

# TEHNOLOGIJE IZRADE I NANOŠENJA POVRŠINSKIH ZAŠTITNIH PREVLAKA KOD UKOPANIH CJEVOVODA

---

Tičinović, Josip

Graduate thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split / Sveučilište u Splitu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:228:052549>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-01**



Repository / Repozitorij:

[Repository of University Department of Professional Studies](#)



**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE**

Stručni diplomski studij Strojtarstvo

**JOSIP TIČINOVIĆ**

**Z A V R Š N I R A D**

**TEHNOLOGIJE IZRADE I NANOŠENJA**  
**POVRŠINSKIH ZAŠTITNIH PREVLAKA KOD**  
**UKOPANIH CJEVOVODA**

Split, studeni 2023.

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE**

Stručni diplomski studij Strojarsvo

**Predmet:** Korozija i površinska zaštita

**Z A V R Š N I R A D**

**Kandidat:** Josip Tičinović

**Naslov rada:** Tehnologije izrade i nanošenja površinskih zaštitnih  
prevlaka kod ukopanih cjevovoda

**Mentor:** Petar Ljumović, v. pred.

Split, studeni 2023.

**REPUBLIKA HRVATSKA**  
**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**Sveučilišni odjel za stručne studije**

**Studij:** Strojarstvo  
**Predmet:** Korozija i površinska zaštita  
**Nastavnik:** Petar Ljumović, v. pred.

**ZADATAK**

**Kandidat:** Josip Tičinović

**Zadatak:** Tehnologije izrade i nanošenja površinskih zaštitnih prevlaka kod ukopanih cjevovoda

U radu je potrebno:

- Objasniti fenomen korozije;
- Izvršiti podjelu korozijskih procesa;
- Navesti očekivane tipove korozijskih procesa u okruženjima cjevovoda;
- Objasniti mehanizme djelovanja korozije kod ukopanih cjevovoda;
- Navesti metode (tehnologije) zaštite cjevovoda od korozijskih djelovanja;
- Navesti metode ispitivanja zaštitnih prevlaka cjevovoda;
- Dati praktičan primjer zaštite od korozije ukopanih plinovoda i ispitivanja cijevi iz tvrtke EVN Croatia Plin d.o.o., Split
- Izvesti zaključne napomene i odredbe.

## Sažetak

U okolini kao što je tlo, korozijski procesi mogu varirati od minimalnog utjecaja do brze degradacije, stoga je potrebno primijeniti zaštitne mjere kako bi se korozija odgodila; uključujući upotrebu premaza i katodne zaštite. U ovom radu, navedeno je i opisano više mehanizama korozije u okruženjima ukopanih cjevovoda, uključujući vodikovu krhkost, koroziju uz naprezanje, koroziju izazvanu zamorom, te mikrobiološki induciranu koroziju. Korištenje zaštitnih prevlaka opisano je kao ključna metoda zaštite ukopanih cjevovoda, koja uključuje katranske, epoksidne, polietilenske i polipropilenske prevlake, beton, te različite prevlake za popravke postojećih cijevi; kao što su trake, vosak i mastike. Također, opisani su i standardni načini ispitivanja prevlaka. Zaključno, naveden je primjer zaštite od korozije i ispitivanja cijevi ukopanih plinovoda prema praksi tvrtke EVN Croatia Plin d.o.o..

**Ključne riječi:** ukopani cjevovod, korozija, zaštitne prevlake, epoksidni premazi, polietilenska/polipropilenska prevlaka.

## Summary (Manufacturing and application technologies of surface protective coatings for underground pipelines)

In environment such as soil, corrosion processes can vary from minimal impact to rapid degradation, so it is necessary to apply protective measures to delay corrosion; including the use of coatings and cathodic protection. In this work, several corrosion mechanisms in underground pipeline environments are given and described, including hydrogen embrittlement, stress corrosion, fatigue corrosion, and microbiologically induced corrosion. The use of protective coatings is given as a key method of protecting underground pipelines, including tar, epoxy, polyethylene and polypropylene coatings, concrete and various coatings for the repair of existing pipes; such as tapes, waxes and mastics. Standard methods of coating testing are described as well. In conclusion, the methods of underground pipeline corrosion preservation and pipe testing according to EVN Croatia Plin Company, are given.

**Keywords:** underground pipeline, corrosion, protective coatings, epoxy coatings, polyethylene/polypropylene coating.

**SADRŽAJ**

Sažetak .....	2
Summary (Manufacturing and application technologies of surface protective coatings for underground pipelines).....	2
1. Uvod.....	6
2. Korozija.....	8
2.1. Podjela korozije prema izgledu korozijskog napada .....	11
2.2. Podjela korozije prema korozivnim sredinama .....	11
2.3. Podjela korozije prema mehanizmu djelovanja.....	12
3. Uvjeti koji pospješuju koroziju ukopanih cjevovoda.....	14
4. Tipovi korozije očekivani u okruženjima ukopanih cjevovoda .....	16
4.1. Vrste korozija ukopanih cjevovoda .....	17
4.2. Mehanizmi stvaranja korozije ukopanih cjevovoda .....	22
5. Površinske zaštitne prevlake ukopanih cjevovoda.....	30
5.1. Metode korozivne zaštite cjevovoda .....	30
5.2. Povijest zaštitnih prevlaka .....	30
5.3. Podjela površinskih zaštitnih prevlaka ukopanih cjevovoda.....	33
6. Ispitivanje prevlaka .....	51
6.1. Vizualni pregled .....	51
6.2. Debljina premaza .....	51
6.3. Provjera poroznosti.....	52
6.4. Čvrstoća prijanjanja .....	52
6.5. Otpornost na udarce.....	52
6.6. Tvrdća udubljenja .....	53
6.7. Ispitivanje zadržavanja zraka.....	53
6.8. Stupanj dozrijevanja .....	53
6.9. Test suhog prijanjanja.....	54

---

6.10.	Katodni test odvajanja.....	54
6.11.	Istezanje pri lomu.....	54
6.12.	Uranjanje u toplu vodu.....	54
7.	Zaštita ukopanih plinovoda od korozije i ispitivanje skladištenih cijevi tvrtke EVN Croatia Plin d.o.o., Split.....	56
7.1.	Vizualni pregled čeličnih cijevi DN 200 obložene 3LPE.....	57
7.2.	Mjerenje debljine stijenke čeličnih cijevi DN 200 obložene 3LPE.....	59
8.	Zaključak.....	63
	Literatura .....	65

## Popis slika

SLIKA 1.1 PRIKAZ ENERGETSKE PROMJENE PRI DOBIVANJU I KOROZIJI METALA [1] .....	6
SLIKA 2.1 STANDARDNI ELEKTRODNI POTENCIJALI METALA [1] .....	8
SLIKA 2.2 PODJELA KOROZIJE [1] .....	10
SLIKA 4.1 VRSTE SCC KOROZIJE;(A) INTERGRANULARNA SCC KOROZIJA;(B) TRANSGRANULARNA SCC KOROZIJA;[18] .....	26
SLIKA 4.2 ČETIRI FAZE INICIJACIJE I RASTA SCC PUKOTINA [9].....	26
SLIKA 4.3 PUKOTINE CIJEVI IZAZVANE ZAMOROM [19].....	27
SLIKA 4.4 MIKROBIOLOŠKI IZAZVANA KOROZIJA ZBOG REDUCIRANJA SUMPORA [17] .....	28
SLIKA 5.1 CIJEVI OBLOŽENE KATRANOM [21] .....	31
SLIKA 5.5.2 CIJEV OBLOŽENA ASFALTOM I KATRANOM[21].....	32
SLIKA 5.5.3 SKUPLJAJUĆE PRESVLAKE [22] .....	33
SLIKA 5.4 SHEMA PROCESA NANOŠENJA ASFALTNIH PREMAZA [25] .....	36
SLIKA 5.5 PRIMJER PREMAZA NA BAZI KATRANA [26] .....	37
SLIKA 5.6 SHEMA PROCESA PROIZVODNJE EPOKSIDNOG PREMAZA SPOJENOG FUZIJOM[24] .....	38
SLIKA 5.7 PROCES PROIZVODNJE EPOKSIDNOG PREMAZA SPOJENOG FUZIJOM; A) CIJEV PRIJE PRIPREME; B) CIJEV NAKON PRIPREME I UGRAĐIVANJA SPOJNICE; C) ZAŠTITA SPOJA OD PREMAZA ; D) PREMAZ ; E) SKIDANJE ZAŠTITE; F) SKLADIŠTENJE [23].....	39
SLIKA 5.8 DVOSLOJNI EPOKSIDNI PREMAZ SPOJEN FUZIJOM [24] .....	40
SLIKA 5.9 SLOJEVI TROSLOJNE POLIETILENSKE/POLIPROPILENSKE PREVLAKE [28] .....	41
SLIKA 5.10 SHEMA PROCESA PROIZVODNJE TROSLOJNE POLIETILENSKA/POLIPROPILENSKA PREVLAKE [27] .....	42
SLIKA 5.11 PRIMJER CIJEVI OBLOŽENE POLI-STAKLENIM PREMAZOM [24].....	43
SLIKA 5.12 SHEMA PROCESA PROIZVODNJE BETONSKIH OBLOGA CJEVOVODA[23].....	44
SLIKA 5.13 METODE OBLAGANJA CIJEVI S BETONOM: A) ŠPRICANJE; B) KOMPRESIJA [30] .....	45
SLIKA 5.14 NANOŠENJE VANJSKOG SLOJA VISOKOELASTIČNIH OBLOGA NA T-SPOJ CJEVOVODA [32] .....	47
SLIKA 5.15 POSTUPCI NANOŠENJA VISOKOELASTIČNIH PREMAZA; A) RAVNO; B) SPIRALNO [32].....	47
SLIKA 5.16 POSTUPAK NANOŠENJA PREVLAKE NA BAZI VOSKA; A) PRIRUBNICA PRIJE NANOŠENJA PRESVLAKE; B) PRIRUBNICA POSLIJE NANOŠENJA PREVLAKE;[33].....	48
SLIKA 5.17 NANOŠENJE SKUPLJAJUĆIH PREVLAKA [37].....	50
SLIKA 7.1 ČELIČNE CIJEVI OBLOŽENE 3LPE [44].....	57
SLIKA 7.2 PEHD PLINSKE CIJEVI [44].....	58
SLIKA 7.3 POVRŠINSKO OŠTEĆENJE IZOLACIJE NASTALO USLIJED TRANSPORTA CIJEVI [44].....	58
SLIKA 7.4 POVRŠINSKI TRAGOVI OPĆE KOROZIJE UNUTAR CIJEVI [44] .....	58
SLIKA 7.5 POBRUŠENI DIO IZOLACIJE ZA POTREBE MJERENJA DEBLJINE STIJENKE [44].....	60
SLIKA 7.6 PRIKAZ TRI POZICIJE NA KOJIMA JE ODRADENO MJERENJE DEBLJINE STIJENKE NA CIJEVIMA [44] .....	60

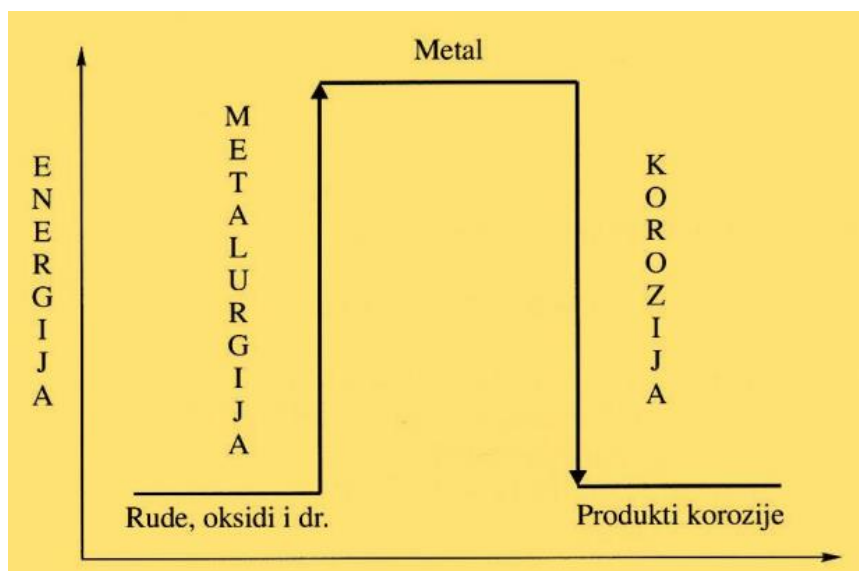
## Popis tablica

TABLICA 7.1 REZULTATI MJERENJA DEBLJINE STIJENKE .....	62
--	----



## 1. Uvod

Korozija je proces nenamjernog razaranja konstrukcijskih materijala, uzrokovan fizikalnim, kemijskim i biološkim agensima [1]. Korozija razara metale i anorganske nemetale kao što su čelici ili beton, a sudjeluje i u degradaciji organskih materijala kao što su polimerni ili drvo. Riječ korozija dolazi od latinske riječi – “corrodere“ koja znači nagrizati. Općenito, kada se govori o koroziji, a nije definirano o kojem točno se materijalu radi, smatra se da se diskutira o koroziji metala [1]. Pri procesu prerade u metal, rudače se izlažu nizu visokotemperaturnih postupaka za pripremu tj. oplemenjivanje ruda i dobivanje metala iz spojeva sadržanih u rudama koji zahtijevaju velike količine energije. Pri tome metal dostiže visoku energetska razinu. Metali imaju prirodnu sklonost reagirati s drugim tvarima kako bi postigli stanja niže energije uz oslobađanje iste. Smanjivanje energetske razine pokreće koroziju (Sl. 1.1).



Slika 1.1 Prikaz energetske promjene pri dobivanju i koroziji metala [1]

Ovisno u kakvoj okolini i u kojim uvjetima se metal nalazi, korozija na njega utječe različitom brzinom, posebno ako se nalaze ispod tla. Korozija u tlu pojava je vrlo promjenjivog raspona djelovanja, od brzog propadanja do zanemarivog procesa koji skoro pa nema utjecaja na materijal. To se može približiti primjerom zakopane cijevi koja postanu perforirana unutar jedne godine, dok arheološki primjerci antičkog željeza ostaju netaknuti godinama u tlu bez značajnog efekta korozije [2]. Razgrađivanje površinske strane metala izloženog tlu, tj. vanjske stjenke cjevovoda, obično se prepisuje agresivnim uvjetima okoline. Korozija cjevovoda ne samo da dovodi do fizičkog nedostatka cijevi, već stvara kontaminaciju fluida koji se prenosi,

spriječava se opskrba, smanjuje se iskoristivost i proizvodnja te posljedično uzrokuju štete višestruko veće od cijene nove cijevi potrebne za zamjenu oštećene stare cijevi. Osim financijske štete, ugrožena je ljudska sigurnost. Iz tih razloga se vodi računa da korozija nastupi što kasnije, najčešće korištenjem nekog oblika fizičke barijere između metala i tla. Zaštita metala premazima je jedan od najčešćih postupaka zaštite u industriji te je tako zaštićeno 75% metalnih površina. Ovaj pristup je raširen zbog relativno niske cijene premaza u usporedbi s drugim metodama zaštite od korozije. Za ukopane ili potopljene strukture, gdje je održavanje teško ili čak nemoguće (a potreban je i odgovarajući stupanj fizičke zaštite), tako tanka zaštitna barijera između metala i okoline obično nije dostatna. U radu s podzemnim konstrukcijama, koriste se deblja zaštitna sredstva koja se više smatraju prevlakama nego premazima.

## 2. Korozijska

Korozijsku se može opisati kao proces propadanja materijala zbog njegove reakcije s okolišem. Ona proizlazi iz prirodne sklonosti većine metala da se vrte u svoje prirodno stanje, kao što je primjerice željezo koje u prisutnosti vlažnog zraka formira željezni oksid. Metali mogu biti korodirani putem izravnih reakcija s kemikalijama, kao što je cink koji reagira s razrijeđenom sumpornom kiselinom ili magnezij koji reagira s alkoholima. Korozijska se odvija kao odgovor na tendenciju smanjenja ukupne slobodne energije sustava [3]. Energija sustava se opisuje elektrodnom potencijalom. Razlika elektrodnih potencijala katode i anode korozijskih članaka je mjera afiniteta za elektrokemijsku korozijsku [4]. Elektrodni potencijal (simbol E), pokazuje koji je napon potreban (npr. pri elektrolizi), da se održi stabilno stanje [5]. U procesu korozijske, manje plemeniti dijelovi površine djeluju kao anode (Sl. 2.1), gdje se metal troši putem ionizacije i otapanja u elektrolitu. Istovremeno, tijekom navedenog procesa, oslobađa se višak elektrona koji putuje kroz metal prema plemenitijim dijelovima površine, odnosno katodama. Na katodama se ti elektroni vežu s oksidansima iz okoline.

