za VpCI-658.

Najveći dio ispitivanja je rađen na pločicama od ugljičnog čelika. Tek krajnji dio eksperimanta je izведен na cijevima ispod izolacije.

Provedena testiranja se mogu podijeliti u 3 skupine:

- 1) Ispitivanje migracijskih svojstava proizvoda. Ova skupina se dalje dijeli na migraciju na izolacijskim materijalima i na migraciju na metalnoj (čeličnoj) površini.
- 2) Ispitivanje promjene svojstava proizvoda toplinskim tretiranjem. Ova skupina može se dalje podijeliti na tretiranje proizvoda prije i nakon nanošenja na čelične pločice na kojima su testiranja vršena. Također treba napomenuti da se toplinsko tretiranje dijeli na grijanje i hlađenje.
- 3) Migracija i zaštita ispod izolacije.

#### **3.1. Ispitivanje migracijskih svojstava inhibitora**

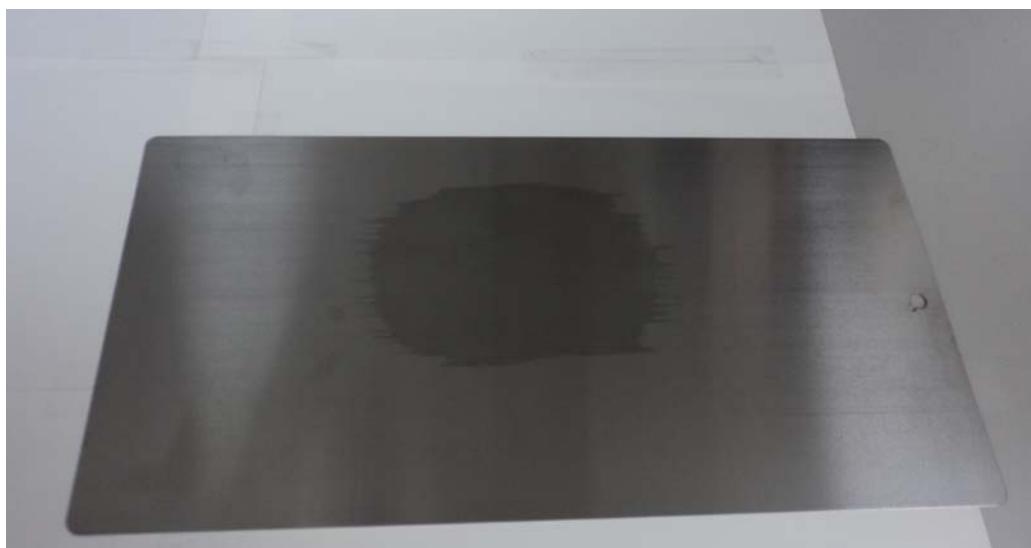
Cilj migracijskih testova bio je usporediti migracijska svojstva ispitivanih proizvoda. Kod migracije na metalnoj površini također je ispitano ima li površina migracije linearnu ovisnost o broju kapi.

##### **3.1.1. Migracijski test na izolaciji**

Migracijski test na izolacijskim materijalima izведен je tako da se svakome od četiri proizvoda dodalo 0,1% (maseni) UV boje (RM – 942). Tako pripremljeni uzorci su kapaljkom nanijeti na materijal i to po tri kapi svakog uzorka na oba materijala. Zatim je pod UV lampom praćena migracija uzorka i to 10 min, 1 h i 15 min te 3 dana nakon nanošenja.

### **3.1.2. Migracijski test na metalnoj površini**

Migracijski test na metalnoj površini je izведен na poliranim čeličnim pločama dimenzija 6x12". UV boja u ovom slučaju nije bila potrebna jer je mrlja bila jasno vidljiva. Za svaki od četiri proizvoda bile su potrebne tri ploče; na jednu je nanešena jedna kap, na drugu dvije i treću tri. Nakon nanošenja ploče su stavljene pod plastične poklopce da bi se spriječilo prekomjerno isparavanje i padanje prašine na uzorke. Nakon tri dana izmjerena je površina migracije.



*Slika 12. Migracijski test na metalnoj ploči*

### **3.2. Ispitivanje promjene svojstava inhibitora toplinskim tretiranjem**

Ispitivanja promjene svojstava proizvoda toplinskim tretiranjem izvedena su na pločicama od ugljičnog čelika dimenzija 3x5". Kao što je već rečeno, ovaj dio ispitivanja podijeljen je na tretiranje prije i poslije nanošenja inhibitora. Moram napomenuti da je, zbog vremenskog ograničenja, puno veća pažnja posvećena toplinskom tretiranju nakon nanošenja što je i puno važnije jer je bliže realnoj situaciji nanošenja proizvoda na cijevi ispod izolacije.

### **3.2.1. Toplinsko tretiranje inhibitora prije nanošenja**

Prije svega, za usporedbu je napravljen test sa netretiranim proizvodom, VpCI-658. Pločice su umočene u proizvod i ostavljene da se suše jedan dan. Bitno je napomenuti da se za svaki takav test istovremeno stavlja barem tri pločice u iste uvijete od kojih je jedna kontrolna (pločica koja nije zaštićena proizvodom). Nakon sušenja pločice se stavljuju u klima komoru gdje se vizualnim pregledom prati napredak korozije. Isti postupak je i sa tretiranjem proizvoda prije nanošenja na pločice osim što se prethodno svemu tome proizvod grije određeno vrijeme na određenoj temperaturi.

### **3.2.2. Toplinsko tretiranje inhibitora nakon nanošenja**

Kod tretiranja nakon nanošenja pločice se najprije urone u proizvod i osuše a zatim stavljaju na grijanje ili hlađenje na određeno vrijeme na određenoj temperaturi. Nakon toga se stavljaju u klima komoru.

## **3.3. Ispitivanja migracije i zaštite ispod izolacije**

Ispitivanja migracije i zaštite ispod izolacije su vršena sa netretiranim proizvodom. Kao izolacijski materijal korištene su staklena vuna i poliuretanska pjena. Cijevi su najprije ispolirane, isprane i osušene. Nakon toga su omotane u izolaciju i na krajevima zatvorene najlonom i ljepljivom trakom. Zatim su injekcijom ubrizgani proizvodi ispod izolacije na jedan kraj cijevi. Ispod staklene vune ubrizgano je 30 ml a ispod PUR pjene 10 ml. To je zato jer staklena vuna upija proizvod pa tako ne dozvoljava dobru migraciju dok je PUR pjena nepromočiva. Cijevi su ostavljene u sobnim uvjetima preko vikenda te su nakon toga stavljene u klima komoru gdje su provele 7 dana. I u ovom ispitivanju je jedna cijev bila kontrolna.

### 3.4. Klima komora

Posebno konstruirane klima komore su automatizirani termostatsko-higrostatski uređaji koji simuliraju uvijete atmosferske korozije. Klima komore pružaju velike mogućnosti ispitivanja ubrzane atmosferske korozije jer se u njima može odabrati mikroklimaširokog raspona temperature ( od -50°C do 80°C) i relativne vlažnosti (od 10% do 100%) što znači da mogu simulirati uvijete pustinjske, tropske i polarne klime.



Slika 13. Klima komora <sup>[14]</sup>

Ispitivanja u ovom radu provedena su u klima komori tvrtke Kohler instrument, model K35200, gdje tjedan dana provedenih unutar nje predstavlja približno 6 mjeseci izloženosti stvarnoj korozivnoj atmosferi. Ispitivanja su provedena pri temperaturi od 38°C i relativnoj vlažnosti od 95%. Jedan dio komore ispunjen je otopinom elektrolita ( $0,2 \text{ g/dm}^3 \text{ NaNO}_3$ ,  $0,2 \text{ g/dm}^3 \text{ Na}_2\text{SO}_4$  i  $0,2 \text{ g/dm}^3 \text{ NaHCO}_3$ ,  $\text{pH} = 3$ ) koja se tijekom rada komore raspršuje kao aerosol unutar nje i na taj način dolazi u doticaj s pločicama.