Metal	$E^0_{Me/Me^{z+}} / V$
Au/Au <sup>3+</sup>	+1.50
Au/Au <sup>+</sup>	+1.40
Pt/Pt <sup>2+</sup>	+1.20
Ag/Ag <sup>+</sup>	+0.79
Cu/Cu <sup>+</sup>	+0.52
Cu/Cu <sup>2+</sup>	+0.34
H <sub>2</sub> /H <sup>+</sup>	0.00
Fe/Fe <sup>3+</sup>	-0.04
Pb/Pb <sup>2+</sup>	-0.13
Sn/Sn <sup>2+</sup>	-0.14
Ni/Ni <sup>2+</sup>	-0.23
Co/Co <sup>2+</sup>	-0.28
Fe/Fe <sup>2+</sup>	-0.44
Cr/Cr <sup>3+</sup>	-0.74
Zn/Zn <sup>2+</sup>	-0.76
Al/Al <sup>3+</sup>	-1.66
Mg/Mg <sup>2+</sup>	-2.39

Slika 2.1 Standardni elektrodni potencijali metala [1]

Na metalnoj površini, neki atomi imaju tendenciju oslobađanja elektrona i postaju ioni u sloju vlage. Oni se nalaze u nižem energetske stanju u otopini nego kada su u rešetki čvrstog metala. Čelik za cjevovode se u osnovi sastoji od željeza, pa se stoga ukupna reakcija korozije može opisati kao rastvaranje željeza:



Reakcija (2.1) može se smatrati rezultatom dviju polovičnih reakcija. Jedna je



Ovo je reakcija oksidacije s povećanjem oksidacijskog stanja željeza od 0 do  $2^+$ . Naziva se anodna reakcija, a drugo je:



Ova reakcija je reakcija redukcije sa smanjenjem oksidacijskog stanja za  $\text{O}_2$  u  $\text{OH}^-$  i definirana je kao katodna reakcija [3]. Ukupni elektrodni potencijal jednak je razlici katodnog i anodnog potencijala:

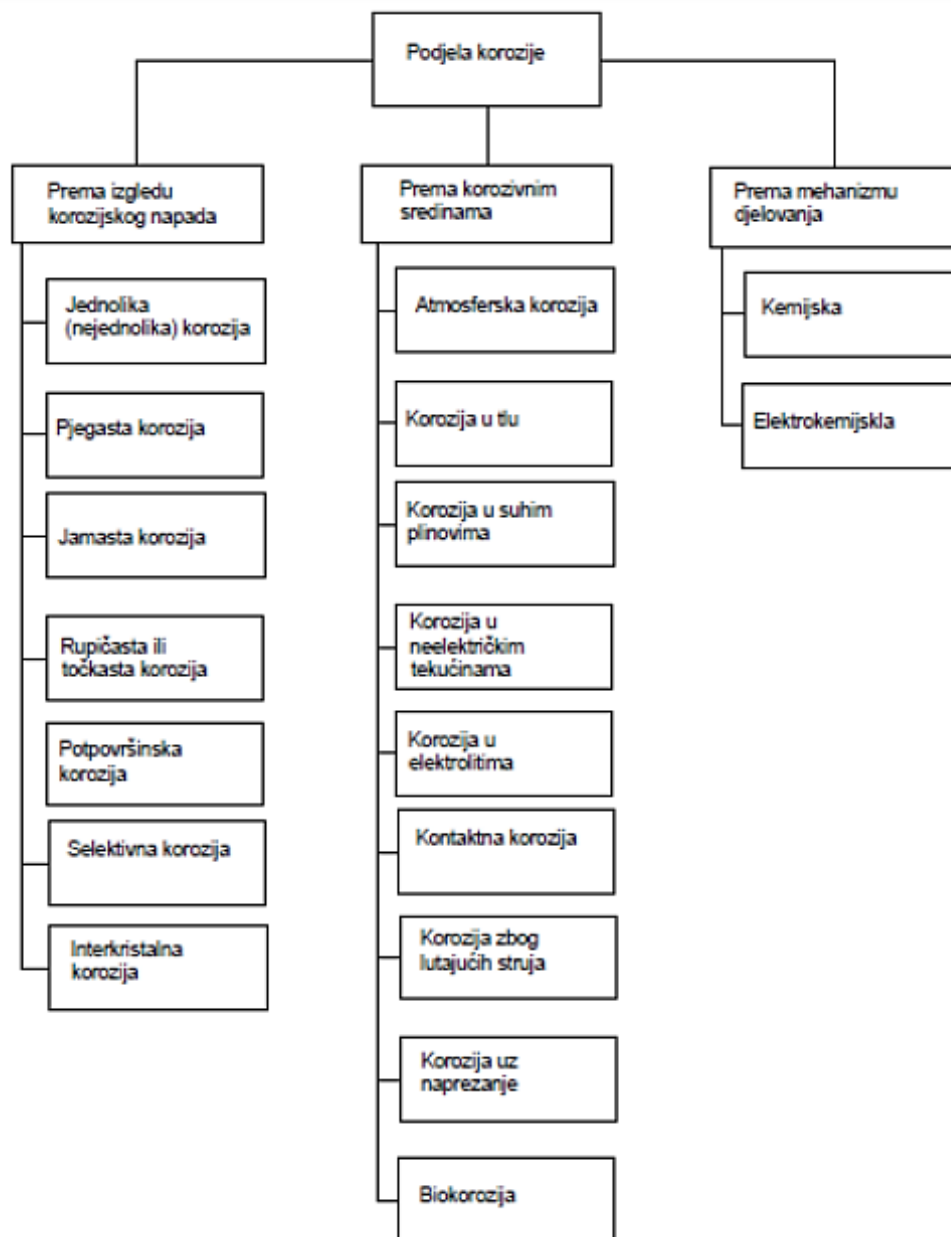
$$E^0 = E_k^0 - E_a^0 = 0.4\text{V} - (-0.45\text{V}) = 0.85\text{V} \quad (2.4)$$

Proces s nižim (negativnijim ili manje pozitivnim) potencijalom ići će u smjeru oksidacije, a proces s višim (pozitivnijim ili manje negativnim) potencijalom, ići će u smjeru redukcije ili vezivanja elektrona. Na takav način željezo prelazi u manje reaktivan oblik, a reakcija korozije nastupa spontano.

Korozija je spontan proces koji se ne može spriječiti, samo se može usporiti. Korozija je nepoželjan fenomen koji uzrokuje smanjenje mase i uporabne vrijednosti materijala te predstavlja ozbiljan problem za siguran i ekonomičan rad u svim oblicima industrije. Korozija se često javlja istovremeno ili uzastopno s mehaničkim procesima koji smanjuju upotrebnu vrijednost metalnih predmeta. Postoje dvije glavne skupine ovih pojava. U prvoj skupini, metal gubi masu zbog trošenja trenjem uslijed relativnog gibanja prema čvrstim ili fluidnim tvarima. Primjer takvih mehaničkih procesa su abrazija i erozija. Druga skupina obuhvaća pojave u kojima masa materijala ostaje nepromijenjena, ali njegova svojstva se pogoršavaju ili mijenjaju oblik. Primjer takvih mehaničkih procesa su zamor i puzanje. Pojava zamora se događa kad čvrstoća metala slabi pod djelovanjem dinamičkih naprezanja, što se često primjećuje na strojevima koji rade periodički. Puzanje, s druge strane, uzrokuje trajnu deformaciju metala

zbog dugotrajnog izlaganja naprezanjima na povišenim temperaturama u konstrukcijama [6]. Postoji više različitih vrsta i podjela korozije ali najprihvaćenija podjela je prema:

- izgledu korozijskog napada
- korozivnim sredinama
- mehanizmu djelovanja (Sl. 2.2.).



Slika 2.2 Podjela korozije [1]

## 2.1. Podjela korozije prema izgledu korozijskog napada

Prema izgledu korozijskog napada jednolika (nejednolika) korozija ili opća korozija je najčešći i najmanje štetan oblik korozijskog napada koji obuhvaća čitavu izloženu površinu metala, a može biti ravnomjerna ili neravnomjerna. Ravnomjerna korozija obično uzrokuje hrapavost inače glatke metalne površine. Takva je korozija u praksi najmanje opasna jer se lako može pratiti proces i predvidjeti kada se metalni predmet treba zamijeniti novim. Opasnija je, naravno, neravnomjerna opća korozija.

Lokalna korozija može biti pjegasta, tj. ograničena na pojedine veće dijelove metalne površine, jamičasta, tj. usko lokalizirana na žarišta kružnog presjeka, pri čemu je dubina korozijskog oštećenja nekoliko puta veća od početnog promjera te točkasta ili potpovršinska korozija. Točkasta korozija često se naziva piting (eng. pitting – stvaranje udubina). Djeluje destruktivno jer prodire duboko u masu materijala. Stvaranje samo jednog “pita” može dovesti do daljnje propagacije pukotine i u konačnici popuštanja konstrukcije.

Potpovršinska korozija može se manifestirati kao bubrenje gdje korozijski produkti imaju veći volumen od volumena uništenog materijala, ili listanje gdje se žarišta pitinga šire u dubinu materijala. Selektivna korozija nastaje kod višefaznih materijala (npr. grafitizacija sivog lijeva), ili kod višekomponentnih materijala (npr. decinkacija mjedi). Interkristalna korozija nastaje uzduž granica metalnog zrna. Ta vrsta korozije dugo ostaje neprimijećena, pa je najopasnija, zato što nenadano smanjuje čvrstoću i žilavost materijala. Konačna posljedica interkristalne korozije jest lom ili raspad metala [7].

## 2.2. Podjela korozije prema korozivnim sredinama

Prema korozivnim sredinama atmosferska korozija je najčešći oblik korozije, što proizlazi iz djelovanja dva ključna faktora - kisika i vlage. Ako nedostaje jedan od njih, korozija neće nastupiti. Primjerice, pri suhom zraku ispod ledišta vode ili pri relativnoj vlažnosti manjoj od 60%, čelik neće korodirati [7].

Korozija u tlu ima složeniju teoriju nastanka, no najviše je pospješuju lokalni elektrokemijski procesi potaknuti vodom koja djeluje na površini metala.

Ovi procesi su podložni različitim utjecajima, uključujući vrstu tla, vlažnost tla, dostupnost kisika iz atmosfere, biološki i kemijski sastav tla, prisutnost topivih iona, pH vrijednost tla i drugih čimbenika [7].

Korozija u suhim plinovima je kemijski oblik korozije koji u uvjetima visoke temperature i djelovanja plinova tvori okside i druge kemijske spojeve.

Korozija u neelektrolitičkim tekućinama također je kemijski oblik korozije, često prisutan u nafti i različitim organskim otapalima. Ako se vlaga i anorganske soli nalaze u takvim tekućinama, kemijska korozija može prijeći u intenzivnu elektrokemijsku koroziju.

Korozija u elektrolitima je izrazito elektrokemijski oblik korozije, a dijeli se na koroziju u vodenim otopinama kiselina, lužina i soli.

Kontaktna korozija je tipičan elektrokemijski oblik korozije koji nastaje kontaktom dvaju različitih metala. Metal s nižim elektrodnim potencijalom otapa se, dok se metal s višim elektrodnim potencijalom štiti od korozije.

Korozija uslijed lutajućih struja može nastati u tlu i u vodi. Inducirane struje nastaju oko vodiča kroz koji prolazi struja, te se takve struje koncentriraju oko nekog metalnog predmeta u blizini i uzrokuju korozijske procese.

Dio konstrukcije koji je mehanički konstantno ili periodički napregnut, brže korodira nego nenapregnuti. Uzrok takve korozije, tj. korozije uz naprezanje, su vlačna naprezanja koja izazivaju grananje interkristalnih pukotina.

Biokorozija najčešće nastaje na brodovima i u lukama uslijed djelovanja flore i faune. Nastali sloj – obraštaj, sastavljen od algi, puževa i drugih organizama, uzrokuje ubranu koroziju koja nastaje uslijed izlučivanja organskih kiselina, kao i mehaničkog odnošenja materijala. Kolonije bakterija često stvaraju oštećenja na plinovodima i na različitim sustavima cjevovoda [7].

### **2.3. Podjela korozije prema mehanizmu djelovanja**

Korozija metala se razlikuje od propadanja drugih materijala zbog izrazite električne vodljivosti metala, što se manifestira elektrokemijskom prirodom njihove korozije, dok se kemijsko propadanje električki nevodljivih materijala odvija nekim drugim fizikalno-kemijskim procesima. Metali višeg potencijala (plemenitiji metali), imaju manju sklonost ka korozijskom djelovanju. Prilikom korozije između dva metala oštećuje se metal negativnijeg potencijala.

Prema mehanizmu djelovanja korozija se dijeli na elektrokemijsku i kemijsku koroziju.

Kod metala, elektrokemijska korozija je najrašireniji oblik korozije, te u 95% slučajeva nastaje zbog elektrokemijskih reakcija između metala i okoline. Elektrokemijskom korozijom provode se reakcije oksidacije i redukcije. Elektrokemijska korozija metala odvija se u elektrolitima, pri čemu dolazi do oksidacije atoma metala u slobodni kation. Tek sekundarnim procesima nastaju molekule spoja koji je produkt korozije. Oksidacija je reakcija kojom neka tvar oslobađa elektrone, pri čemu nastaje druga tvar ili skupina tvari. Redukcija je reakcija kojom neka tvar ili skupina tvari veže elektrone, pri čemu nastaje druga tvar ili skupina tvari.

Kemijska korozija nastaje neposrednim djelovanjem molekula nekog elementa ili spoja na metal, pri čemu izravno nastaju korozijski produkti. Primjer kemijske korozije je oksidacija metala kisikom.



### 3. Uvjeti koji pospješuju koroziju ukopanih cjevovoda

Degradacija cjevovoda rezultat je postojanog utjecaja okoline na materijale cjevovoda (cijevni premazi, zavareni spojevi, itd.). Ukopani cjevovodi nalaze se u promjenjivim okolišnim uvjetima koji mogu dovesti do korozivne sredine. Čimbenici koji mogu spriječiti ili doprinijeti pokretanju korozije ukopanih cjevovoda biti će navedeni u ovom poglavlju.

Premazi cjevovoda su najbitniji faktor koji sprječava korozivna djelovanja. Ukopane cijevi presvučene su kako bi pružile zaštitu od okoline. Oštećenje premaza rezultirat će izlaganjem metala cijevi. Materijali koji se koriste za premazivanje cijevi razlikovali su se kako se tehnologija razvijala.

Uvođenjem električne struje na ukopanu cijev, elektrodni potencijal ukopane cijevi se smanjuje, te se stvara okolina u kojoj se smanjuje gubitak metala. Takva zaštita se naziva katodna zaštita, a nepostojanje katodne zaštite znatno povećava efekte korozije. Sadržaj vlage i mineralni sastav tla utječu na učinkovitost katodne zaštite.

Struktura i uvjeti tla ne samo da utječu na učinkovitost katodne zaštite, već doprinose stvaranju korozivne sredine. Čimbenici poput tipa tla, drenaže, temperature, koncentracije CO<sub>2</sub> i električne provodljivosti, utječu na okolinu koja okružuje cijev.

Temperatura tla i temperature cijevi mogu stvoriti povoljne uvjete za napad na materijal cjevovoda. Tekuće i plinske linije imaju nešto različite karakteristike radne temperature, ali su obe jako osjetljive. Na primjer, kod plinskih cjevovoda, kako cijev tako i okolno tlo mogu varirati od visokih 40°C pri napuštanju kompresorske stanice do 5°C na određenoj udaljenosti od stanice.

Naprezanja u cijevi mogu dovesti do preranog smanjenja čvrstoće cjevovoda. Naprezanja koja djeluju na cijev uključuju: naprezanja iz procesa proizvodnje, vanjska naprezanja kao što su ona nastala savijanjem, zavarivanjem, mehaničkim oštećenjima i korozijom te sekundarna naprezanja zbog slijeganja ili pokretanja tla.

Korozija, posebno pucanje, povezana je s tlakom na cijevi. S povećanjem tlaka unutar cijevi, brzine rasta pukotina također se povećavaju. Obično je obodni stres generiran tlakom cjevovoda najviša komponenta naprezanja.

Također, uvjeti u kojima je cijev izložena cikličkim opterećenjima mogu rezultirati povećanim stopama rasta pukotina. Radni tlakovi za cijevi velikog promjera mogu iznositi do 8700 kPa. Tlak u cjevovodu neprestano varira zbog utovara i istovara proizvoda i pod utjecajem je rada pumpe [8].

## 4. Tipovi korozije očekivani u okruženjima ukopanih cjevovoda

Koroziji na vanjskoj površini naftovoda i plinovoda koja može izazvati oštećenja tijekom njihovog vijeka trajanja često se pridaje manje pažnje u usporedbi s unutarnjom korozijom za koju se u praksi pruža najveća zaštita. Međutim, oštećenja uzrokovana vanjskom korozijom, zajedno s unutarnjim greškama materijala, mogu dovesti do iznenadnih katastrofa i kvara cjevovoda [9].

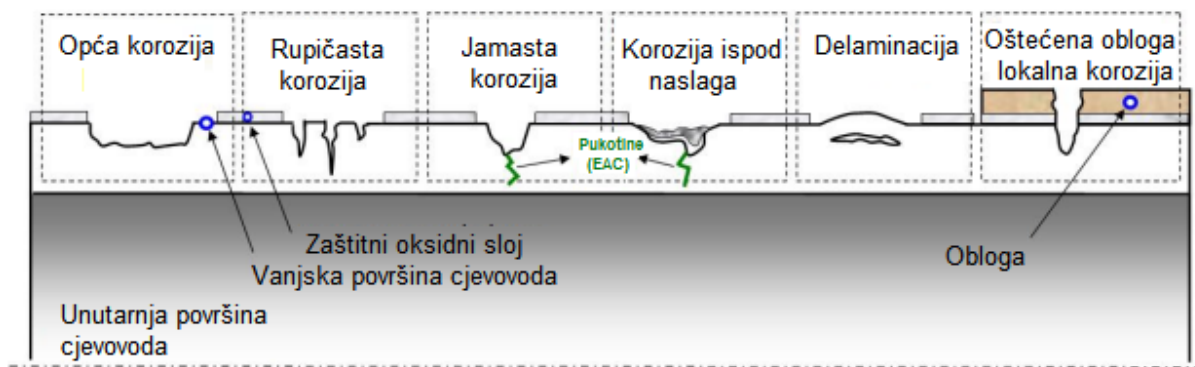
Vanjska površina ukopanog cjevovoda izložena je vanjskom okolišu te na nju mogu djelovati razni oblici i vrste korozije. Prva u nizu korozija koju treba spomenuti jest opća korozija. Ona ima najmanje razarajući korozivni karakter, a slijede je rupičasta i jamičasta korozija. Jamičasta korozija stvara udubine okruglog oblika i manje je zastupljena dok je rupičasta korozija češća i obično stvara pukotine zvane "pitovi" koji mogu dovesti do curenja, rupa i udubljenja s vanjske površine cjevovoda. Sljedeća vrsta korozije jest galvanska korozija. Za razliku od rupičaste i jamičaste korozije, galvanska korozija ne djeluje lokalno već uzrokuje jednoliki gubitak metala po presjeku. Uz galvansku koroziju, vanjska površina ukopanih naftovoda i plinovoda često je izložena koroziji uz naprezanje koju uzrokuje kombinirano djelovanje vlačnih opterećenja i raznih korozivskih procesa. Korozija uz naprezanje može dovesti do neočekivanog pucanja čeličnih cijevi.