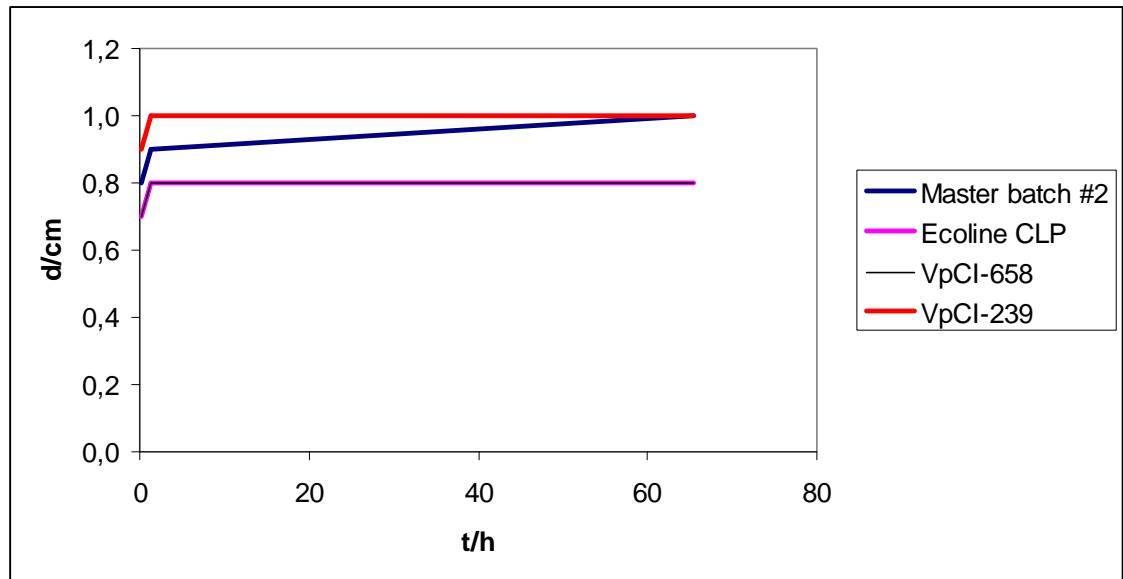
## **4. REZLTATI**

### **4.1. Ispitivanje migracijskih svojstava inhibitora**

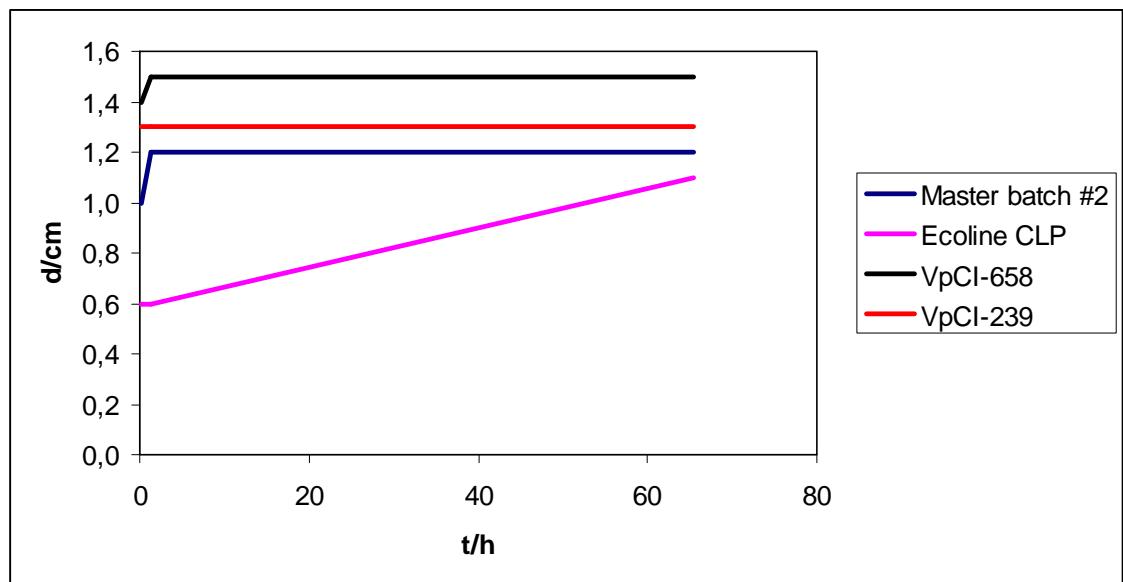
#### **4.1.1. Migracijski test na izolaciji**

*Tablica 3.* Migracija inhibitora na izolacijskim materijalima

|               |                 | Vrijeme nakon nanošenja [h] |     |     |
|---------------|-----------------|-----------------------------|-----|-----|
| Materijal     | Inhibitor       | Promjer migracije [cm]      |     |     |
| Staklena vuna | Master batch #2 | 0.8                         | 0.9 | 1   |
|               | Ecoline CLP     | 0.7                         | 0.8 | 0.8 |
|               | VpCI - 658      | 0.7                         | 0.8 | 0.8 |
|               | VpCI - 239      | 0.9                         | 1   | 1   |
| PUR pjena     | Master batch #2 | 1                           | 1.2 | 1.2 |
|               | Ecoline CLP     | 0.6                         | 0.6 | 1.1 |
|               | VpCI - 658      | 1.4                         | 1.5 | 1.5 |
|               | VpCI - 239      | 1.3                         | 1.3 | 1.3 |



Slika 14. Migracijski test na staklenoj vuni



Slika 15. Migracijski test na PUR pjeni

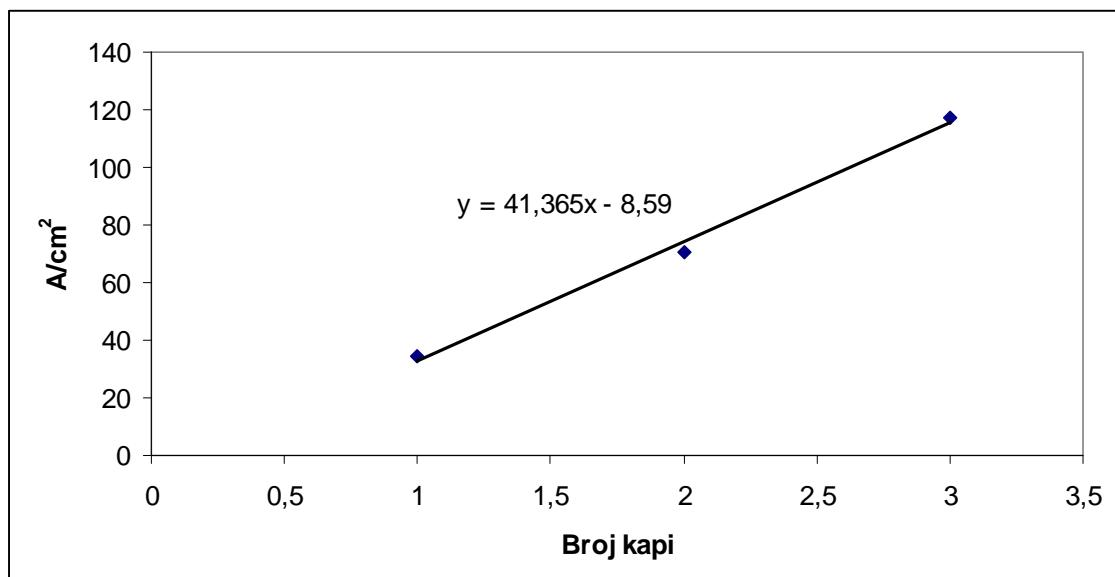
#### 4.1.2. Migracijski test na metalnoj površini