Ključan element koji inducira pojavu korozije jest vodik. Vodikova krhkost je jedna od pojava uzrokovana vodikom koja se stvara u zonama loma nakupljanjem vodika nastalog difuzijom. Vodik koji se razvija iz reakcije različitim procesima korozije može uzrokovati smanjenje mehaničkih i mikrostrukturnih svojstava. Uz vodikovu krhkost, postoje ostali mehanizmi korozije uzrokovani vodikom kao što su: pukotine izazvane vodikom, vodikovo bubrenje, lokalna plastičnost pospješena vodikom i dekohezije pospješene vodikom.

Dakle, korozija uz naprezanje zajedno s raznim korozivnim mehanizmima uzrokovanim vodikom predstavlja ozbiljnu prijetnju cjelovitosti cjevovoda. Uz nabrojene do sada, korozija izazvana zamorom i mikrobiološki izazvana korozija također su bitni uzroci propadanja materijala cjevovoda.

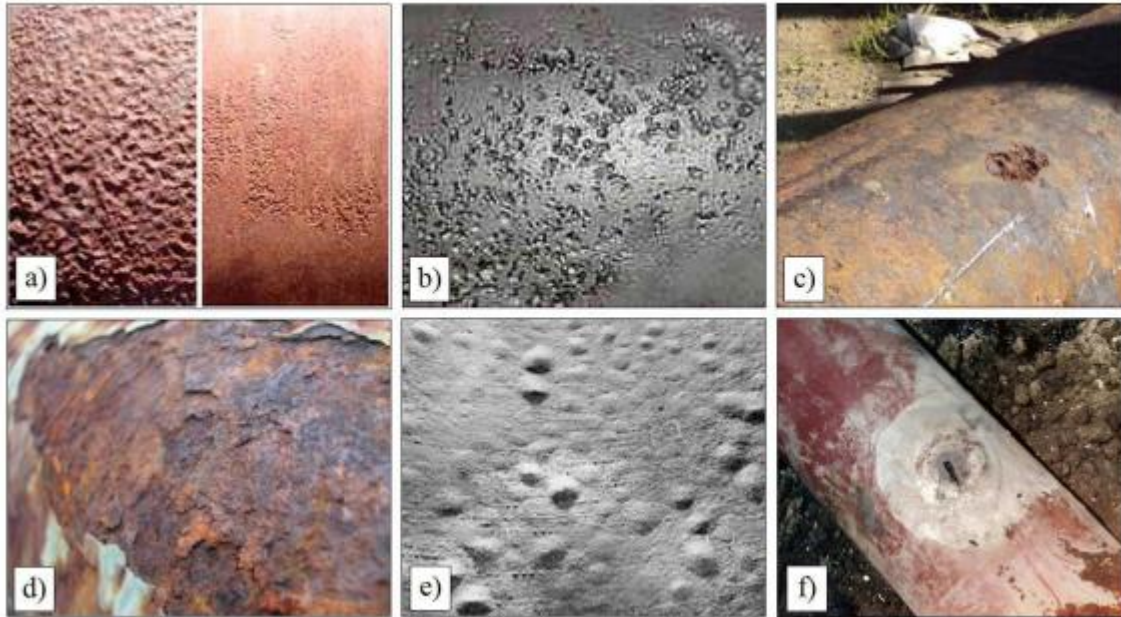
#### 4.1. Vrste korozija ukopanih cjevovoda

Mnogo je faktora koji utječu na oblik korozije koji se pojavljuje na ukopanim čeličnim cjevovodima. Ključni materijalni čimbenici su metalurški sastav čelika. Također, okoliš ima važnu ulogu, uključujući kemijske i fizičke karakteristike tla te prateće elektrokemijske osobine poput sadržaja klorida, kisika, sumpora i sulfata. Karakteristični oblici vanjske korozije golih i obloženih naftovoda i plinovoda sažeti su i prikazani na slici 4.1. Najopasniji oblici korozije na vanjskoj površini cijevi, naročito korozijski “pitovi”, ali i korozijske jame s većom dubinom penetracije od širine, predstavljaju oštre koncentratore naprezanja. Razni oblici korozija čini stijenkku cjevovoda osjetljivom na kvar i pucanje.



Slika 4.1 Karakteristični oblici vanjske korozije golih i obloženih cjevovoda [9]

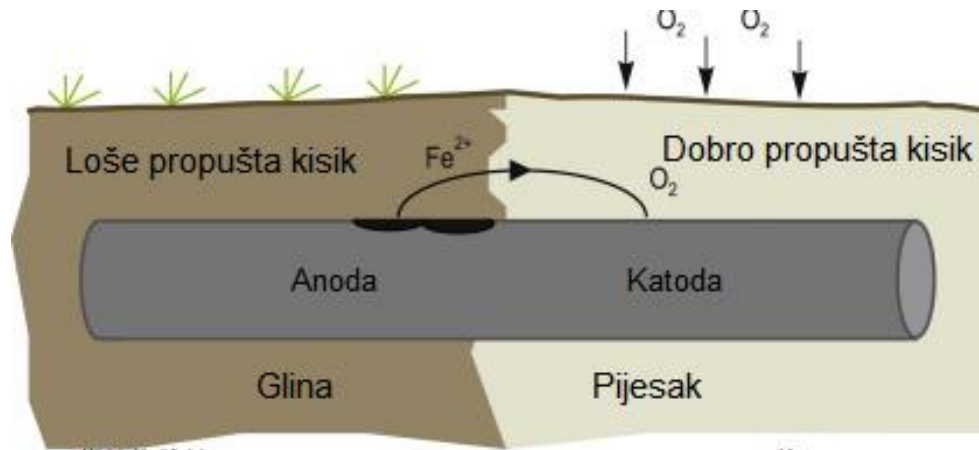
Na dnu vanjskih oštećenja od korozije mogu se pojaviti pukotine potpomognute okolišem (engl. *Environment-Assisted Cracks*, EAC). Zatim se šire kao intergranularne ili transgranularne pukotine kroz stijenkku cjevovoda izazivajući puknuće cjevovoda. Preduvjet za iniciranje različitih oblika vanjske korozije je lokalno oštećenje i nedostatak zaštitnog oksidnog sloja na vanjskoj površini cjevovoda. Uzrok tome su elektrokemijski procesi koji se odvijaju u dodiru metala s tlom, ali i zbog mehaničkih čimbenika kao što su visoka naprezanja. Osim opće korozije i lokalnih oblika korozije, prisutna je diferencijalna korozija čelija i njezine varijante, galvansko sprezanje i jamičasta korozija zajedno s korozijom pod naslagama, korozija zbog delaminacije te korozija zbog oštećenja obloge koji su prikazani na slici 4.2. [9].



*Slika 4.2 Prikazi karakterističnih oblika vanjske korozije ukopanih cjevovoda: a) Opća korozija; b) Rupičasta korozija; c) Jamasta korozija; d) Korozija ispod naslaga; e) Delaminacija-bubrenje; f) Korozija zbog oštećenja obloge [9]*

#### **4.1.1. Diferencijalna korozija ćelija**

Diferencijalna korozija ćelija je jedan od najčešćih oblika korozije ukopanih cjevovoda. Elektrodni potencijal cjevovoda koji prolazi kroz dva različita tla je različit (Sl. 4.3.). Različiti faktori poput neujednačene raspodjele koncentracije kisika u tlu, vlage, različitih vrsta tla i njihovih karakteristika te različite dubine i lokacije zakopanih cjevovoda, dovode do ovog oblika korozije. Varijacije navedenih faktora potiču stvaranje aeracijskih ćelija. Te ćelije uzrokuje koroziju metala zbog nejednakog dovoda kisika na površini materijala. Ova nejednaka razina kisika stvara anodna i katodna mjesta u korozivnoj ćeliji. Na primjer, elektrodni potencijal u glinastom tlu je više negativan nego u pjeskovitom tlu, što rezultira lokalnim povećanjem korozijskih djelovanja na dijelu cjevovoda u glinastom tlu [9].



Slika 4.3 Diferencijalna korozija čelija, izazvana različitim svojstvima tla [11]

#### 4.1.2. Galvansko sprezanje

Pojava galvanskog sprezanja, kao još jedan primjer diferencijalne korozije čelije, javlja se kada su dvije različite legure u kontaktu i izložene vanjskim utjecajima. Legure cjevovoda mogu biti napravljeni od različitih tipova čelika, npr. nehrđajućeg čelika i niskolegiranog čelika. To rezultira galvanskim sprezanjem i korozijom ako su legure izložene korozivnom uvjetima. Faktori koji doprinose galvanskom sprezanju su vlaga, kiselost tla i difuzija kisika i vodika [12].

#### 4.1.3. Opća korozija

Ovaj oblik korozije uzrokuje gubitak materijala koji nije lokaliziran na određenom mjestu. Umjesto toga, može doći do korozije veće i jednolične površine cjevovoda, prikazano na slici 4.4. Opća korozija je manje opasna u usporedbi s drugim oblicima korozije. Međutim, opća korozija može biti prisutna istovremeno s drugim agresivnim lokaliziranim oblicima korozije, stoga može uzrokovati iznenadni kvar ili propuštanje cjevovoda. Postoji nekoliko faktora koji uzrokuju jednoličnu koroziju, kao što su stanje površine cijevi, pH vrijednosti tla, vlaga, vanjska temperatura, sastav materijala cijevi, sadržaj soli, itd. [9].



*Slika 4.4 Opća korozija ukopane čelične cijevi[9]*

#### **4.1.4. Rupičasta korozija**

To je oblik lokalizirane korozije koji uzrokuje ozbiljna lokalna oštećenja na vanjskoj površini naftovoda i plinovoda. Pucanje stijenke cjevovoda i curenje često su uzrokovani rupičastom korozijom. Brzo prodire i napada, a teško je otkriti simptome ove korozije. Najčešće se pojavljuje na mjestima gdje je zaštitni sloj oštećen ili napadnut kemijskim sredstvima, stvarajući slabu točku koju voda ili korozivne otopine napadaju. Male udubine se mogu koncentrirati i spojiti stvarajući korozijske zakrpe na vanjskoj površini cjevovoda što rezultira značajnim gubitkom materijala na stijenci cjevovoda (Sl. 4.5). Postoji i nekoliko dodatnih čimbenika koji uzrokuju rupičastu koroziju, osim prethodno navedenih za jednoličnu koroziju, kao što su mikrobiološka aktivnost, izloženost kiselinama i drugim kemijski agresivnim tvarima u tlu [9].



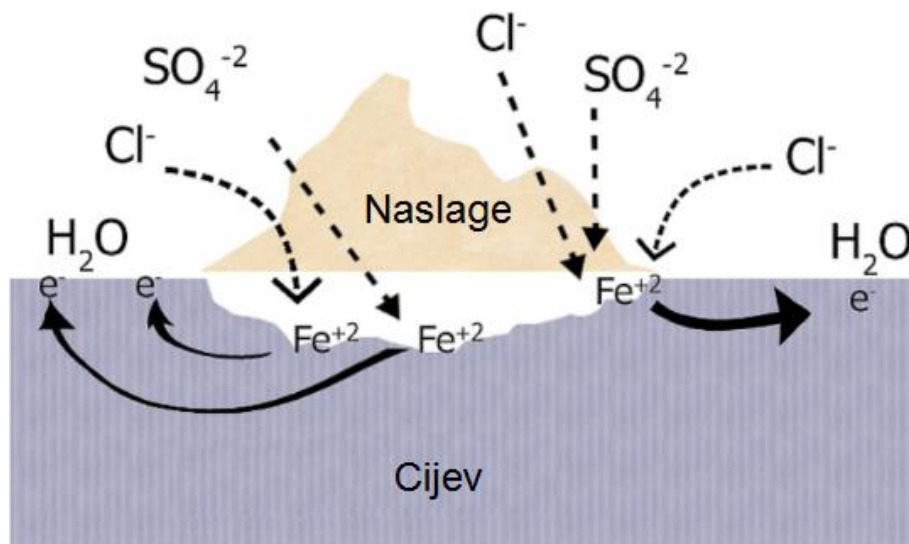
*Slika 4.5 Primjer rupičaste korozije cjevovoda [12]*

#### 4.1.5. Jamičasta korozija

Ovaj oblik lokalizirane korozije vizualno je sličan galvanskom sprezanju, ali može se pojaviti i između metala i nemetala. To uzrokuje nastanak korozijskih pukotina, čije bujanje, spajanje i prodiranje može izazvati pucanje stijenke cjevovoda. Jamičasta korozija ostavlja šupljine, rupe ili jame koja se formiraju na malom području ili u točki. Jame ili rupe su zaklonjene malom količinom hrđe na površini. Faktori koji doprinose jamičastoj koroziji na naftovodima i plinovodima mogu biti: hrapavost vanjske površine cijevi, kemijski sastav cijevi, pH i varijacija vlage u vanjskom okolišu, prijenos kisika, spoj metala i nemetala te izloženost solima [9].

#### 4.1.6. Korozija pod naslagama, delaminacija i korozija zbog oštećenja obloge

Kod ove tri navedene vrste korozije se radi o lokalnoj koroziji. Korozija pod naslagama (engl. *Under Deposit Corrosion*, UDC), predstavlja ozbiljan rizik za naftovode i plinovode. Još se naziva i "stanična korozija", te je visoko agresivna i uzrokuje duboke i prodorne pukotine. Ovaj oblik vanjske korozije, prikazan na slici 4.6, može biti izazvan različitim elektrokemijskim mehanizmima korozije, uključujući mikrobiološki induciranu koroziju [9].



Slika 4.6 Korozija pod naslagama [13]

Vanjska delaminacija ili ljuštenje cjevovoda, poznato i kao vodikovo bubrenje (Hydrogen Blistering, HB), tipičan je mehanizam oštećenja zbog prisustva vodika. Ovaj oblik vanjske korozije će biti objašnjen i analiziran u poglavlju 4.2.



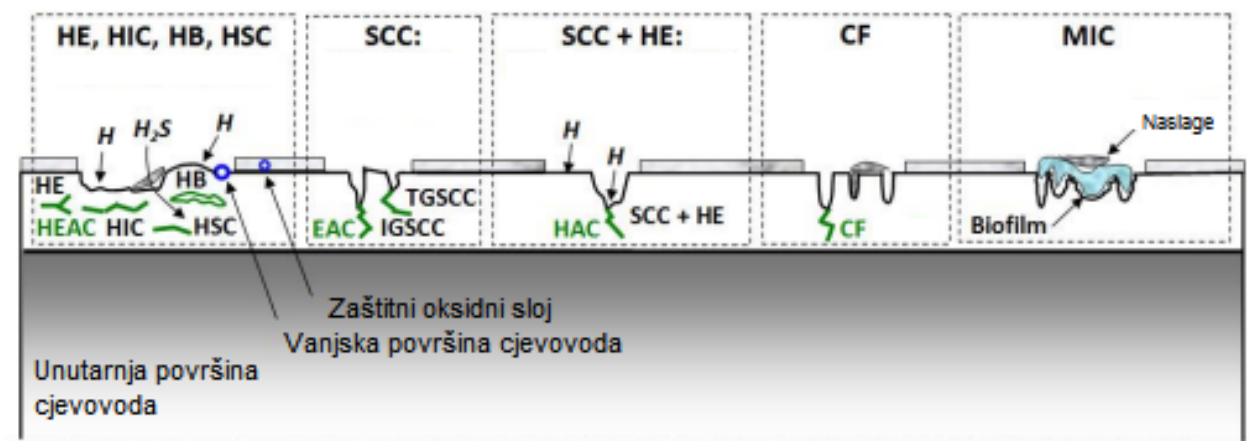
Korozija zbog oštećenja obloge ili premaza počinje upijanjem vode iz tla kroz oštećeni dio te dovodi do konačne faze potpunog lokalnog propadanja premaza. Nakon propadanja premaza, slijedi početak i širenje oštećenja uslijed nekog oblika lokalne korozije po cjevovodu [9].

## 4.2. Mehanizmi stvaranja korozije ukopanih cjevovoda

Postoji nekoliko vanjskih mehanizama korozije ukopanih cjevovoda uzrokovanih korozivnim okolišem u kojim se isti nalaze. Najčešći mehanizmi korodiranja uzrokovani vanjskom korozijom se mogu svrstati u pet skupina:

- vodikova krhkosti (HE), pukotine uzrokovane vodikom (HIC) i druga vodikova oštećenja (HB i HCS),
- korozija uz naprezanje (SCC),
- kombinirana SCC + HE,
- korozija izazvana zamorom (CF),
- mikrobiološki inducirana korozija (MIC) [8].