Tablica 4. Migracijski test na metalnoj površini

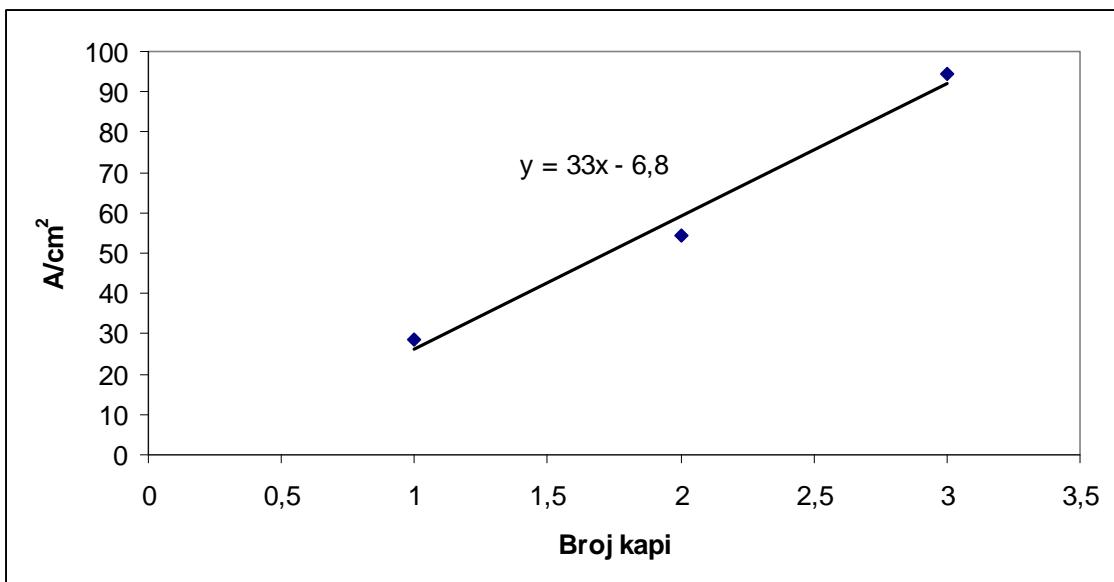
| VpCI-658  |                             | VpCI-239  |                             |
|-----------|-----------------------------|-----------|-----------------------------|
| Broj kapi | Površina [cm <sup>2</sup> ] | Broj kapi | Površina [cm <sup>2</sup> ] |
| 1         | 34,48                       | 1         | 28,62                       |
| 2         | 70,73                       | 2         | 54,36                       |
| 3         | 117,21                      | 3         | 94,62                       |

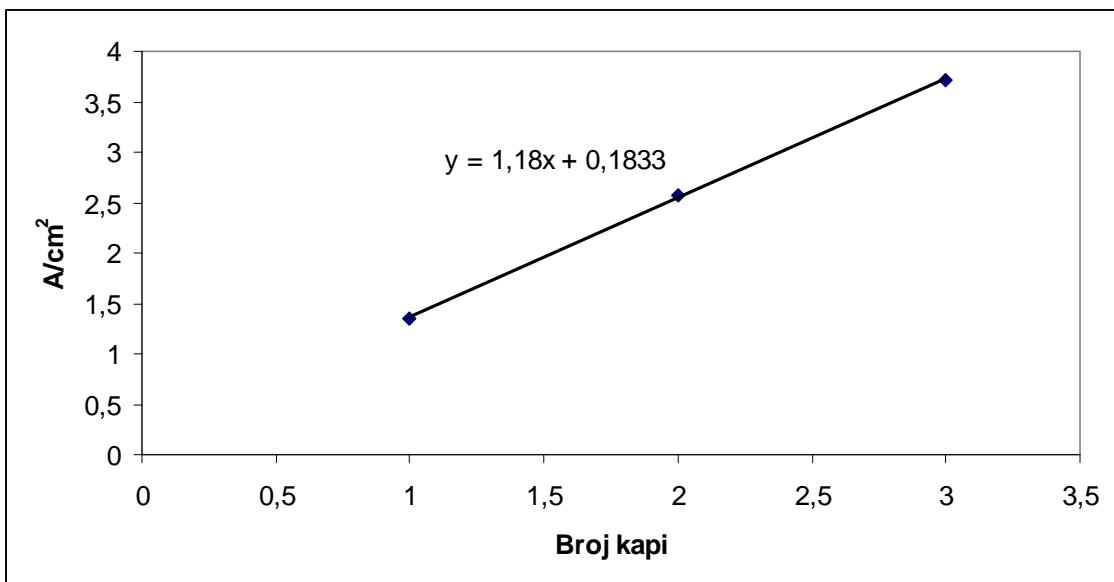
| Ecoline CLP |                             | Master batch #2 |                             |
|-------------|-----------------------------|-----------------|-----------------------------|
| Broj kapi   | Površina [cm <sup>2</sup> ] | Broj kapi       | Površina [cm <sup>2</sup> ] |
| 1           | 1,35                        | 1               | 76,96                       |
| 2           | 2,57                        | 2               | 108,58                      |
| 3           | 3,71                        | 3               | 244,37                      |



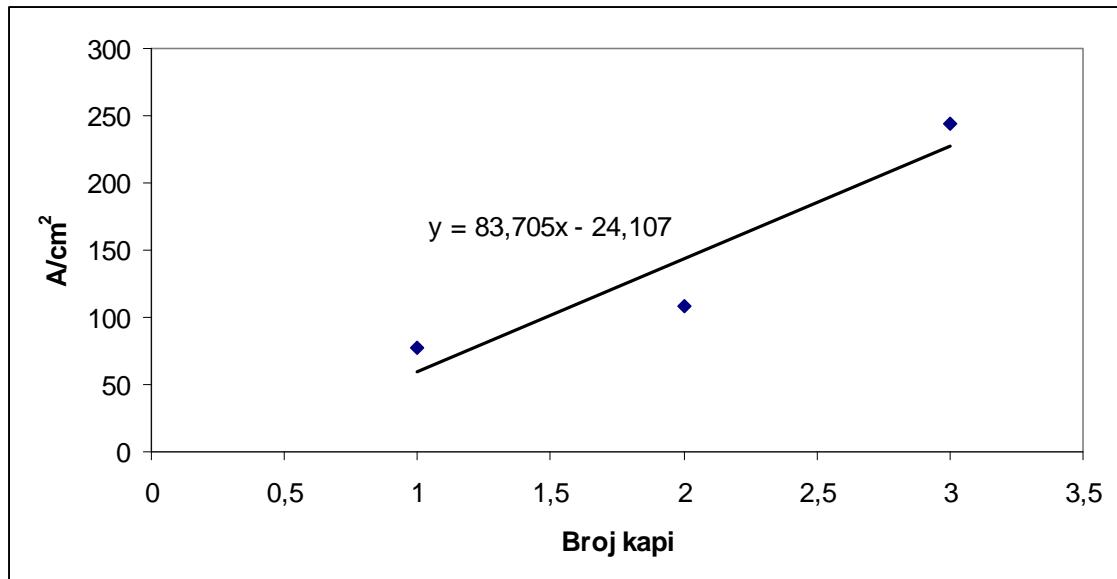
Slika 16. Grafički prikaz ovisnosti migracijske površine o broju kapi za VpCI-658



Slika 17. Grafički prikaz ovisnosti migracijske površine o broju kapi za VpCI-239