Navedeni mehanizmi propadanja zbog korozivnog tla zajedno s raznim oblicima korozije potpomognutim okolišem (EAC) kod ukopanih naftovoda i plinovoda, sažeti su i prikazani u shematskom obliku na slici 4.7.

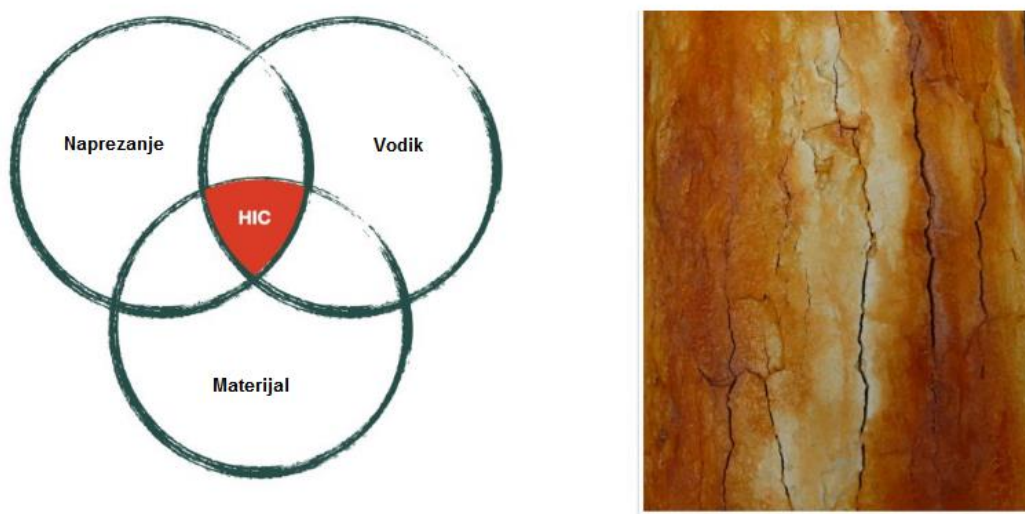


Slika 4.7 Mehanizmi korozije zbog utjecaja vodika: HE - vodikova krhkost; HIC - pukotine uzrokovane vodikom; HB - vodikovo bubrenje; HSC - vodikova korozija uz naprezanje; SCC - korozija uz naprezanje; TGSCC - transgranularna SCC; IGSCC - intergranularna SCC; [9]

Mehanizmi propadanja označeni su skraćenicama (HE, HIC, HB, HSC, SCC, TGSCC, IGSCC, SCC + HE, CF i MIC) crnim slovima, dok odgovarajući oblici korozije poput korozije potpomognuti okolišem (EAC), kao što su HEAC, HAC i CF, označeni su zelenim slovima.

#### 4.2.1. Korozija uzrokovana vodikom

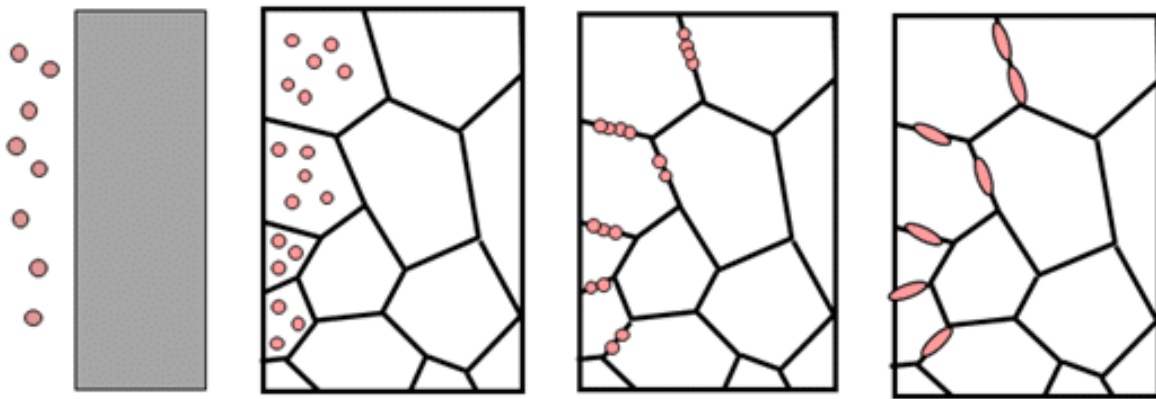
Najučestalije korozije uzrokovane vodikom su vodikova krhkost (engl. *Hydrogen Embrittlement*, HE) i pukotine uzrokovane vodikom (engl. *Hydrogen-Induced Cracking*, HIC). Tipično djelovanje koje može uzrokovati difuziju vodika u metal cjevovoda je zavarivanje. Ova dva mehanizma vodikove korozije (HE i HIC) su različita. Pukotine uzrokovane vodikom javljaju se zbog spajanja atoma vodika u molekule vodika u plinskom stanju kod čeličnih cjevovoda. To je korozijski mehanizam koji se javlja pri umjerenim temperaturama i prirodnom okruženju. Legure i čelici visoke čvrstoće osjetljiviji su na ovu vrstu korozije, ali do nje će doći samo pod određenim uvjetima (Sl. 4.8). Potreban je izvor vodika, a u materijalu bi trebalo postojati vlačno naprezanje [14]. Učinci pritiska vodika iniciraju unutarnje pukotina u zidovima cjevovoda i potiču njihovo širenje.



Slika 4.8 Pukotine uzrokovane vodikom [14]

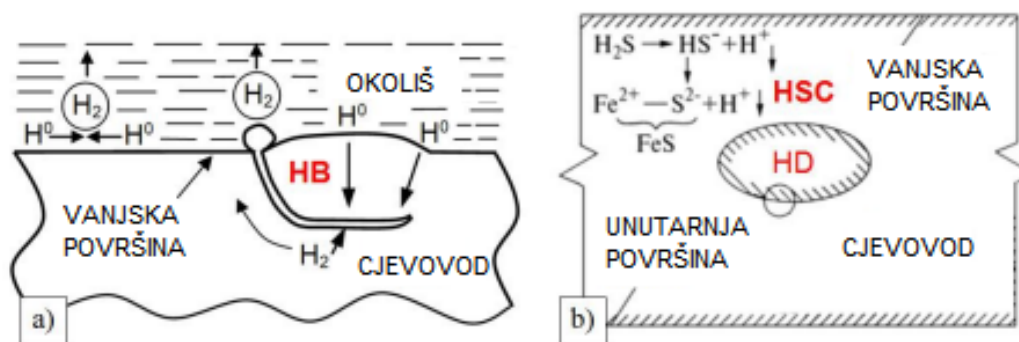
Općenito, vodikova krhkost za različite čeliče cjevovode, potiče smanjenje žilavosti i otpornosti na lom, što rezultira vodikovim okolišem potpomognutim pukotinama (*Hydrogen Environment-Assisted Cracking*, HEAC) [9]. Nakon što se apsorbira, vodik smanjuje naprezanje potrebno za nastanak i širenje pukotina u metalu, što dovodi do krhkosti. Na sobnoj temperaturi atome vodika mogu apsorbirati legure ugljičnog čelika. Apsorbirani vodik može

biti prisutan u atomskom ili molekularnom obliku. Uz dovoljno vremena, vodik difundira do granica metalnih zrna i stvara mjehuriće na granicama metalnih zrna (Sl. 4.9). Ovi mjehurići vrše pritisak na metalna zrna do razina na kojima metal ima smanjenu duktilnost i čvrstoću [15]. Vodikova krhkost javlja se najviše u čelicima, ali i u niklu, titanu, kobaltu i njihovim legurama. Vodikova krhkost složen je proces koji uključuje niz različitih mehanizama koji doprinose slabljenju materijala, od kojih ne moraju svi biti prisutni. Mehanizmi uključuju stvaranje krhkih hidrida, stvaranje šupljina koje mogu dovesti do formiranja mjehurića pod visokim pritiskom, pojačanu dekoheziju na unutarnjim površinama i lokalnu plastičnost na vrhovima pukotina koje pomažu u širenju pukotina [16].



Slika 4.9 Proces nastajanja vodikove krhkosti [15]

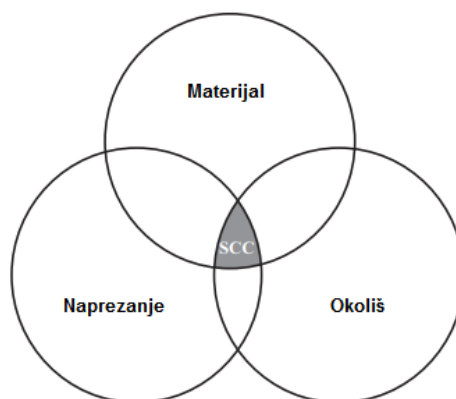
Vodikovo bubrenje (engl. *Hydrogen Blisters*, HB), se manifestira kao ispupčenje na vanjskoj površini cjevovoda u odsustvu vanjskog naprežanja. Ta ispupčenja su rezultat vodikom izazvanog delaminiranja stijenke cijevi. Slično delaminaciji - raspadanje materijala čelične cijevi na nekoliko slojeva i stvaranje plinskih šupljina, može se pojaviti kao rezultat pukotina uzrokovane naprežanjem uz vodik (engl. *Hydrogen Stress Cracking*, HSC). Takva korozija nastaje kada atomi vodika difundiraju u prazne prostore i uključine u materijalima kao što su ugljični i niskolegirani čelici i formiraju molekule. Pritisak tih novonastalih molekula dovodi do pukotina u materijalu (Sl. 4.10).



Slika 4.10 Mehanizmi oštećenja vodikom naftovoda i plinovoda: (a) Vodikovo bubrenje (HB); (b) Pukotine uzrokovane naprezanjem uz vodik (HSC) praćene vodikovim raslojavanjem (HD); [9]

#### 4.2.2. Korozija izazvana zamorom

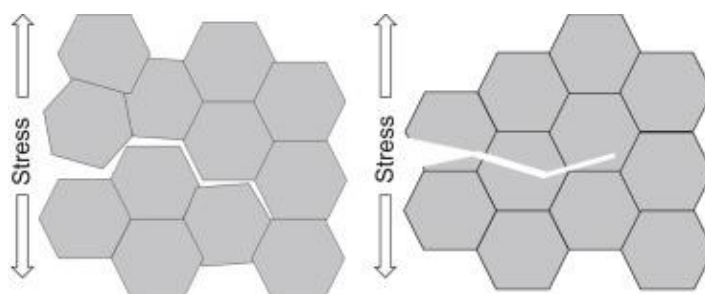
Korozija zbog naprezanja (engl. *Stress Corrosion Cracking*, SCC), je pojam koji se koristi za opisivanje kvara u materijalima koji su u radu, a do kojeg dolazi sporim širenjem pukotina izazvanim okolišem. To je jedna od najagresivnijih manifestacija korozije. Širenje pukotine rezultat je kombiniranih interakcija mehaničkog naprezanja i korozijskih reakcija. Za određene materijale, kao što su čelici u ukopanim cjevovodima, pojava SCC-a ovisi i o agresivnoj okolini, opterećenju i posebno vlačnom naprezanju (Sl. 4.11).



Slika 4.11 Tri bitna čimbenika potrebna za pojavu korozije izazvane zamorom [17]

Dakle, sva tri faktora su potrebna istovremeno da bi se korozija zbog naprezanja dogodila. Naprezanja koja dovode do SCC-a mogu nastati zbog upotrebe metalnih komponenti u radu ili zbog zaostalih naprezanja koja su uvedena tijekom proizvodnje, kao što su zavarivanje i savijanje cijevi. Naprezanje potrebno da bi se izazvao SCC obično je malo, ali lokalno se može

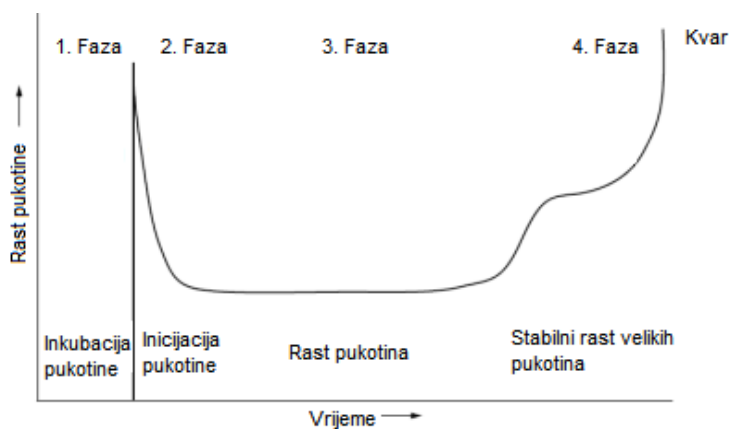
razviti koncentracija naprežanja, jer pukotine često započinju na površinskim greškama koje ili postoje prije ili se stvaraju tijekom rada zbog korozije, trošenja ili drugih procesa. Korozivno okruženje može biti stalno radno okruženje, poput morske vode na morskim platformama ili tla na kojem su pokopane cijevi. Pucanje obično neće nastati kada postoji značajna količina korozije, a pukotine uzrokovane ovim tipom korozije mogu započeti i širiti se s malo vanjskih znakova korozije. Postoje dvije vrste SCC korozije: intergranularna i transgranularna. U intergranularnom načinu, pukotine rastu duž granica zrna, dok u transgranularnom načinu pukotine slijede put preko zrna prikazano na slici 4.12.



Slika 4.1 Vrste SCC korozije; (a) Intergranularna SCC korozija; (b) Transgranularna SCC korozija; [18]

Korozija zbog naprežanja se odvija u 4 faze:

- stadij inkubacije,
- inicijacija pukotina,
- rast pukotine,
- stabilni rast pukotine do kvara (Sl. 4.13).



Slika 4.2 - Četiri faze inicijacije i rasta SCC pukotina [9]

#### 4.2.3. *Kombinirana SCC + HE*

Korozija zbog naprezanja (SCC), kao ozbiljan oblik mehanizma oštećenja, često je popraćena učincima vodikove krhkosti (HE), na širenje pukotine koje mogu istovremeno izazvati lomove cjevovoda. SCC mehanizmi povezani s vodikom izazivaju pukotine potpomognute vodikom (engl. *Hydrogen-Assisted Cracking*, HAC). Mehanizmi za HE-kontrolirani SCC uključuju vlačna naprezanja i difuziju vodika te njegovu dovoljnu koncentraciju u zoni loma na vrhu pukotine u čeliku [9].

#### 4.2.4. *Korozija izazvana zamorom*

Zamor je mehanizam u kojem dolazi do oštećenja kada su materijali podvrgnuti cikličkim opterećenjima. Korozija izazvana zamorom, poznata kao (engl. *Corrosion Fatigue*, CF), uzrokovana je cikličkim naprezanjima metala koji se nalazi u korozivnom okruženju. Kod cjevovoda, zamor stvara sitne pukotine koje rezultiraju curenjem kada se spoje u veće pukotine što posljedično može dovesti do kvara naftovoda i plinovoda što je vidljivo na slici 4.14. S vremenom se na unutarnjem promjeru cijevi stvaraju male pukotine koje će se ponavljanjem naprezanja širiti kroz stijenku cijevi. Pukotine uzrokovane zamorom od korozije često će se formirati na mjestima gdje je ograničeno širenje i skupljanje cijevi tijekom toplinskih ciklusa. Uobičajeno mjesto na kojem se mogu pronaći pukotine uzrokovane zamorom od korozije su podupirači ili spojevi na cijevima [19]. Unutarnji pritisak tekućina u naftovodima i plinovodima ima dinamički karakter i obično oscilira što izaziva ciklička naprezanja u stijenci cjevovoda. Ovo cikličko naprezanje, zajedno s uključenim koncentratorima naprezanja vanjske površine cjevovoda u različitim oblicima vanjske korozije i taloženja oštećenja kao što su rupe i pukotine, osiguravaju uvjete za nastanak korozije izazvane zamorom. Zamor i korozijski zamor korodiranih naftovoda i plinovoda mogu ubrzati njihovo iznenadno otkazivanje [9].



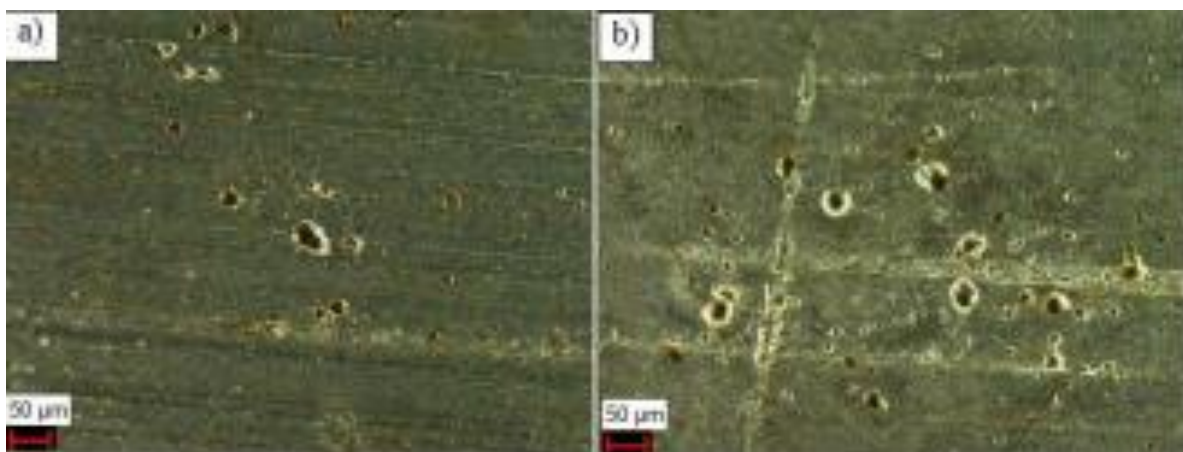
Slika 4.3 Pukotine cijevi izazvane zamorom [19]

#### 4.2.5. Mikrobiološki izazvana korozija

Bakterije na vanjskoj površini naftovoda i plinovoda mogu uzrokovati mikrobiološki izazvanu koroziju (engl. *Microbiologically Influenced Corrosion*, MIC). Općenito, mikroorganizmi koji se nalaze na metalu ili uz njega ne napadaju metal izravno niti uzrokuju jedinstveni oblik korozije. Njihovi nusproizvodi metabolizma izazivaju ili potiču koroziju koja može biti lokalizirana u obliku rupičaste korozije, kao opća korozija ili se korozija pojavljuje ispod naslaga u prisutnosti biofilmova. Tipično, nusproizvodi rastuće mikrobiološke kolonije ubrzavaju proces korozije. Mikroorganizmi su često povezani s lokaliziranim oblicima korozije, uključujući rupičastu koroziju, jamičastu koroziju, galvansku koroziju, interkristalnu koroziju i SCC. Veliki broj mikroorganizama uključen je u MIC metala [17].