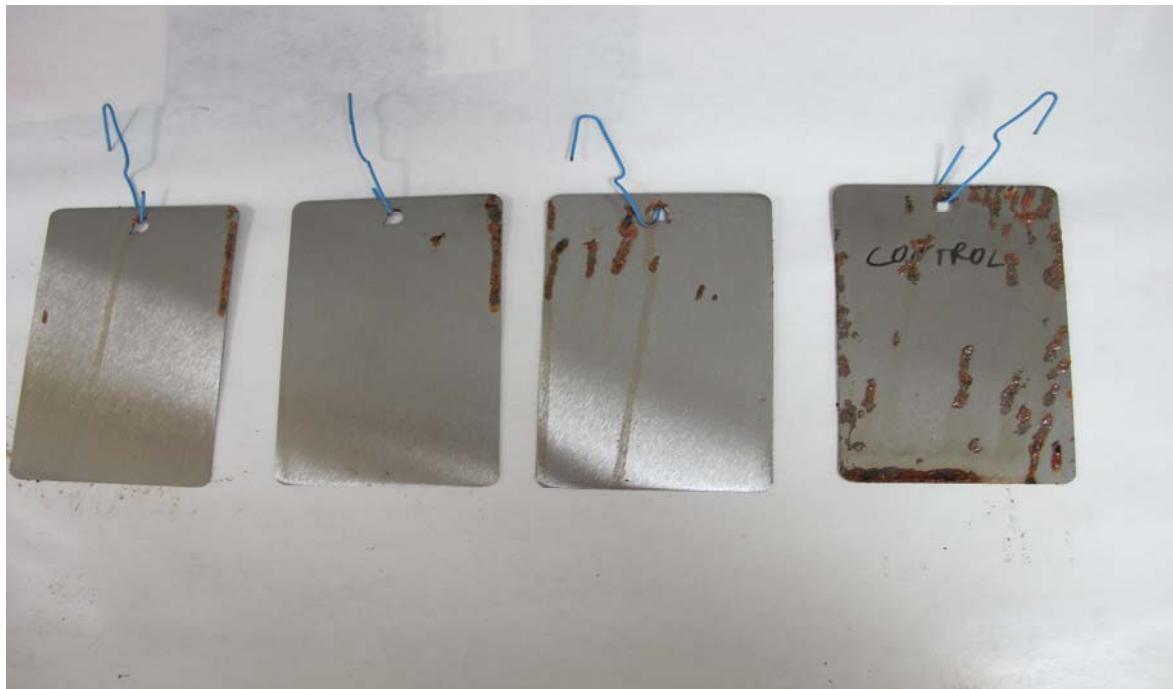
Slika 18. Grafički prikaz ovisnosti migracijske površine o broju kapi za Ecoline CLP



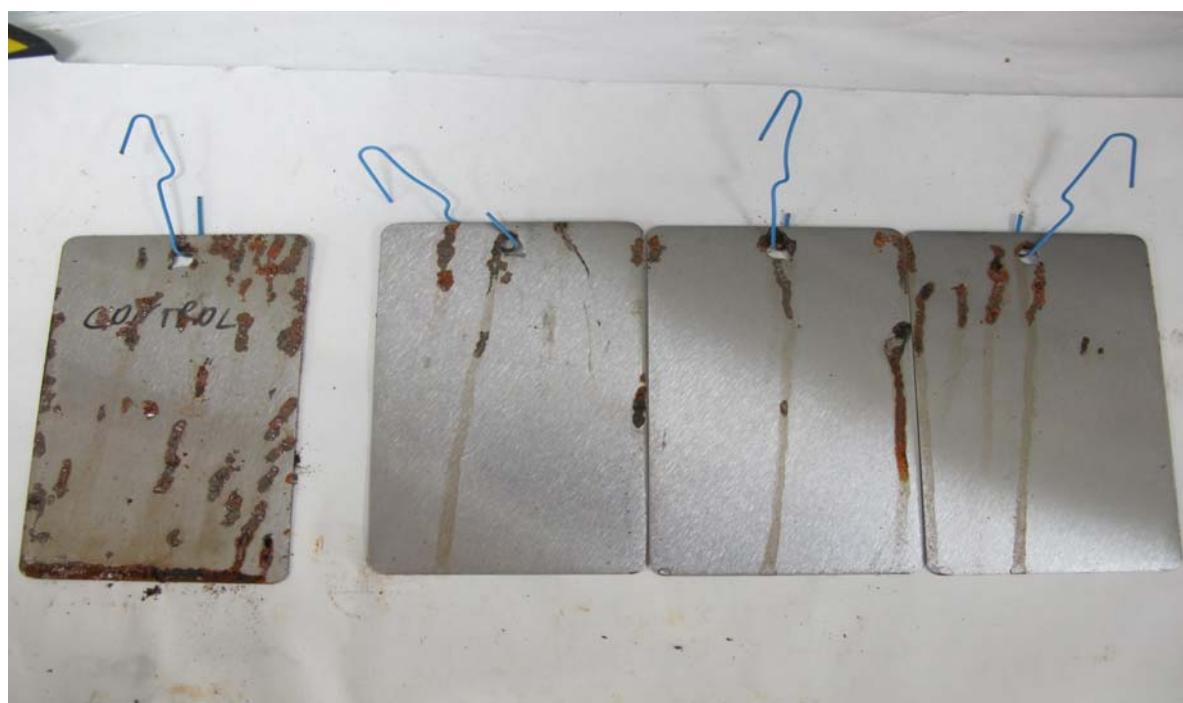
Slika 19. Grafički prikaz ovisnosti migracijske površine o broju kapi za Master batch#2

## 4.2. Ispitivanje promjene svojstava inhibitora toplinskim tretiranjem

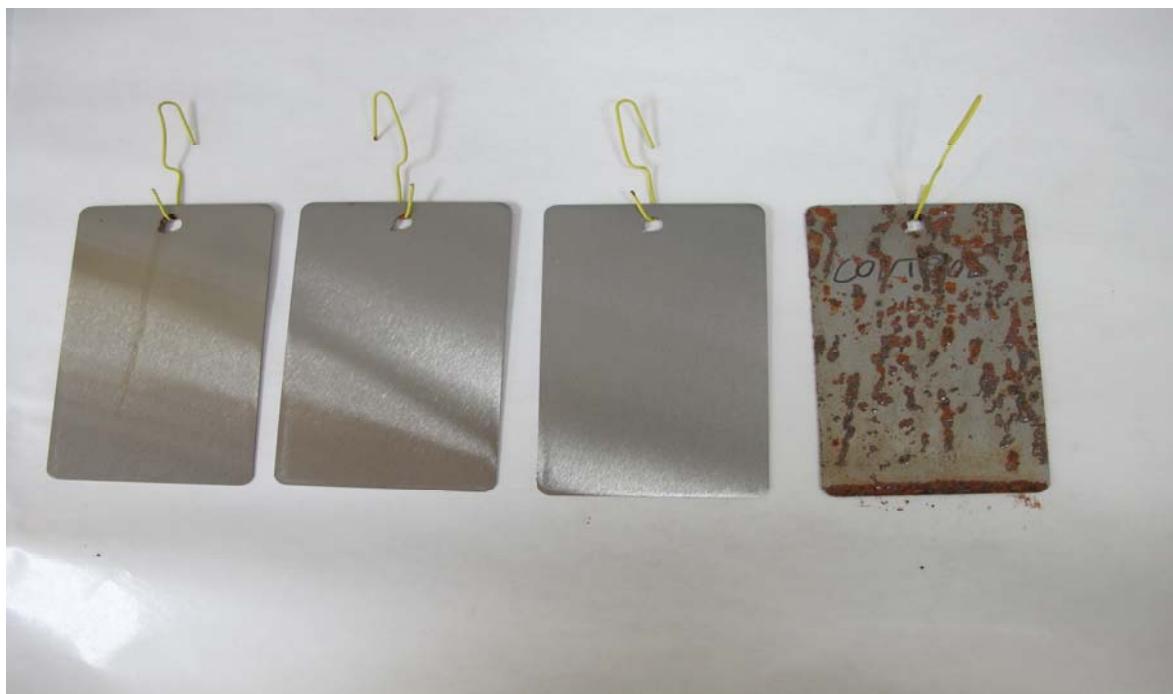
### 4.2.1. Toplinsko tretiranje inhibitora prije nanošenja



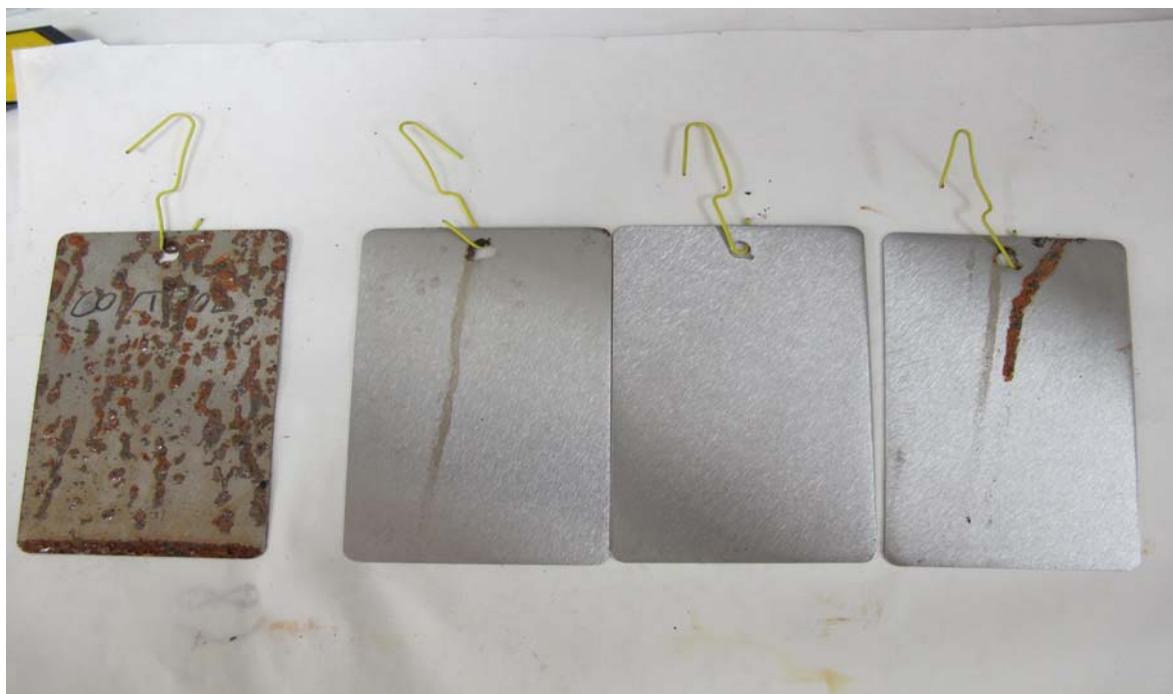
Slika 20. Pločice sa netretiranim VpCI-658 nakon 696 sati u klima komori



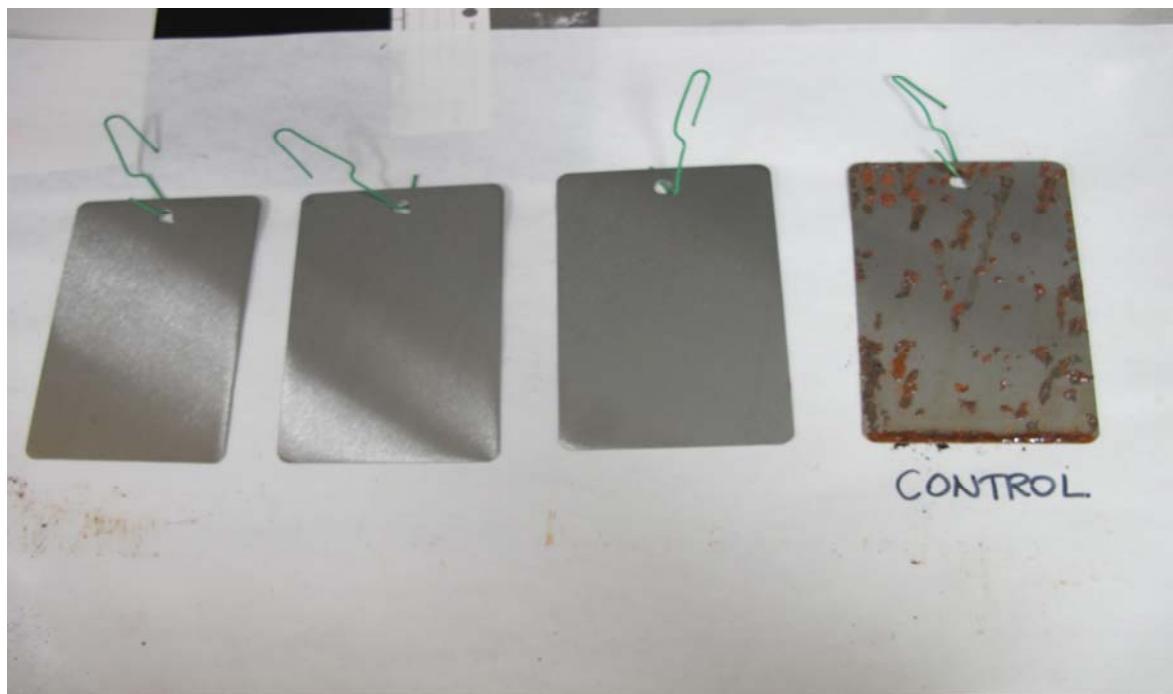
Slika 21. Pločice sa netretiranim VpCI-658 nakon 912 sati u klima komori



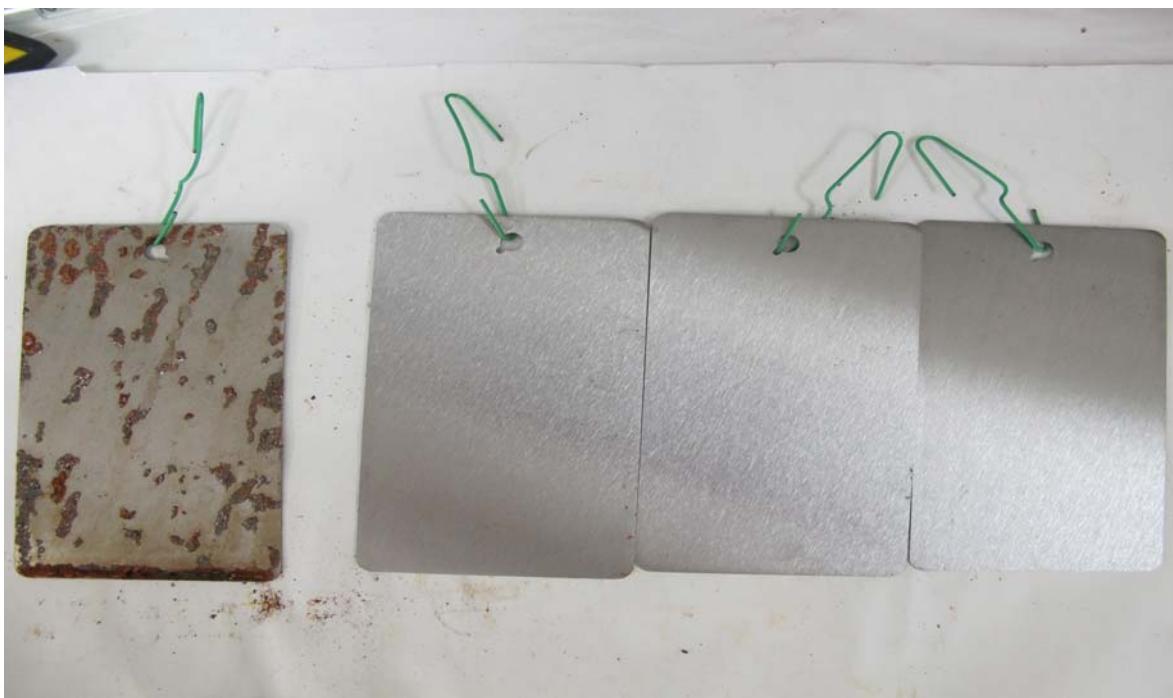
Slika 22. Pločice sa VpCI-658 grijanim 24 sata na 150 °C; nakon 696 sati u klima komori



Slika 23. Pločice sa VpCI-658 grijanim 24 sata na 150 °C; nakon 912 sati u klima komori



Slika 24. Pločice sa VpCI-658 grijanim 168 sati na 150 °C; nakon 696 sati u klima komori



Slika 25. Pločice sa VpCI-658 grijanim 168 sati na 150 °C; nakon 912 sati u klima komori