Glavne vrste bakterija povezane s korozijom su sljedeće:

- bakterije koje reduciraju sumpor(Sl. 4.15),
- bakterije koje oksidiraju sulfide,
- bakterije koje oksidiraju željezo,
- bakterije koje reduciraju željezo,
- bakterije koje proizvode organsku kiselinu,
- gljive koje stvaraju kiselinu.



Slika 4.4 Mikrobiološki izazvana korozija zbog reduciranja sumpora [17]

Bakterije koje reduciraju sulfate (engl. *Sulfate-Reducing Bacteria*, SRB), su anaerobni mikroorganizmi koji su uključeni u brojne probleme mikrobiološki izazvane korozije. SRB kemijski reduciraju sulfate u sulfide, proizvodeći spojeve kao što je  $H_2S$ , koji mogu značajno utjecati na anodne i katodne procese. U konačnici mogu pojačati koroziju materijala ili u slučaju željeza, proizvesti željezni sulfid kao proizvod korozije. SRB se smatra jako agresivnim mikroorganizmima koji uzrokuju neočekivani otkazivanje i kvar materijala što je prikazano na Slici 4.16.

Nadalje, bakterije koje oksidiraju sulfide (engl. *Sulfide-Oxidizing Bacteria*, SOB), su aerobne vrste bakterija koje oksidiraju sulfid ili elementarni sumpor u sulfate. Neke vrste oksidiraju sumpor u sumpornu kiselinu što dovodi do vrlo kiselog okoliša ( $pH < 1$ ). Visoka kiselost povezana je s degradacijom premaza i s korozijom metala.

Sljedeća vrsta bakterija su bakterije koje oksidiraju željezo (engl. *Iron-Oxidizing Bacteria*, IOB). Bakterije koje oksidiraju željezo zajedno s MIC obično se nalaze u korozijskim pitovima na čelicima.

Uključenost bakterije koje reduciraju željezo (engl. *Iron-Reducing Bacteria*, IRB) u koroziji čelika ima dvojako objašnjenje. Predloženo je da IRB može izazvati zaštitu ugljičnog čelika, no također se smatra i da uzrokuje pojačanu koroziju smanjenjem i uklanjanjem pasivnih filmova na metalnoj površini. Uobičajeni mehanizam IRB koji izaziva koroziju je redukcija i otapanje  $Fe^{3+}$ .

Neki anaerobni mikroorganizmi proizvode organske kiseline. Te su bakterije mogu pronaći u zatvorenim sustavima, uključujući cjevovode za prijenos plina i ponekad, zatvorene sustave vode. Također, određene gljive proizvode organske kiseline koje napadaju metale te mogu stvoriti okruženja pogodna za anaerobne vrste [17].

Pokazalo se da je oko 20 do 30% vanjske korozije uzrokovano MIC-om u ukopanim naftovodima i plinovodima. Karakteristike vanjske površine cijevi koje doprinose pojavi mikrobiološki inducirane korozije su hrapavost, područje zavarivanja cijevi, primjena nepovoljne ili pak odgovarajuće katodne zaštite, prisutnost taloga i procesi razgradnje premaza [9].



## 5. Površinske zaštitne prevlake ukopanih cjevovoda

Za konstrukciju magistralnih naftovoda, plinovoda i produktovoda koriste se isključivo čelične cijevi od ugljičnih ili legiranih čelika. One su prilagođene dimenzijama i kvalitetom za prijevoz nafte, naftnih derivata i plina. Odabir cijevi i materijala se provodi u skladu s važećim standardima i propisima kako bi se osigurala strukturna čvrstoća i integritet cjevovoda u različitim temperaturnim uvjetima i drugim predviđenim okolnostima. Tako se jamči otpornost materijala na zahtjeve transportiranih tvari te osigurava hermetičnost i elastičnost cjevovodnog sustava [20]. Osim odabira cijevi i materijala, neophodno je odabrati i ispravan način korozivne zaštite cjevovoda.

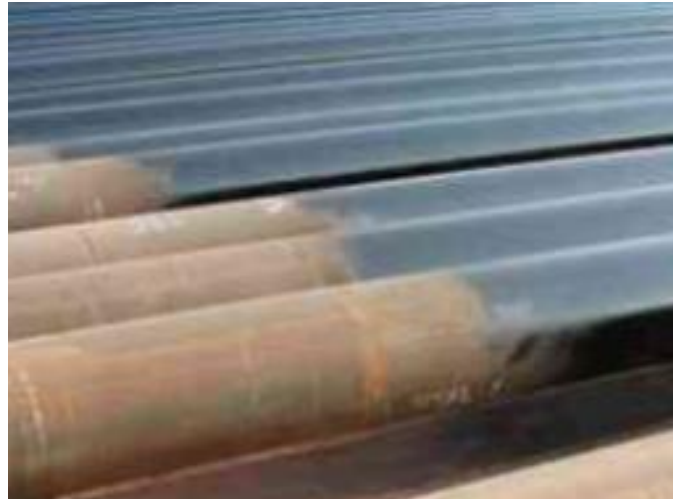
### 5.1. Metode korozivne zaštite cjevovoda

Primarna metoda sprječavanja ili ublažavanja vanjske korozije na ukopanim cjevovodima je kombinacija katodne zaštite i premaza. Katodna zaštita uključuje primjenu struje na cjevovod kroz tlo iz vanjskog izvora, čime nadjačava lokalne anode i čini cijelu izloženu površinu cjevovoda katodnom. Premazi su barijere koje služe za odvajanje čelika od elektrolita i tako sprječava koroziju. Primjena same katodne zaštite za zaštitu od korozije ne bi bila praktična, jer je količina potrebne struje proporcionalna izloženoj površini, a također bi bila skupa katodna zaštita dugog, "golog" cjevovoda. Stoga su potrebni premazi za smanjenje što je moguće više izložene površine, te su stoga primarna metoda za kontrolu i prevenciju. Međutim, premazi sami po sebi ne bi bili potpuno učinkoviti. Oštećenja tijekom izgradnje i degradacija tijekom vremena su neizbježni. Zbog toga je katodna zaštita nužna kako bi se spriječila korozija na mjestima gdje je premaz oštećen. Ostale preventivne antikorozivne zaštite mjere su postupci poput postavljanja metalne cijevi unutar druge cijevi koja sadrži punilo u svom prstenastom prostoru. To je metoda za zaštitu strukture od utjecaja na okoliš i time se smanjuje ili uklanja njegov potencijal za koroziju. Ova metoda "cijev u cijevi" je prikladna za kratke dijelove cjevovoda [22].

### 5.2. Povijest zaštitnih prevlaka

Kroz povijest, metode i načini zaštite su se mijenjali i napredovali, no najveće promjene su doživjeli u posljednja tri desetljeća. Od 1950-ih kreće upotreba prvih premaza za zaštitu ukopanih cjevovoda. U razdoblju od 1950. do 1960. uobičajeni zaštita cjevovoda uključivala je

premaze na bazi ugljenog katrana, asfaltne premaze, prve oblike premaza na bazi masti, prve hladne trake i prve trake koje se nanose grijanjem, te prve premaze emajla od katrana (Sl. 5.1 i Sl. 5.2).



*Slika 5.1 Cijevi obložene katranom [21]*

Svi navedeni premazi su bili koncipirani s ciljem izolacije cijevi od okoline te sprječavanja prodora vode na površinu cijevi. Također su pružali otpor prolasku električne struje iz okoliša na površinu cijevi. Nažalost, mnogi od tih premaza su bili teški za nanošenje i često nisu ravnomjerno prijanjali na površinu cijevi, što je rezultiralo nepravilnostima, rupama i drugim nedostacima. Većina tih premaza također se s vremenom razgrađivala u tlu. Nakon nekoliko godina, mnogi premazi postali su porozni ili bi se odvajali od površine cijevi. Ti premazi bili su nanošeni na terenu kontinuirano pomoću strojeva, nakon što su spojevi cijevi zavareni. Prethodno bi bili očišćeni struganjem ili četkanjem žičanom četkom. Međutim, te metode čišćenja nisu bile efikasne, a ostatci prašine i metala onemogućavali su dobru vezu između premaza i cijevi.



*Slika 5.5.2 Cijev obložena asfaltom i katranom [21]*

U 1960-ima su razvijeni i primijenjeni noviji premazi s duljim vijekom trajanja, a poboljšana je i sposobnost prijanjanja premaza od katrana. U 1970-ima i 1980-ima su uvedeni rani epoksidni premazi i nove hladno nanošene trake. Također su razvijeni novi premazi na bazi voska ili masti. U 1990-ima su se pojavili napredniji i učinkovitiji premazi za cjevovode, uključujući suhe praškaste i mokro nanese epoksidge koji su postali široko korišteni. Ovi premazi su pokazali dobra dielektrična svojstva i sporije su se razgrađivali u prirodi. Međutim, imali su ograničenu mehaničku čvrstoću pa bi grubo rukovanje rezultiralo šupljinama u premazu. Također, razvijeni su poliolefinski premazi koji su se odlično prijanjali na površinu cijevi, pružajući dobru otpornost na prljavštinu i mehanička oštećenja. Međutim, ovi premazi su bili skupi. Epoksidni premaz spojen fuzijom, poznat i kao tankoslojni epoksid, bio je jedan od tipova premaza koji se primjenjivao 1990-ih. Sastojao se od praha na bazi epoksidge koji se trenutno široko koristi za zaštitu cjevovoda. Ovaj premaz pruža izvrsnu zaštitu i postao je popularan izbor u industriji cjevovoda. Usporedno s epoksidnim premazima spojenih fuzijom, pojavile su se skupljajuće prevlake koje se naširoko primjenjuju. Takav način zaštite sastoji se od posebne plastike koja kada se nanese na spoj i zagrije, smanjuje svoj volumen i skuplja se oko cijevi. Za neke skupljajuće prevlake bilo je potrebno nanošenje temeljnog premaza na epoksidnoj bazi ili priprema površine.



*Slika 5.5.3 Skupljajuće presvlake [22]*

U pomorskim cjevovodima često se koriste betonski premazi kako bi se smanjio utjecaj uzgona te spriječilo oštećenje uzrokovano zamorom i vibracijama uslijed valova i morskih struja (Sl. 5.3). Također, u pomorskim primjenama popularna je upotreba termički raspršenih metalnih premaza, poput aluminijskog i cinkovog. Te premaze odlikuju niske cijene uz izvrsnu zaštitu od korozije u širokom rasponu temperatura i uvjeta [22].

### **5.3. Podjela površinskih zaštitnih prevlaka ukopanih cjevovoda**

Postoji više vrsta podjela površinskih zaštitnih prevlaka cjevovoda. Prva podjela površinskih zaštitnih prevlaka cjevovoda jest s obzirom na okoliš u kojem se cjevovod nalazi. Prevlake mogu služiti za zaštitu vanjske površine ukopanih cjevovoda, za zaštitu od atmosferskih uvjeta, za zaštitu prijelaznih područja između tla i atmosfere te prevlake unutarnje stijenke. Nadalje će se obrađivati samo prevlake ukopanih cjevovoda.

Druga podjela površinskih zaštitnih prevlaka jest s obzirom na lokaciju nanošenja prevlaka na cijev. Prevlake mogu biti nanošene na terenu ako mogućnost i uvjeti nanošenja to dopuštaju, a mogu biti nanošene i u tvornici. Najveći nedostatak nanošenja prevlaka na terenu je ovisnost o vremenskim prilikama te vlazi i temperaturi. Naravno, neke prevlake kao što su epoksidni premazi spojeni fuzijom, moguće je nanijeti samo u proizvodnom pogonu.

Sljedeća podjela prevlaka je na prevlake koje se koriste za nove cijevi cjevovoda te na prevlake koje se koriste za popravke postojećih cjevovoda. Prevlake koje se koriste za nove cjevovode su:

- premazi na bazi katrana,
- epoksidni premaz spojen fuzijom,
- dvoslojni epoksidni premaz spojen fuzijom,
- troslojna polietilenska/polipropilenska prevlaka,
- poli-stakleni premaz,
- beton,
- trake.

Prevlake koje se koriste za popravke postojećih cjevovoda:

- trake i viskoelastične obloge,
- prevlake na bazi voska,
- skupljajuće prevlake,
- mastike,
- ostali [23, 24].

### ***5.3.1. Premazi na bazi katrana***

Premazi koji se temelje na bazi katrana su ugljeni katran i asfaltni emajli (bitumen). Ugljeni katran je smeđa ili crna tekućina visoke viskoznosti. On nastaje kao nusproizvod karboniziranja ugljena za proizvodnju koksa ili nusproizvod plinificiranja ugljena za proizvodnju plina. Ugljeni katrani su složene i varijabilne smjese oko 200 tvari, kao što su fenol, policiklički aromatski ugljikovodici i heterociklički spojevi.

Asfalt je teška mineralna tvar, po kemijskom sastavu mješavina ugljikovodika koja je tamnosmeđe do crne boje. Asfalt se dobiva miješanjem bitumena s agregatima kao što su pijesak, kamen i šljunak.

Puno današnjih cjevovoda obložena je toplo nanesenim plastificiranim ugljenim katranom ili asfaltnim emajlom. Katrani asfalt mogu se koristiti s i bez materijala za punjenje. Kada su ispunjeni, nazivaju se emajli ili mastike. Punila se obično dodaju maksimalno od oko 30%

težine što je ekvivalentno oko 15 do 20% volumena. Katran s punilima ima višu temperaturu omekšavanja od neispunjenog katrana, te ima smanjeno svojstvo tečenja. To je važno u tropskim zemljama ili u situacijama gdje je cjevovod smješten na lokaciji gdje se koristi na povišenoj temperaturi. Također, punilom se poboljšava otpornost premaza na udarce i trošenje. U današnjoj praksi materijali koji se često koriste su talk, prah plovuća, mikro-azbest i prašak od škrljevca. Naftni asfalti se dobivaju na dva načina:

- kao čisti ostatak od destilacije,

- "puhana" vrsta koja se priprema djelomičnom oksidacijom asfalta upuhivanjem zraka.

"Puhani" asfalt ima prednost pred ravnim jer ima bolju otpornost na udarce, budući da je "gumastije" prirode. To je razlog zašto se većina naftnih asfaltnih premaza temelji na "puhanoj" varijanti.

Glavne razlike između asfalta i katrana su što:

- katran upija manje vode nego asfaltni premaz,

- katranski emajli ima bolje prijanjanje od asfaltnih emajla, ali malo razlika se može primijetiti u praksi,

- asfaltni emajli se lakše nanose jer proizvode manje neugodne pare i obično se primjenjuju na nižim temperaturama [21].

Katreni i asfaltni premazi se postavljaju na isti način. Nanose se tri sloja koji se sastoji od temeljnog premaza, ojačanja od fiberglasa ili mineralnog filca i vanjske prevlake, tj. staklenih vlakana impregniranim emajlom od katrana.