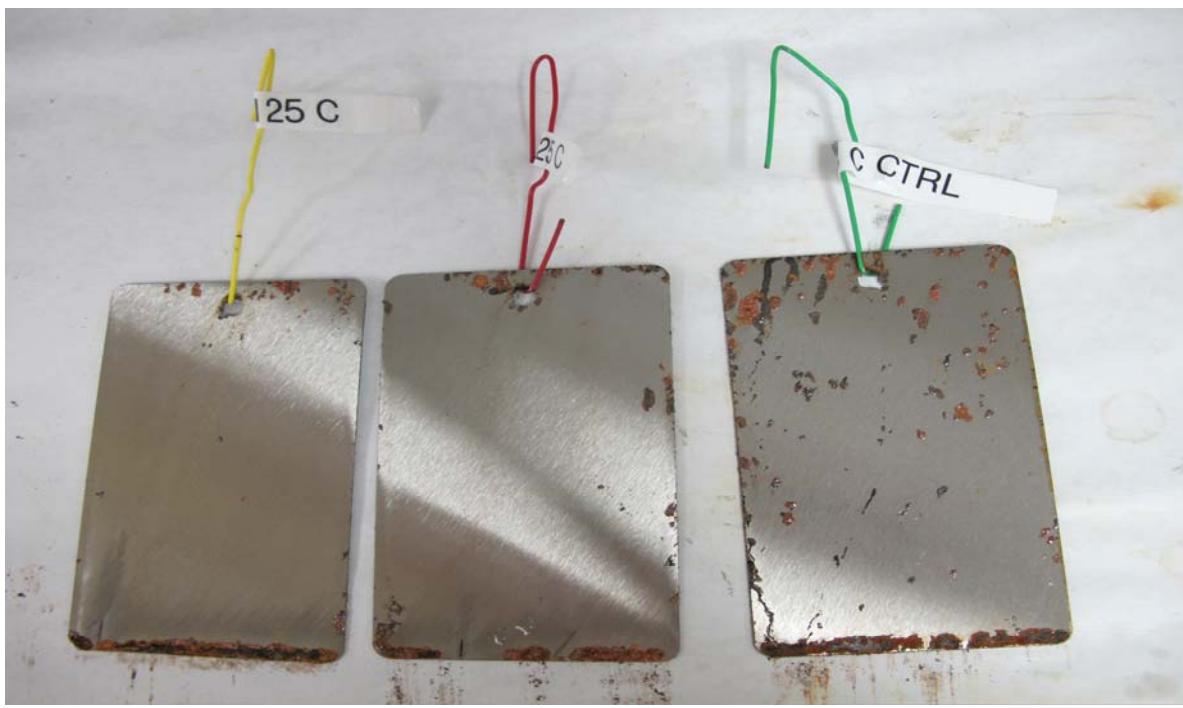
#### 4.2.2. Toplinsko tretiranje inhibitora nakon nanošenja



Slika 26. Pločice sa VpCI-658 grijane 168 sati na 150 °C; nakon 264 sati u klima komori



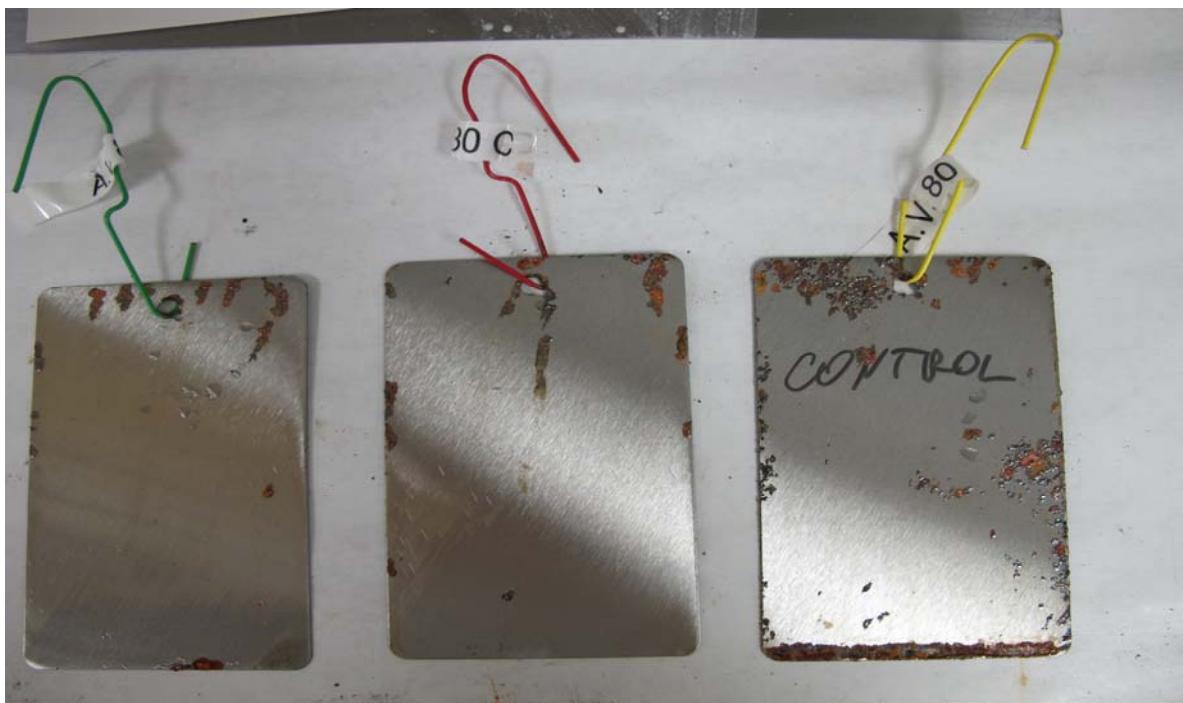
Slika 27. Pločice sa VpCI-658 grijane 168 sati na 150 °C; nakon 504 sati u klima komori



Slika 28. Pločice sa VpCI-658 grijane 72 sata na 125 °C; nakon 96 sati u klima komori



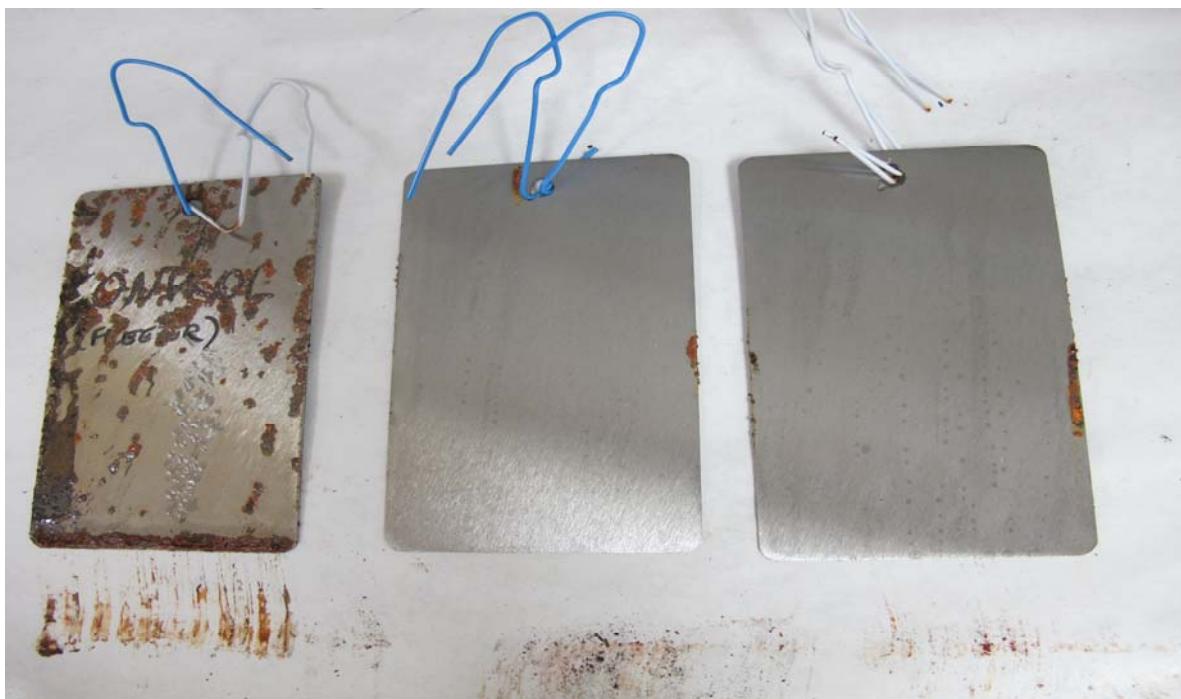
Slika 29. Pločice sa VpCI-658 grijane 72 sata na 125 °C; nakon 336 sati u klima komori