Postupak nanošenja premaza sastoji se od:

1. Nanošenja sintetskog ili epoksidnog temeljnog premaza preko cijevi koja je površinski tretirana (očišćena, ohrapavljena i na odgovarajućoj temperaturi),

2. Nanošenja sloja emajla od katrana minimalne debljine 2,4 mm preko cijevi s temeljnim premazom,

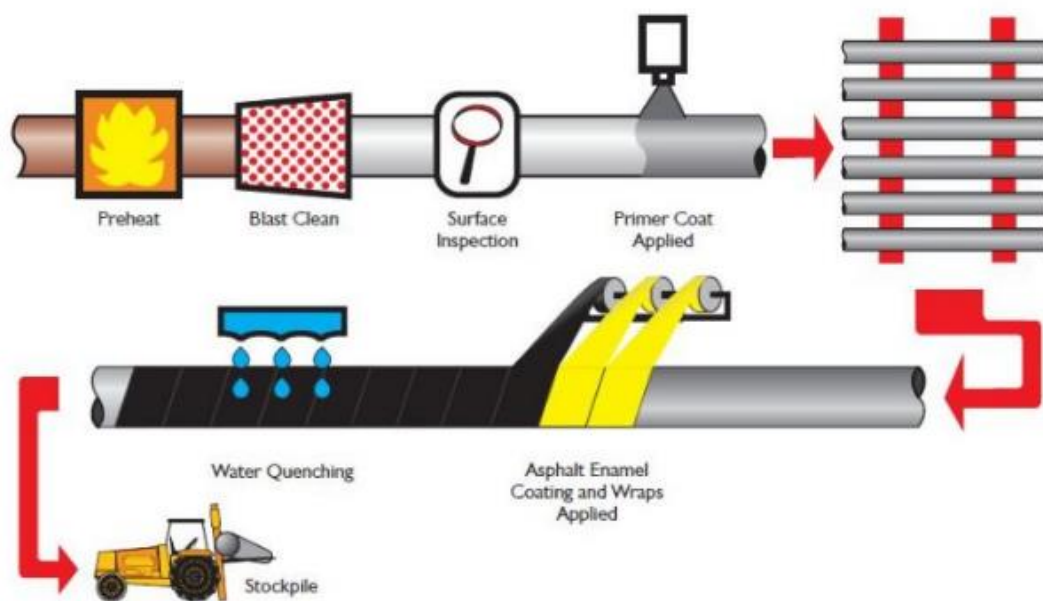
3. Nanošenja unutarnjeg omotača od staklenih vlakana vezanih smolom koja dodaju mehaničku čvrstoću emajlu, sprječavaju puzanje i povećavaju otpornost na udarce,

4. Nanošenja drugog sloja emajla od katrana minimalne debljine 2,4 mm,

5. Nanošenja vanjskog omotača od impregniranih staklenih vlakana,

6. Tretiranja vanjske površine emulzijom lateks boje i vode [24],

te je shema izrade prikazan na slici 5.4.



Slika 5.4 Shema procesa nanošenja asfaltnih premaza [25]

Vanjske prevlake od staklenih vlakana su porozne, što omogućuje isparavanje tijekom nanošenja. Isparavanje osigurava prodiranje vrućeg emajla i spajanje vanjskog sloja s površinom. Prevlake od staklenih vlakana zamijenile su ekološki neprihvatljive azbestne filcane prevlake, koje nisu bile porozne i često su zarobljavale pare, što je dovodilo do šupljina ili odvajanja filca [24].

S vremenom, prevlake od katrana i asfaltne prevlake postupno zastarijevaju, uglavnom zbog nedostupnosti izvođača za provođenje tako glomaznog procesa nanošenja, ali i zbog toga što su razvijene nove trake ojačane vlaknima da zamijene stari format. Današnje prevlake od katrana su integrirani, tvornički izrađen proizvod koji se lako nanosi, bilo unutar pogona za proizvodnju cijevi ili na mjestu projekta gdje se cijevi puštaju u pogon [26].



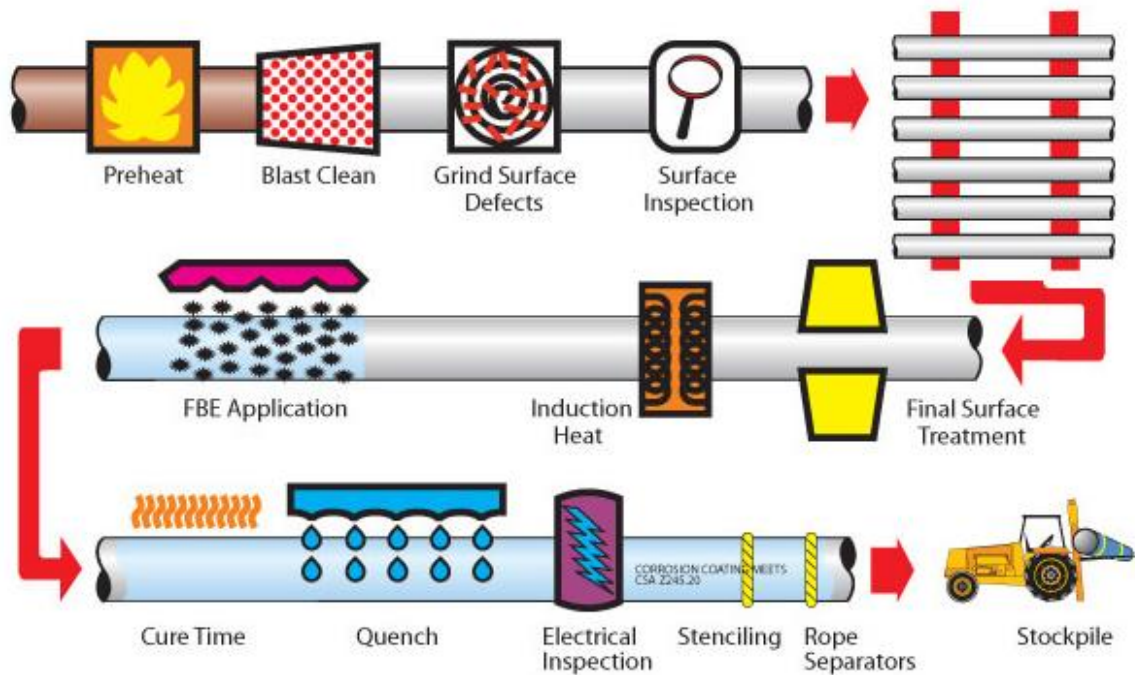
Slika 5.5 Primjer premaza na bazi katrana [26]

### 5.3.2. Epoksidni premaz spojen fuzijom

Epoksidni premazi su polimeri, odnosno skupine kemijskih spojeva koji se sastoje od lančanih molekula koje se ponavljaju. Molekularna struktura polimera je odgovorna za žilavost i elastičnost. Oni se u tekućem stanju nanose na cijevi. Epoksidni premazi se stvrđavaju kroz kemijske reakcije, koje su uzrokovane njihovim spajanjem s drugim tvarima ili zagrijavanjem na visoke temperature. Tijekom tog procesa, epoksid postaje "umrežen", tj. niti polimera se formiraju u otvrdnutu strukturu. Ovo svojstvo epoksida koristi se u primjeni fuzijski vezanih epoksidnih premaza na cijevima, kako bi se osigurala dugotrajna otpornost na koroziju. Na tipičnim temperaturama nanošenja premaza, koje su općenito u rasponu od 180°C do 250°C, sadržaj praha se topi i prelazi u tekući oblik. Nakon stvrđavanja, premaz se ni na koji način ne može vratiti u svoj izvorni oblik, što znači da je reakcija nepovratna. Dodatno zagrijavanje ne tali premaz, što ga čini duroplastičnim premazom [24].

Epoksidni premaz vezani fuzijom (engl. *Fusion Bonded Epoxy*, FBE), na cijevi se nanose u proizvodnim pogonima opremljenim za takav proces (Sl. 5.6). Terenska primjena epoksidnih premaza vezanih fuzijom nije uobičajena zbog izazova postizanja iste razine kvalitete, postojanosti i kontroliranih uvjeta kao u tvorničkim postavkama.





Slika 5.6 Shema procesa proizvodnje epoksidnog premaza spojenog fuzijom [24]

Postupak nanošenja premaza sastoji se od:

- 1. Pripreme vanjske površine cijevi;

Cijev se priprema kroz dva pjeskarenja. Nakon prvog pjeskarenja cijev ulazi u peć za zagrijavanje gdje se grije na 130 °C. Zatim ponovno slijedi pjeskarenje do čiste i bijele površine te stvaranja potrebne hrapavosti. U ovoj fazi pjeskarenja, površina cijevi se provjerava postoje li nedostaci koji se moraju ukloniti. Na završetak svake cijevi se ugrađuje spojnica koja se koristi za spajanje i brtvljenje dva spoja cijevi, tako da se dvije cijevi guraju kroz ostatak procesa. Zadnji korak pripreme cijevi je uranjanje u kiselu kupku kako bi se uklonili površinski kontaminanti.

- 2. Zagrijavanje cijevi;

Nakon kisele kupke i ispiranja, cijev ulazi u niz peći koje podižu temperaturu cijevi na približno 475 °C prije nanošenja premaza.

- 3. Nanošenje premaza;

Cijev se priprema za ulazak u komoru za premazivanje. Spoj između cijevi je pokriven, kako bi se kasnije omogućilo zavarivanje. Cijev izlazi iz komore za premazivanje gdje se nanosi

mlaz epoksi smole debljine 15 mm na vruću cijev. Traka oko spoja se uklanja, a cijev stavlja u komoru za dozrijevanje.

- 4. Dozrijevanje i hlađenje;

U sljedećem koraku ovog procesa cijev ulazi u komoru za dozrijevanje i vodom se hladi na 250 °C. Kada dozrijevanje završi, cijev izlazi iz komore te se dodaje oznaka na cijev na kojoj se navodi naziv tvrtke, informacije o veličini te debljini stijenke cijevi.

- 5. Inspekcija;

Inspekcijom se provjerava debljina premaza i greške u premazu. Istosmjerna struja od 2000 V se provodi kroz cijev, te se detektorom otkrivaju moguće greške. Popravak manjih nedostataka je dozvoljen, ali samo dok je cijev vruća.

- 6. Skladištenje;

Konopci se postavljaju oko spojeva cijevi kako bi ostali odvojeni. Cijevi su odvojene jedna od druge postavom kako bi se spriječilo oštećenje premaza [23]. Shema procesa je prikazana na slici 5.7.

Takvim premazom cijev je zaštićena pri umjerenim radnim temperaturama, od -30°C do 110°C. U normalnim uvjetima skladištenja, takva cijev kemijski ne reagira s atmosferilijama.

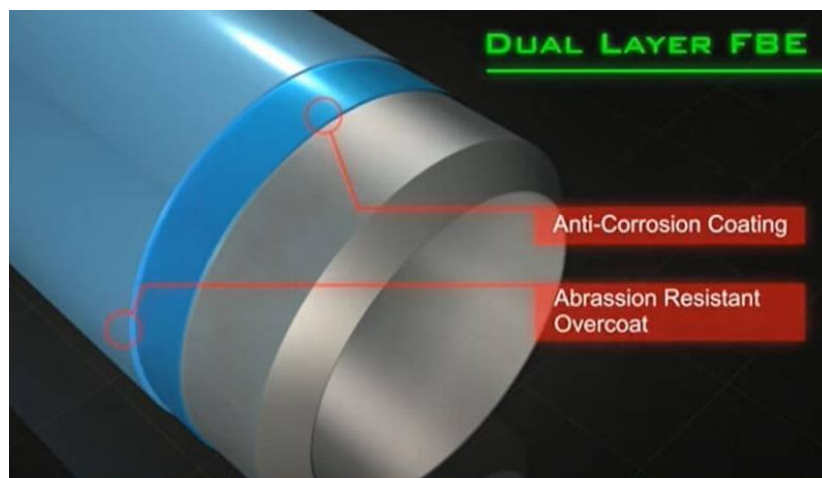


*Slika 5.7 Proces proizvodnje epoksidnog premaza spojenog fuzijom; a) Cijev prije pripreme; b) Cijev nakon pripreme i ugrađivanja spojnice; c) Zaštita spoja od premaza ; d) Premaz ; e) Skidanje zaštite; f) Skladištenje [23]*

### 5.3.3. Dvoslojni epoksidni premaz spojen fuzijom

Dvoslojni epoksidni premaz spojen fuzijom je varijanta FBE premaza gdje se umjesto jednog sloja FBE premaza dodaje još jedan sloj za dodatnu zaštitu. Ta dva sloja su formirana od:

- 1. sloja koji služi za zaštitu od korozije. Ovaj sloj je epoksidni premaz spojen fuzijom,
- 2. sloja koji se sastoji od još jednog sloja epoksida vezanog fuzijom; sloj može biti poliuretanski, poliesterski ili neki drugi premaz (Sl. 5.8). Ovaj sloj premaza je otporan na trošenje i štiti temeljni sloj FBE od abrazije te također i od fizičkog oštećenja [24].



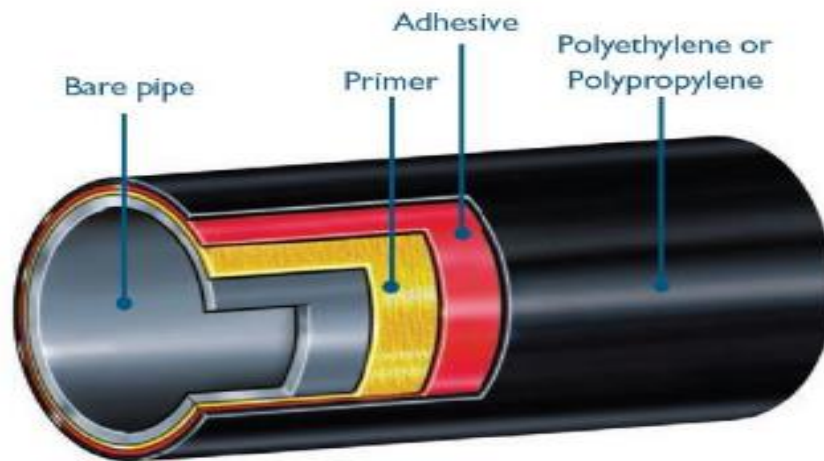
Slika 5.8 Dvoslojni epoksidni premaz spojen fuzijom [24]

### 5.3.4. Troslojna polietilenska/polipropilenska prevlaka

Troslojni polietilen (3LPE) ili troslojni polipropilen (3LPP), je višeslojni premaz sastavljen od tri komponente:

- epoksidni premaz spojen fuzijom (FBE),
- kopolimerno ljepilo,
- vanjski sloj od polietilena/polipropilena .

Prvi sloj je antikoroziivni sloj. Taj sloj formiran je od fuzijom spojene epoksidne smole nakon kojeg slijedi kopolimerno ljepilo. Funkcija kopolimernog ljepila je spajanje epoksidne smole prvog sloja i polietilena/polipropilena trećeg sloja. Treći, vanjski sloj sastoji se od polietilena/polipropilena. Ovaj sloj služi za fizičku zaštitu te pruža čvrstu i dugotrajnu obranu od mehaničkih oštećenja [27].



Slika 5.9 Slojevi troslojne polietilenske/polipropilenske prevlake [28]

Prvi korak nanošenja polietilenske/polipropilenske prevlake je proces nanošenja epoksidnog premaza spojenog fuzijom, stoga su koraci pripreme površine i nanošenja epoksidne smole identični kao u FBE (Sl. 5.9). Razlike slijede nakon nanošenja FBE sloja.

Postupak nanošenja premaza sastoji se od:

- 1) Transporta;

Postavljanje cijevi na ulazni stalak i transporter.

- 2) Indukcijskog predgrijavanja i pjeskarenja;

Ovaj odjel služi za zagrijavanje cijevi za bolju izvedbu pjeskarenja. Slijedi pjeskarenje do potrebne čistoće i hrapavosti. Pjeskarenje služi za uklanjanje prašine, ulja i vlage s površine cijevi.

- 3) Epoksidnog premaza;

Nanosu se epoksid u prahu, po prije opisanima pravilima nanošenja FBE prevlaka, tvoreći prvi sloj prevlake, što je opisano u poglavlju 5.3.2.

- 4) Ljepila i PE premaza;

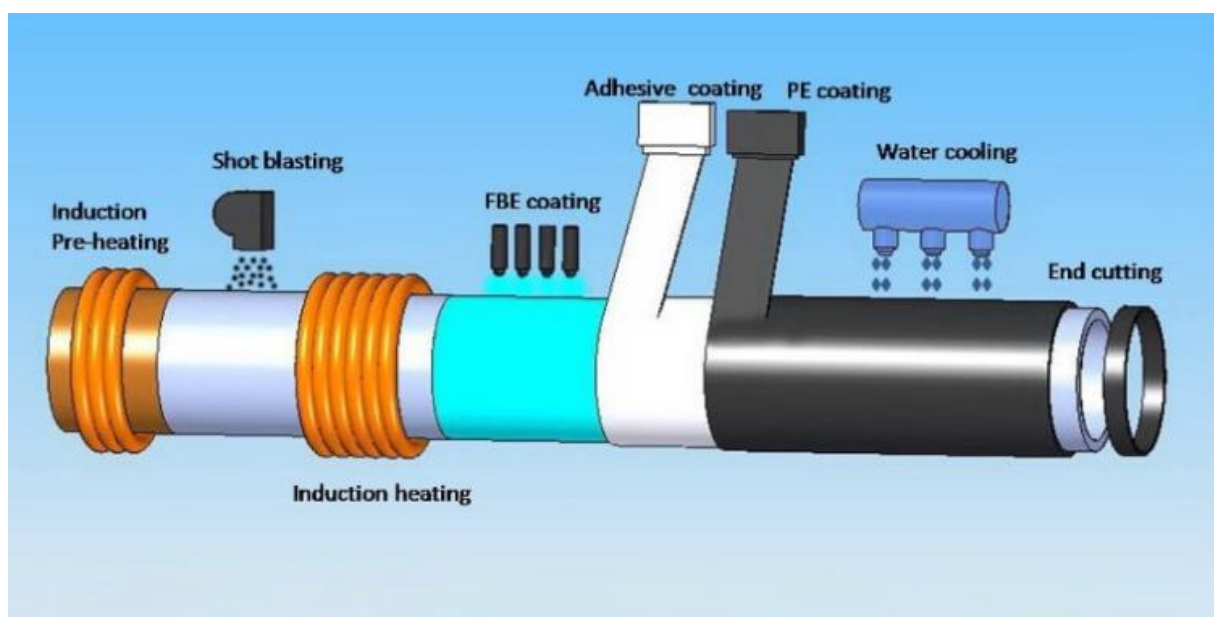
Aplicira se kopolimerno ljepilo putem bočne ekstruzije kako bi se osiguralo potrebno prijanjanje između temeljnog premaza i trećeg sloja sustava. Na kraju se nanosi polietilen ili polipropilen, također putem bočne ekstruzije, čime se dovršava troslojni sustav.

## 5) Vodenog hlađenja;

Nakon premazivanja slojeva ljepila i PE, cijev će ući u prostoriju za hlađenje kako bi se ohladila.

## 6) Ispitivanja;

Nakon hlađenja cijev je spremna za kontrolu. Ova odjel služi za provjeru kvalitete i odvajanje ispravnih od neispravnih cijevi [27]. Shema procesa je prikazan na slici 5.10.



Slika 5.10 Shema procesa proizvodnje troslojne polietilenska/polipropilenska prevlake [27]

Troslojne polietilenske/polipropilenske prevlake primjenjuje se na cjevovode koji rade na temperaturama od  $-20$  do  $+110^{\circ}\text{C}$ . Uobičajena postrojenje za nanošenje 3LPE i 3LPP su opremljena za premazivanje cijevi promjera u rasponu od 2" do 48" i duljine u rasponu od 8 do 18 m. Standardna debljina sloja je minimalno 2,5 mm te uobičajena boja PE je crna, a PP bijela [28].

### 5.3.5. Poli stakleni premaz

Poli-stakleni premaz se proizvodi s posebno razvijenim mikro-ljuskicama od ECR (engl. *Extra Corrosion Resistant*) stakla (SI 5.11). ECR staklene ljuskice su kvalitetnije od standardnih staklenih ljuskica i u kombinaciji s visoko modificiranim sustavima smola osiguravaju vrlo nisku propusnost, mehanički jaku, žilavu i na abraziju otpornu prevlaku s velikom trajnosti premaza.

Poli-stakleni premazi se nanose u dva koraka:

- 1) priprema površine cijevi,
- 2) nanošenje jednog ili dva sloja premaza izravno na čelik. Maksimalno vrijeme između nanošenja sljedećeg premaza je 72 sata [24].

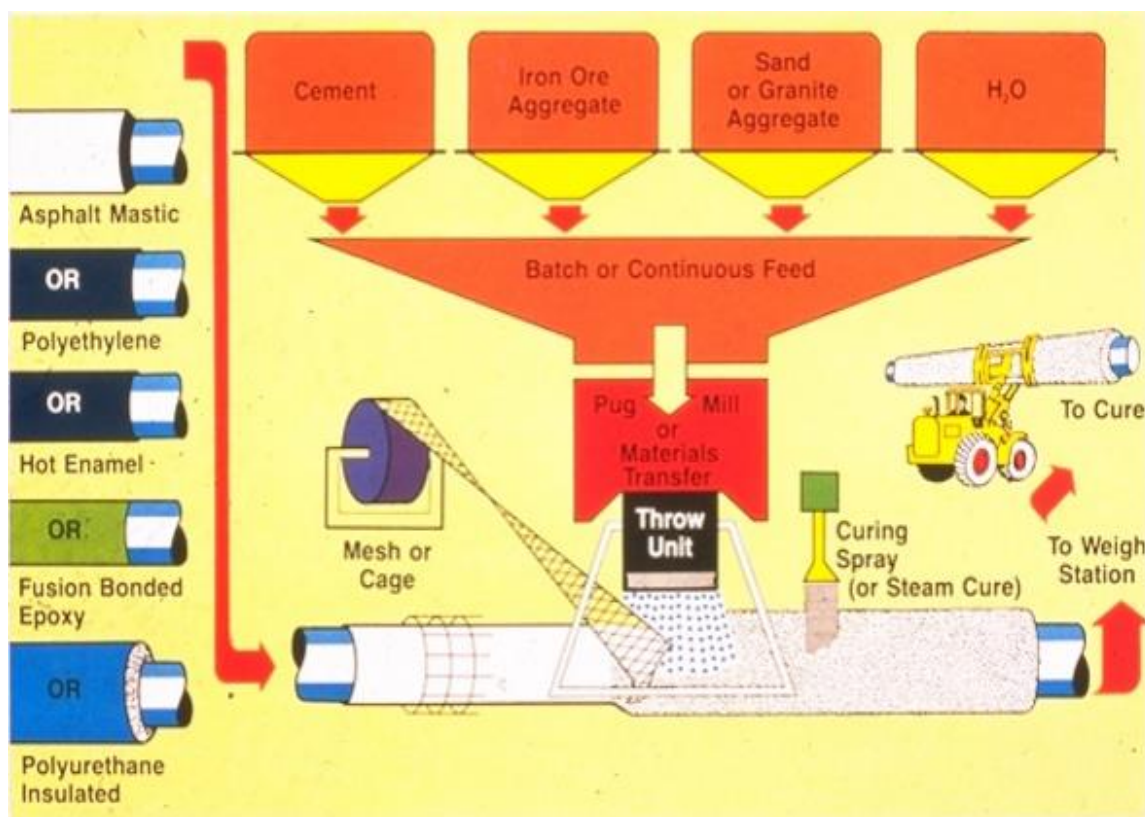


*Slika 5.11 Primjer cijevi obložene poli-staklenim premazom [24]*

U ekstremno korozivnim okruženjima poli-stakleni premaz je vrlo učinkovit. Pruža iznimno čvrstu oblogu dugog vijeka, visoke otpornosti na koroziju i kemikalije s brzim vremenom stvrdnjavanja. Visoka izdržljivost i otpornost na rezanje ovog premaza omogućuje mu da ostane netaknut, čak i kada je oštećen do metalne podloge, uz zanemarivo puzanje ispod filma. Poli-stakleni premaz ne zahtijeva temeljni premaz, iako se temeljni premaz smijenanijeti. Ima mogućnost nanošenja samo jednog sloja, brzo vrijeme otvrdnjavanja i jednostavno nanošenje su najznačajnije odlike ovoga premaza [29].

### 5.3.6. Beton

Primarna uloga betona kao obloge nije zaštita od korozije. Iako ga pasivizirajuće djelovanje na željezo i svojstva samozacjeljivanja čine pogodnim za zaštitu čelika, rijetko se koristi zbog njegovih drugih nedostataka kao što su ispiranje, kalcifikacija i propusnost za kloridne ione. Beton se uglavnom koristi za kontrolu uzgona na podmorskim cjevovodima. Budući da je beton propustan za kloridne ione, a klorid depasivira čelik, FBE ili 3LPE/PP se koristi kao barijera protiv korozije za cjevovode na moru, s betonom postavljenim oko korozivnog sloja. Osim betona, povremeno se polimerbeton (mješavina betona i epoksidnih smola), koristi kao sloj otporan na trošenje u cjevovodima na koje djeluje negativan uzgon te gdje je otpornost na trošenje obvezna [24]. Shema procesa je prikazana na slici 5.12.

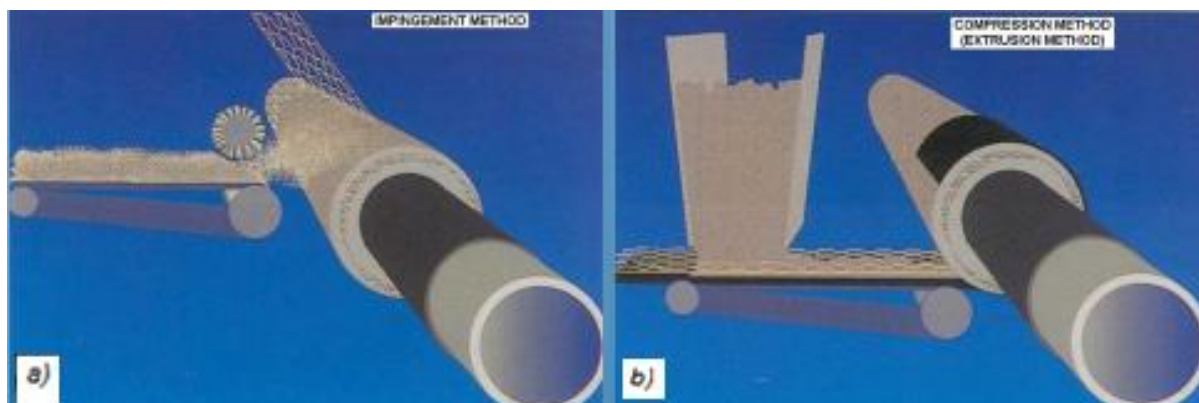


Slika 5.12 Shema procesa proizvodnje betonskih obloga cjevovoda [23]

Trenutno se koriste dvije metode za oblaganje cijevi betonom: špricanjem i kompresijom (Sl. 5.13). Špricanjem se na cijevi presvučene FBA ili 3LPE/PP sa zavarenim kavezom ili žičanom mrežom, betonska mješavina nanosi metodom raspršivanja/udaranja. Koristeći rotirajuće valjke

velike brzine koji usmjeravaju beton na rotirajuću vanjsku površinu cijevi s vrha ili sa strane, nanosi se beton dok prolazi stanicom za nanošenje.

Kompresijom (ekstruzijom), cijevi obložene FBE ili 3LPE/PP, omataju se betonom oko cijevi zajedno s armaturom od žičane mreže. Cijev se transportira spiralno pored pogona za nanošenje premaza tjerajući materijal za oblaganje zajedno sa slojevima žičane mreže na stijenkku cijevi odozdo [30].



Slika 5.13 Metode oblaganja cijevi s betonom: a) špricanje; b) kompresija [30]

Postupak nanošenja betona započinje pripremom materijala. Kako bi se pripremila smjesa za oblaganje, pijesak, cement i voda se miješaju u šaržnim postrojenjima. Šaržna postrojenja uključuju silose za skladištenje cementa, bunkere za prosijavanje i vaganje, trake za transport između bunkera i miješalice i konačno miješalicu za teške uvjete u kojoj se miješaju svi sastojci. Mješavina za premazivanje koja izlazi iz miješalice baca se u spremnik točno ispred glave za nanošenje. Sve betonske obloge zahtijevaju pojačanja. Ta pojačanja mogu biti čelični kavezi ili čelična žičana mreža ili kombinacija oba, ovisno koja se metoda koristi. Količina mrežastih slojeva ovisi o konačnoj debljini betona (do 200 mm) i potrebnom postotku armature poprečnog presjeka. Debljina premaza ovisi o dubini pogonskog cjevovoda. Stvrdnjavanje i dozrijevanje ovih obloga varira u različitim klimatskim uvjetima. Proces stvrdnjavanja svježe nanesenog betonskog premaza zahtijeva specijalizirane ćelije za stvrdnjavanje. U vrućim klimatskim uvjetima cijevi se u većini slučajeva zamotaju u plastičnu foliju i pohranjuju u dvorište radi sušenja. U hladnim klimama, cijevi obložene betonom pohranjuju se u posebno dizajniranim kabinama za stvrdnjavanje u koje se ubrizgavaju para i isparena voda kako bi se ubrzao proces stvrdnjavanja [31].



### 5.3.7. *Viskoelastične obloge*

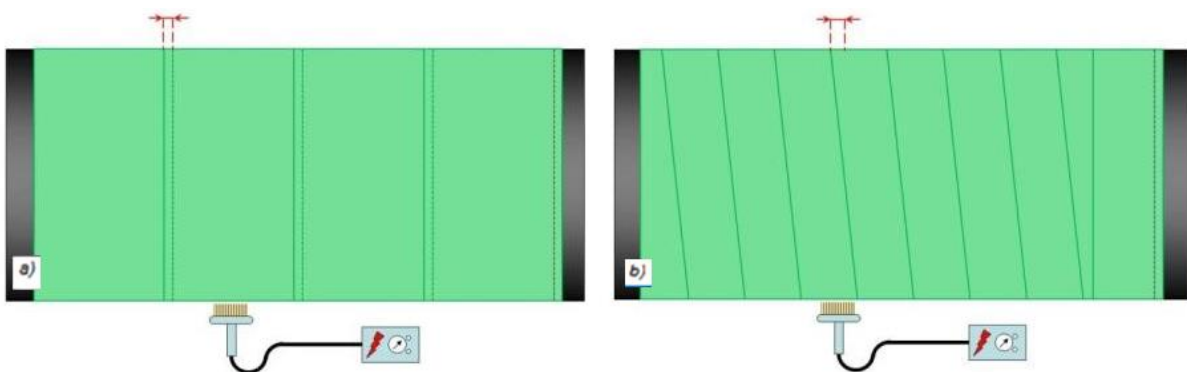
Sirovina za izradu viskoelastičnih obloga je elastični premaz "PIB". To je akronim za polimerizirani izobutilen. Polimerizirani izobutilen prijanja na gotovo sve površine i neosjetljiv je na pripremu površine. Osim toga, vrlo je otporan na vlagu, otporan je na otapala i bakterije te se može nanositi na vrlo niskim temperaturama. Može se koristiti izravno na površini od čelika, PE, PP, FBE itd. i potpuno je kompatibilan s drugim premazima [24].

PIB je amorfni i inertan materijal koji ima vrlo malen utjecaj na okoliš, zbog čega se smatra ekološki prihvatljivim sustavom premaza. PIB također ima izuzetna antikoroziivna svojstva. Glavna karakteristika ovog premaznog materijala je trajno viskoelastično ponašanje. To znači da će ostati u visoko viskoznoj tekućoj fazi čak i nakon godina primjene. Zbog ovog viskoelastičnog svojstva, polimerizirani izobutilen je sposoban samozacjeljivati male nedostatke premaza. Uobičajeno, PIB se koristi kao temeljni sloj koji se postavlja na cijev. Preko PIB sloja koristi se još jedan sloj za zaštitu od mehaničkih oštećenja. Materijal se obično izrađuje kao rola ili traka s unutarnjim mrežastim slojem za potporu i filmom za oslobađanje. Također, postoji i kao kit za profiliranje ili čak kao tekućina za injektiranje. Ovaj sustav premaza sastoji se od 2 sloja: antikoroziivnog unutarnjeg sloja od polimeriziranog izobutilena i mehaničkog vanjskog sloja na bazi PVC-a. PIB materijal za premazivanje koristi se za zaštitu u području zavarivanja i savijanja ili kao metoda popravka oštećenog premaza. PIB se također koristi kada je potrebno premazati manje dijelove cjevovoda, na primjer T- spoj cjevovoda, prikazan na slici 5.14.



Slika 5.14 Nanošenje vanjskog sloja viskoelastičnih obloga na T-spoj cjevovoda [32]

Postoji više tehnika za nanošenje viskoelastičnih premaza. Prvi postupak, koji se obično primjenjuje na malim površinama, je ravno omatanje. Na ovaj način, sekcije premaza jednake duljine se preklopno postavljaju oko cijevi. Drugi postupak, koji se najčešće koristi je spiralno omatanje viskoelastične prevlake, također s preklopom. Oba postupka su prikazana na slici 5.15.



Slika 5.15 Postupci nanošenja viskoelastičnih premaza; a) Ravno; b) Spiralno [32]

Za mnoge primjene premaza na terenu s trakama, prethodna obrada površine neophodna je za dobrog prijanjanje premaza na cijev. Priprema površine korištenjem PIB sustava premaza je manje vitalno. Ovaj sustav premaza zahtijeva pripremu površine koja se može postići čišćenjem ručnim i strojnim alatom ili abrazivnim pjeskarenjem [32].

### 5.3.8. *Prevlake na bazi voska*

Prevlake na bazi voska su vrsta zaštitnog premaza koji koristi vodoodbojna svojstva voska kako bi spriječio vodu s površine čelika. Ove prevlake su konstruirane s kombinacijom voska i drugih tvari kako bi se stvorio zaštitni sloj na površini cijevi. Njihova glavna svrha je sprječavanje kontakta metala s vodom ili agresivnim kemikalijama, čime se smanjuje mogućnost korozije. Prevlake na bazi voska se inače ne koriste za glavne cjevovode, ali imaju visoku upotrebljivost u oblaganju ventila, prirubnica i drugih sličnih oblika, prikazano na slici 5.16. Zbog svoje sposobnosti prilagođavanja kompliciranim površinama, koriste se za oblaganje pomoćnih elemenata. Voštane trake mogu se osušiti i popucati, a kao i sve trake, postoji određena mogućnost oštećenja uslijed naprezanja tla [24].

Postupak nanošenja prevlaka na bazi voska započinje nanošenjem temeljnog premaza za čelik nakon kojeg slijedi mikrokristalna voskom impregnirana nosiva mrežica. Mrežica se tako formira da postoji preklapanje jednog sloja preko drugog od otprilike 20 mm. Za mehaničku zaštitu potreban je vanjski omotač.



*Slika 5.16 Postupak nanošenja prevlake na bazi voska; a) Prirubnica prije nanošenja presvlake; b) Prirubnica poslije nanošenja prevlake; [33]*

Čak i nakon stvrdnjavanja, voštana prevlaka nastavlja biti savitljiva, dopuštajući voštanom sloju da se "savija" zajedno s cijevi dok se kreće zbog podzemnog naprezanja i temperaturnih varijacija. Inertan je i neće promijeniti svojstva ili sastav tijekom vremena, kao što je otpornost na kemikalije i bakterije koje se obično nalaze u tlu [33].

### 5.3.9. Skupljajuće prevlake

Skupljajuće prevlake su antikorozivni zaštitni premaz za cjevovode u obliku cjevastog omotača koji se nanosi na terenu. Primjenom topline, prevlaka se skuplja i poprima oblik podloge koju okružuje (Sl.5.17). Skupljajuće prevlake danas su najčešće korištena tehnologija za zaštitu zavarenog spoja od korozije jer se lako postavljaju i pružaju izvrsnu zaštitu. Pri gradnji čeličnih cjevovoda, pojedini segmenti se sastoje od 10-12 metara dugih čeličnih cijevi na kojima je u tvornici nanesen zaštitni premaz. Kraj cijevi se ostavlja neobložen, tako da se zavarivanjem ne ošteti premaz. Skupljajuće prevlake se zatim nanose na izrez, na zavarenom spoju tijekom izgradnje cjevovoda. Skupljajuće prevlake karakterizira dobro svojstvo izolacije i kemijske otpornosti, žilavost, fleksibilnost i izvrsna mogućnost bojanja. Otporne su na udarce, abraziju i ultraljubičasto svjetlo, kao i na katodno odvajanje i dielektrični slom [34].