Slika 30. Pločice sa VpCI-658 grijane 72 sata na 80 °C; nakon 96 sati u klima komori



Slika 31. Pločice sa VpCI-658 grijane 72 sata na 80 °C; nakon 336 sati u klima komori



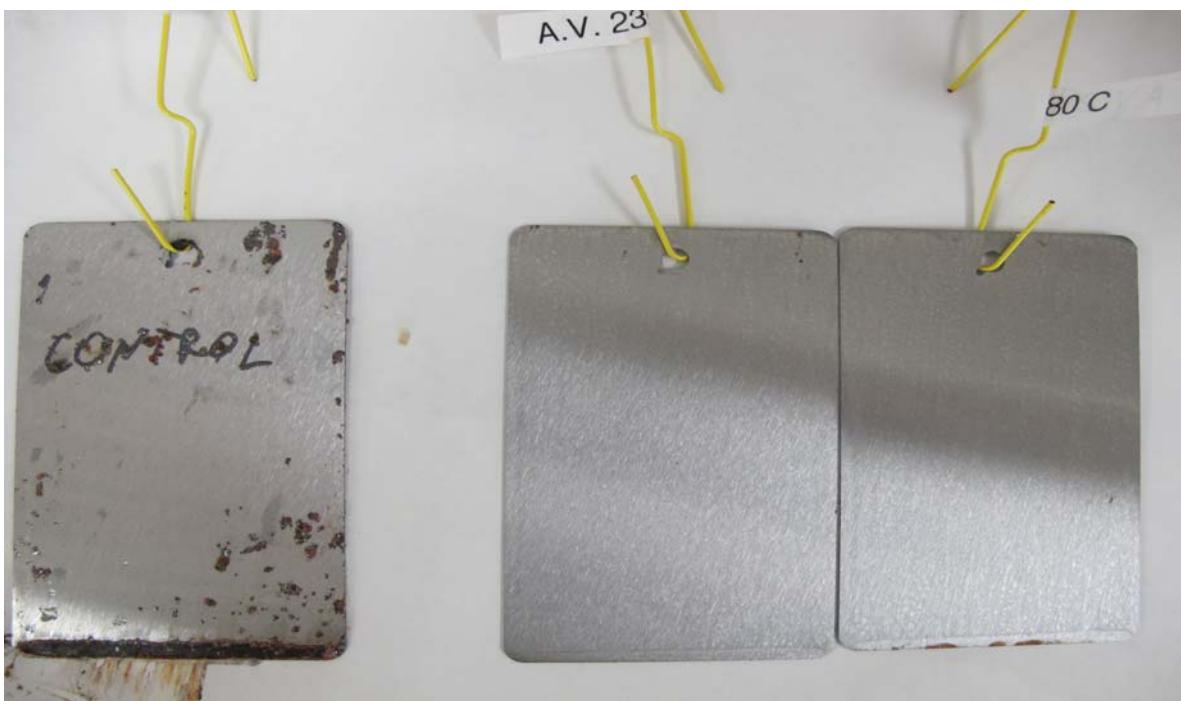
Slika 32. Pločice sa VpCI-658 hlađene 168 sati na -35 °C; nakon 264 sata u klima komori



Slika 33. Pločice sa VpCI-658 hlađene 168 sati na -35 °C; nakon 504 sata u klima komori



Slika 34. Netretirane pločice sa VpCI-239 nakon 144 sati u klima komori



Slika 35. Pločice sa VpCI-239 grijane 72 sata na 80 °C; nakon 96 sati u klima komori

#### 4.3. Migracija i zaštita ispod izolacije



Slika 36. Cijevi sa i bez VpCI-658 ispod PUR pjene nakon 168 sati u klima komori



Slika 37. Cijevi sa i bez VpCI-658 ispod staklene vune nakon 168 sati u klima komori



Slika 38. Cijevi sa i bez VpCI-239 ispod PUR pjene nakon 168 sati u klima komori

## **5. RASPRAVA**

### **5.1. Ispitivanje migracijskih svojstava proizvoda**

#### **5.1.1. Migracijski test na izolaciji**

Tablica 3. prikazuje rezultate migracijskog testa ispitanih inhibitora na izolacijskim materijalima. Migracijske "mrlje" su bile poprilično nepravilnog oblika pa su u tablici dane vrijednosti njihovih srednjih promjera. Ovaj test, nažalost, nije dao nikakve značajne rezultate jer se ni jedan od ispitanih inhibitora ne ističe svojom migracijskom sposobnosti na izolacijskim materijalima. Na *slikama 14. i 15.* grafički su prikazani rezultati iz tablice 3.

#### **5.1.2. Migracijski test na metalnoj površini**

*Tablica 4.* prikazuje rezultate migracijskog testa ispitanih inhibitora na čeličnim pločama. Rezultati su također grafički prikazani na *slikama 16., 17., 18. i 19.* Na slikama je vidljivo da je ovisnosti migracijske površine o broju kapi za VpCI-658, VpCI-239 i Ecoline CLP približno linearne. Master batch #2 pokazuje najveće odstupanje od linearnosti ali i najveću sposobnost migracije dok je Ecoline CLP najbliži linearnoj ovisnosti ali ima jako malu migracijsku sposobnost. Na grafičkim prikazima su također i linearne aproksimacije te njihove jednadžbe pravca iz kojih se može izračunati količina proizvoda potrebna da se pokrije određena površina. Tako, npr., za VpCI-658 ispada da je za pokrivanje površine od  $1\text{ m}^2$  dovoljno tek 5,56 ml proizvoda.

### **5.2. Ispitivanje promjene svojstava proizvoda toplinskim tretiranjem**

#### **5.2.1. Toplinsko tretiranje inhibitora prije nanošenja**

Najprije je, za usporedbu, napravljen test sa netretiranim VpCI-658. Pločice su korodirane ali ni približno onoliko koliko je korodirana nezaštićena (kontrolna) pločica (*slike 20. i 21.*). Već 24-satnim grijanjem inhibitora na  $150^\circ\text{C}$  vidljivo je poboljšanje u rezultatima, tj. vidno je smanjena količina hrđe na pločicama (*slike 22. i 23.*). 168-satnim grijanjem na

150°C VpCI-658 daje besprijeckorne rezultate što je prikazano na *slikama 24. i 25.* gdje pločice izgledaju kao nove.

Bitno je napomenuti da su sva tri seta pločica bila jednako dugo izložena istim uvjetima u klima komori.

### **5.2.2. Toplinski tretiranje inhibitora nakon nanošenja**

Na *slikama 26. i 27.* prikazane su pločice sa VpCI-658 grijane 168 sati na 150°C. Zaštićene pločice se ne razlikuju od kontrolne što ukazuje na to da proizvod ne podnosi ovakve uvijete. Na *slikama 28. i 29.* prikazane su pločice sa VpCI-658 grijane 72 sata na 125°C gdje se vidi poboljšanje u odnosu na prethodne. Na *slikama 30. i 31.* su pločice sa VpCI-658 grijane 72 sata na 80°C te se na njima ne vidi znatno poboljšanje u odnosu na pločice sa *slika 28. i 29.*

Iz ovih rezultata očito je da, nakon nanošenja na metalnu površinu, povišenje temperature i povećanje vremena izlaganja povišenoj temperaturi znatno smanjuje učinkovitost VpCI-658.

Na *slikama 32. i 33.* prikazane su pločice sa VpCI-658 hlađene 168 sati na -35°C. Ako usporedimo te pločice sa pločicama sa *slika 20. i 21.*, tj. sa pločicama koje na sebi imaju netretirani VpCI-658, vidimo da nema znatne razlike u količini hrđe pa se može zaključiti da niske temperature nemaju utjecaja na učinkovitost VpCI-658.

Na *slici 34.* prikazane su netretirane pločice sa VpCI-239 a na *slici 35.* su pločice sa VpCI-239 grijane 72 sata na 80°C. Ako usporedimo *slike 34. i 35.* vidjet ćemo da nema znatne razlike, ali ako usporedimo *slike 35. i 30.* vidimo da VpCI-239 znatno bolje podnosi ovakve uvijete od VpCI-658, tj. povišenje temperature nema toliki utjecaj na učinkovitost VpCI-239 koliko na učinkovitost VpCI-658.

### **5.3. Migracija i zaštita ispod izolacije**

Na *slici 36.* vidimo kontrolnu (gornja) i cijev zaštićenu VpCI-658 (donja) ispod PUR pjene. Kao što je već rečeno u eksperimentalnom dijelu, ubrizgano je samo 10 ml proizvoda, i to na kraju cijevi, a zaštićena je u potpunosti za razliku od kontrolne koja je u potpunosti korodirana.

Na *slici 37.* vidimo isto ispitivanje samo ispod staklene vune. U ovom slučaju je i zaštićena cijev korodirala od polovice prema desnoj strani iako je korištena tri puta veća količina inhibitora. To je zato jer je staklena vuna ima veliku sposobnost upijanja pa proizvod ne može migrirati kao ispod PUR pjene koja ne upija uopće.

Na *slici 38.* prikazane su kontrolna (donja) i cijev zaštićena VpCI-239 (gornja) ispod PUR pjene. Usporedimo li *sliku 38.* sa *slikom 36.* možemo zaključiti da i VpCI-239 i VpCI-658 jednako dobro štite cijevi ispod PUR pjene.

## **6. ZAKLJUČAK**

Cilj ovog istraživanja bio je pronaći granične uvijete unutar kojih inhibitor VpCI-658 djelotvorno štiti ugljični čelik, tj. vidjeti kako se ponaša u različitim temperaturnim uvjetima te pronaći moguću zamjenu za VpCI-658. Osim spomenutog VpCI-658 ispitivani su i VpCI-239, Ecoline CLP te Master batch #2. Svi navedeni inhibitori korozije su komercijalni proizvodi tvrtke Cortec Corporation izuzev Master batch #2 koji je još u razvoju.

Istraživanje je provedeno u 3 dijela: ispitivanje migracijskih svojstava proizvoda, ispitivanje promjene svojstava proizvoda toplinskim tretiranjem te migracija i zaštita ispod izolacije.

Ispitivanje migracijskih svojstava proizvoda na izolacijskim materijalima (PUR pjena i staklena vuna) nije dalo značajne rezultate jer se ni jedan od proizvoda nije isticao. Tek na metalnoj površini razlike u migracijskim svojstvima među proizvodima dolaze do izražaja. VpCI-658 sa 5,56 ml može prekriti površinu od  $1 \text{ m}^2$ . Jedino je Master batch #2 prekrio veću površinu od VpCI-658 no njegova ovisnost prekrivene površine o broju kapi znatno odstupa od linearног.

Tretiranje visokom temperaturom prije nanošenja na metalnu površinu poboljšava učinkovitost VpCI-658 dok je tretiranje visokom temperaturom nakon nanošenja smanjuje. VpCI-239 bi u ovim uvjetima bio odlična zamjena za VpCI-658 jer visoka temperatura nankon nanošenja ne utječe na njegovu učinkovitost.

Tretiranje niskom temperaturom nakon nanošenja ne mijenja učinkovitost VpCI-658.

VpCI-658 i VpCI-239 pokazali su se podjednako dobrima za zaštitu cijevi od ugljičnog čelika ispod PUR pjene.

VpCI-658 pokazao se dobrom za zaštitu cijevi od ugljičnog čelika ispod staklene vune no potrebno je ubrizgati veću količinu proizvoda i to na više mjesta, kako po dužini tako i po opsegu cijevi.

## 7. LITERATURA

[1] Knjiga:

I. Esih, Zvonimir Dugi, Tehnologija zastite od korozije, SK, Zagreb, 1990.

[2] Knjiga:

E. Stupnisek – Lisac: Korozija i zastita konstrukcijskih materijala, Zagreb 2007.

[3] A. Demma & D. Alleyne, Guided Wave Testing for the detection of Corrosion Under Insulation (CUI) in pipes. zbornik radova Eurocorr 2012, Istanbul, Turska, 2012.

[4] [http://www.corpac.de/index.php/vci-vpci\\_en-html](http://www.corpac.de/index.php/vci-vpci_en-html)

[5] <http://okolis.net/kada-otpad-prestaje-bititi-otpad.html>

[6] [http://www.google.hr/#hl=hr&output=search&sclient=psy-ab&q=skripta+specijalni+%C4%8Delicic&oq=skripta+specijalni+%C4%8Delicic&gs\\_l=hp..0i8i30.1866.8431.0.8617.26.13.0.0.0.1658.7464.0j5j1j1j7-1j3.11.0...0.0...1c.1.UPnGvmKUAcI&pbx=1&bav=on.2,or.r\\_gc.r\\_pw.r\\_qf.&fp=d41e1b614e368e51&biw=1680&bih=816](http://www.google.hr/#hl=hr&output=search&sclient=psy-ab&q=skripta+specijalni+%C4%8Delicic&oq=skripta+specijalni+%C4%8Delicic&gs_l=hp..0i8i30.1866.8431.0.8617.26.13.0.0.0.1658.7464.0j5j1j1j7-1j3.11.0...0.0...1c.1.UPnGvmKUAcI&pbx=1&bav=on.2,or.r_gc.r_pw.r_qf.&fp=d41e1b614e368e51&biw=1680&bih=816) – Skripta specijalni čelici

[7] [http://www.efunda.com/processes/heat\\_treat/introduction/heat\\_treatments.cfm](http://www.efunda.com/processes/heat_treat/introduction/heat_treatments.cfm)

[8] <http://www.metalcinkara.co.rs/sr/predstavljanje-antikorozivne-zastite/korozija-i-zastita-od-nje> – slika atmosferska korozija ugljičnog čelika

[9] <http://www.knaufinsulation.hr/staklena-vuna-i-kako-nastaje>

[10] [http://casopiszapraksuludiranja.blogspot.com/2012\\_01\\_01\\_archive.html](http://casopiszapraksuludiranja.blogspot.com/2012_01_01_archive.html)

[11] <http://en.wikipedia.org/wiki/Polyurethane>

[12] <http://www.grundfos.com/service-support/encyclopedia-search/pur-foam.html>

[13] <http://www.vodoskok.hr/prodajni-program/predizolirani-sustavi/flexalen/>

[14] <http://www.ndsu.edu/cNSE/mcal/equipment/Q-FOG.html>

## **8. POPIS OZNAKA**

$d$       promjer, cm

$t$       vrijeme, h

$A$       površina,  $\text{cm}^2$

## **ŽIVOTOPIS**

Antonio Vujičić rođen je 14.10.1988. u Zagrebu gdje 2007. završava VI. gimnaziju. Iste godine upisuje Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, smjer kemijsko inženjerstvo. U srpnju 2011. odraduje stručnu praksu u trajanju od mjesec dana u Fondu za zaštitu okoliša i energetsku učinkovitost. U veljači 2012. sudjeluje na IX. Susretu mladih kemijskih inženjera s radom na posteru "Zaštita brončanih umjetničkih djela od zagađene urbane atmosfere". Od svibnja do srpnja 2012. izrađuje završni rad u Cortec Corporation-u, Minnesota, SAD, sa temom: "Nove mogućnosti primjene parnofaznih inhibitora korozije u zaštiti izoliranih cijevi od ugljičnog čelika".