Izrada skupljajuće prevlake, tj. termoskupljajućeg omotača, počinje ekstrudiranjem polietilenske ili polipropilenske obloge koja je formulirana tako da se može umrežiti. Također se proizvode od PVC-a, fluoropolimera, neoprena i elastomernih materijala. Nakon ekstrudiranja obloga se podvrgava elektronskom zračenju. Proces zračenja umrežuje polietilen/polipropilen. Poslije umrežavanja, obloga se rasteže uvođenjem u stroj koji ga zagrijava, rasteže i hladi. Budući da je obloga umrežena, nakon istežanja će se htjeti vratiti na svoju izvornu duljinu kada se ponovno zagrije. Skupljajuće prevlake imaju ljepilo koje ih lijepi za cijev i tvornički nanesen glavni premaz. Izbor ljepila za korištenje temelji se na dizajnu cjevovoda i radnim uvjetima. Obloga se zatim reže u pojedinačne sekcije prikladne za primjenu na cjevovodu [35].

Postupak nanošenja skupljajuće prevlake je jednostavan i počinje zagrijavanjem područja oblaganja na 50°C. Zatim slijedi nanošenje temeljnog premaza na prethodno pripremljenu površinu. Najčešći temeljni premaz termoskupljajuće prevlake je dvokomponentni epoksid bez otapala debljine od 0.15 mm do 0.3 mm. Jedna komponenta epoksida je temeljni premaz, a druga je sredstvo za očvršćivanje. Slijedi pozicioniranje prevlake na cijev. Kada je prevlaka pozicionirana, grije se propanskim gorionikom dok se prevlaka ne skupi i zabrtvi cijev. Obloge imaju određeni omjer skupljanja, npr. 2:1 ili 3:1. Ispravno specificirane i primijenjene skupljajuće obloge mogu pružiti zaštitu od korozijskog djelovanja i mehaničku zaštitu koja je jednaka glavnom premazu, bilo da se radi o drugim trakama, epoksidu ili višeslojnom poliolefinu [36].



*Slika 5.17 Nanošenje skupljajućih prevlaka [37]*

### **5.3.10. Mastika**

Mastika je pojam koji se koristi za opisivanje širokog spektra materijala koji se koriste kao zaštitni premazi na površinama metala za sprječavanje korozije. Osim otpornosti na koroziju, ovi materijali pružaju otpornost na trošenje i ogrebotine. Mastika uključuje:

- tanke metalne obloge,
- organske obloge kao što su polimerni materijali i boje,
- optičke folije,
- gravirane ili tiskane površinske obloge [38].

Površinski zaštitni premazi od mastika naširoko se koriste za hidroizolaciju podzemnih metalnih površina. U premazima za nove cjevovode koristi se kao jedan od slojeva u prevlakama koje se temelje na bazi katrana. Također, mogu se koristiti kao jedan od slojeva pri popravljanju oštećenih obloga cjevovoda.

## 6. Ispitivanje prevlaka

Prilikom nanošenja prevlaka na cijevi potrebno je uspostaviti sustav testiranja i osiguranja kvalitete kojim će biti omogućeno nanošenje zaštitnih slojeva unutar specifikacija zahtijevane antikorozivne zaštite cjevovoda. Sve cijevi koje napuštaju pogon za premazivanje moraju imati čvrst vanjski premaz bez praznina ili poroznosti na 100% površine. Cijevi koje pokazuju poroznost ili vrlo mala oštećenja treba popraviti koristeći materijal iste kvalitete. Veća oštećenja treba obnoviti termo-skupljajućom prevlakom. Bez obzira na vrstu popravka, najveći broj popravaka premaza mora biti sljedeći:

- maksimalan jedan po cijevi ako je poroznost do 100,
- osim gore navedenog, moguće je popraviti maksimalno dva kvara po cijevi koji se popravljaju pomoću termo-skupljajuće prevlake.

Minimalni pregledi i ispitivanje koji se trebaju izvršiti u slučaju troslojnog polietilena (3LPE) biti će navedeni u sljedećem tekstu [39].

### 6.1. Vizualni pregled

Odmah nakon premazivanja, svaku cijev je potrebno vizualno pregledati i provjeriti postojanje nesavršenosti i nepravilnosti premaza. Premaz mora biti prirodne boje i sjaja, glatke i ujednačene teksture i mora biti bez mrlja, prašine ili drugih čestica. Također, prevlaka ne smije pokazivati nikakve nedostatke kao što su mjehurići, rupice, ogrebotine, bore, gravure, posjekotine, raslojavanje, uključke zraka, poderotine, šupljine ili bilo koje druge nepravilnosti. Posebnu pozornost treba obratiti na područja uz uzdužni zavar, uz rez na svakom kraju cijevi i unutar tijela cijevi. Osim toga, unutarnju površinu cijevi također treba vizualno pregledati kako bi se izbjegla prisutnost stranih materijala ili čestica i pijeska. Unutarnja površina cijevi se pregledava pomoću oštrog reflektora usmjerenog na sredinu cijevi s jednog kraja, dok se inspekcija vrši vizualno s drugog kraja cijevi [39].

### 6.2. Debljina premaza

Debljina premaza mora se provjeriti obavljanjem najmanje 10 mjerenja na ravnomjernih mjestima raspoređeni po duljini i periferiji svake cijevi. U slučaju zavarenih cijevi, pet takvih očitavanja se provode na vrhu zavarenog šava, ravnomjerno raspoređene po duljini cijevi. Cijevi

koje ne ispunjavaju potrebnu debljinu se doraduju, tj. s cijevi se skida i ponovno ugrađuje potrebni sloj ili slojevi.

### 6.3. Provjera poroznosti

Pore, pukotine ili druga oštećenja koja se ne mogu vizualno otkriti, mogu se pouzdano identificirati s impulsom visokog napona. Pomoću uređaja zvanih detektori poroznosti, omogućeno je ispitivanje poroznosti s minimalnim oštećenjem materijala premaza. Ti uređaji se koriste u ispitivanju:

- izolacije plinovoda,
- izolacije različitih industrijskih cjevovoda,
- izolacije različitih spremnika odnosno kontejnera [40].

Detektor poroznosti mora biti niskopulsni DC elektronički detektor sa zvučnim alarmom i preciznom kontrolom napona. Cijev je neispravna ako postoji više od jedne poroznosti te površine zahvaćene poroznosti veće od 100 cm<sup>2</sup>. Poroznosti koje su manje od navedenih mogu se popraviti [39].

### 6.4. Čvrstoća prijanjanja

U testu čvrstoće prijanjanja potrebno je oguliti najmanje 65 mm prevlake. Prvih 20 mm i zadnjih 20 mm ne računaju u ocjeni čvrstoće veze. U slučaju neprijanjanja ljepila, sustav se mora odvojiti ili u ljepljivom sloju ili u polietilenskom sloju. Odvajanje na granici između epoksida i čelika, epoksida i ljepila ili ljepila i polietilena nije dopušteno. U slučaju da test ne zadovolji potrebne zahtjeve, neophodno je ispitati prethodnu i sljedeću obloženu cijev u seriji. Ako obje cijevi prođu test, tada se ostatak serije cijevi smatra zadovoljavajućim. Ako bilo koja cijev ne zadovolji navedene zahtjeve, sve cijevi obložene tijekom te smjene moraju se ispitati, dok se ne dokaže da je premaz prihvatljiv. Neispravne cijevi moraju se oguliti i ponovno premazati [39].

### 6.5. Otpornost na udarce

Ispitivanje otpornosti na udarce se izvodi s najmanje trideset udaraca raspoređenih na jednako udaljenosti duž obložene cijevi. Neposredno nakon testiranja, ispitno područje mora biti podvrgnuto provjeri poroznosti. Cijev se proglašava neispravnom ako je poroznost zabilježena

u ispitnom području te se cijevi moraju ogoliti i ponovno premazati kao u postupku ispitivanja čvrstoće prijanjanja [39].

## **6.6. Tvrdoća udubljenja**

Tvrdoća udubljenja se mjeri tako da se za različite, unaprijed određene temperature, uzimaju dva uzorka iz odrezanog dijela obložene cijevi i jedan u sredini cijevi. U slučaju neuspješnog ispitivanja te se cijevi moraju ogoliti i ponovno premazati kao u postupku ispitivanja čvrstoće prijanjanja.

## **6.7. Ispitivanje zadržavanja zraka**

Trake iz ispitivanja čvrstoće prijanjanja također se koriste u određivanju poroznost gotovog premaza. Traka se promatra sa strane i na sučelju. Na lokaciji ispitivanja čvrstoće, nožem se reže rub premaza pod kutom od  $45^\circ$  i pregleda mikroskopom. Sva ispitivanja moraju se obaviti pomoću ručnog mikroskopa s povećanjem od 30 puta. Polietilenski i ljepljivi slojevi ne smiju imati više od 10% promatranog područja zauzeto zrakom (poroznost ili mjehurići), te zarobljavanje zraka ne smije zauzimati više od 10% debljine u svakom slučaju. Mjehurići se ne smiju povezivati kako bi otvorili put vlazi do epoksidnog sloja. U slučaju neuspješnog ispitivanja te se cijevi moraju ogoliti i ponovno premazati kao u postupku ispitivanja čvrstoće prijanjanja [39].

## **6.8. Stupanj dozrijevanja**

Pri ispitivanju stupnja dozrijevanja, uzorci epoksidnog filma moraju se čekićem i dlijetom odvojiti od obložene cijevi, a uzorci za ispitivanje se uzimaju pomoću postupka diferencijalne skenirajuće kalorimetrije. Na mjestu odakle će se uzorci epoksida ukloniti za test, treba unaprijed postaviti silikonom obložen sulfidni papir između sloja epoksida i sloja ljepila, kako bi se osiguralo fizičko odvajanje epoksida i ljepila, kao i spriječila kontaminacija epoksida ljepljivim slojem. Kalorimetrija je tehnika koja se primjenjuje za uspostavljanje veze između temperature i određenih fizikalnih svojstava materijala, kao i za određivanje toplinskih svojstava materijala. Temperatura staklenog prijelaza 3LPE i udio dozrijevanja se proporcionalno prate, te isti moraju biti unutar zadanih specifikacija kako bi prošli test stupnja dozrijevanja. U slučaju neuspješnog testa, proizvodnja koja je obavljena tijekom cijele smjene



bit će odbačena, osim ako se predlaži metoda za utvrđivanje sukladnosti sa zahtjevima za stupanj otvrdnjavanja svih cijevi obloženih tijekom te smjene [39].

### **6.9. Test suhog prijanjanja**

Ispitivanje suhog prijanjanja se provodi na odsječenom dijelu cijevi na kojem se utvrđuje stupanj dozrijevanja. U slučaju neuspjelog testa, ponovno testiranje i oblaganje cijevi se izvršava kao kod prethodnog testiranja.

### **6.10. Katodni test odvajanja**

Katodni test odvajanja se izvodi u dva ispitivanja u kojem se prati dali se slojevi polipropilena i ljepila odvajaju u specifičnim uvjetima. Jedno ispitivanje provodi se na 65°C tijekom 48 sati, a drugi test se provedi na 80°C tijekom 48 sati. U slučaju da rezultati katodnog testa nisu u skladu sa zahtjevima, sve cijevi premazane nakon prethodnog prihvatljivog ispitivanja i prije sljedećeg prihvatljivog ispitivanja moraju biti odvojene, ili se ispitivanje ponavlja korištenjem dva dodatna uzorka uzeta s istog kraja zahvaćene cijev. Kada su oba ponovna ispitivanja u skladu sa zahtjevima, serija cijevi se prihvaća. Ako jedno ili oba ponovna ispitivanja ne udovolje navedenom zahtjevu, sve presvučene cijevi slijede prethodni prihvatljivi test i prije sljedećeg prihvatljivog bit će odbačene. Sve odbijene cijevi se moraju ponovno očistiti i premazati [39].

### **6.11. Istezanje pri lomu**

Istezanje pri lomu 3LPE treba iznositi preko 300% [41]. U slučaju da test istezanja pri lomu ne udovolji zahtjevu, potrebno je ispitati dvije prethodne i dvije naredne cijevi. Ako obje cijevi prođu test, onda će se ostatak spojeva cijevi u toj seriji smatrati zadovoljavajućim. Ako bilo koja cijev ne zadovolji zahtjeve, sve cijevi obložene tom serijom PE moraju se ispitati dok se premaz ne pokaže prihvatljivim. Odbačene presvučene cijevi moraju se skinuti i ponovno premazati.

### **6.12. Uranjanje u toplu vodu**

Kako bi se odredio mehanizam gubitka adhezije 3LPE-a, cijevi se ispituju potapanjem u vruću vodu. U slučaju da test ne udovolji zahtjevu, potrebno je ispitati dvije prethodne i dvije naredne cijevi. Ako obje cijevi prođu test, onda ostatak spojeva cijevi toga dana smatrat će se

zadovoljavajućim. Ako bilo koja cijev ne zadovolji navedene zahtjevima, sve cijevi obložene tog dana moraju se ispitati dok se ne dokaže da je premaz prihvatljiv. Odbačene presvučene cijevi moraju se skinuti i ponovno premazati [39].

## 7. Zaštita ukopanih plinovoda od korozije i ispitivanje skladištenih cijevi tvrtke EVN Croatia Plin d.o.o., Split

EVN Croatia Plin d.o.o. je tvrtka kćer austrijske korporacije EVN AG koja posluje u 21 europskoj državi i opskrbljuje preko 14 milijuna korisnika [42]. EVN Grupa je jedan od najvećih proizvođača i transportera električne energije u Europi, te opskrbljuje tržište električnom energijom, zemnim plinom, toplinom, pitkom vodom i pročišćavanjem otpadnih voda, spaljivanju otpada i srodnim uslugama. Nadalje, tvrtka upravlja kabelskom televizijom i telekomunikacijskim mrežama te nudi različite energetske usluge za privatne i poslovne korisnike.

EVN grupa je uključena u sektor prirodnog plina s ukupnom dužinom mreže od 10.100 km širom Europe. Tvrtka EVN Croatia Plin d.o.o. planira izgraditi široku plinsku distribucijsku mrežu u Zadarskoj, Šibensko-kninskoj, Splitsko-dalmatinskoj i Ličko-senjskoj županiji [43]. Navedenom mrežom zemnog plina može se opskrbljivati veliki broj korisnika kao što su javne institucije, male tvrtke, industrijski pogoni i domaćinstva. Spajanje novih korisnika na postojeći plinovod se odvija tako da se nakon interesa korisnika preda zahtjev namjere priključenja na plinovod. Poslije toga, potrebno je napraviti proračun isplativosti i pripremiti projektnu dokumentaciju kojoj slijedi potpisivanje ugovora o priključenju i opskrbi. Tek tada slijedi provođenje i instalacija plinovoda.

Prilikom posjeta EVN Croatia Plinu obavljen je obilazak terena na kojem se postavlja plinovod u Dugopolju te vanjski skladišteni prostor, gdje se čuvaju čelične cijevi obložene 3LPE-pm (Sl 7.1) te polimerne plinske cijevi (Sl.7.2).



*Slika 7.1 Čelične cijevi obložene 3LPE [44]*

Polimerne cijevi za plin proizvedene su iz polietilena visoke gustoće – PEHD, u crnoj boji sa žutim crtama te se primjenjuju u sustavima za prijenos plina na radnim tlakovima do 10 bara. Nadalje, u tekstu su navedeni primjeri ispitivanja cijevi EVN Croatia Plina, u obliku vizualnog pregleda i mjerenja debljine stijenke nad obloženim čeličnim cijevima prije montaže i ukopavanja.



*Slika 7.2 PEHD plinske cijevi [44]*

### **7.1. Vizualni pregled čeličnih cijevi DN 200 obložene 3LPE**

Predizolirane cijevi često stoje dugo na skladištu ili terenu te ih je potrebno ispitati jesu li primjerene za montažu. Nad njima je obavljen vizualni pregled i mjerenje debljine stijenke

Vizualni pregled cijevi vrši se na:

- dostupnim dijelovima cijevi s vanjske strane,
- dostupnim dijelovima cijevi s unutarnje strane,
- izolaciji cijevi.

Vizualnom metodom pregledavaju su sve dostupne površine cijevi radi utvrđivanja površinskih oštećenja kao to su oštećenja izolacije, pojava opće korozije te mehanička oštećenja nastala uslijed udaraca stranih tijela.

Analizom ispitivanja utvrđeno je:

- površinsko oštećenje izolacije nastalo uslijed transporta cijevi (Sl. 7.3).
- površinski tragovi opće korozije unutar cijevi (Sl. 7.4).



*Slika 7.3 Površinsko oštećenje izolacije nastalo uslijed transporta cijevi [44]*



*Slika 7.4 Površinski tragovi opće korozije unutar cijevi [44]*

Na cijevima, većinom u unutarnjem dijelu cijevi uočena su lokalna oštećenja nastala djelovanjem opće korozije. Da bi se spriječilo daljnje djelovanje korozije na mjestima gdje je došlo do korodiranog djelovanja, preporučuje se prije same ugradnje cijevi očistiti nastalu hrđu. Dijelove izolacije na kojima su vidljiva mehanička oštećenja potrebno je sanirati.

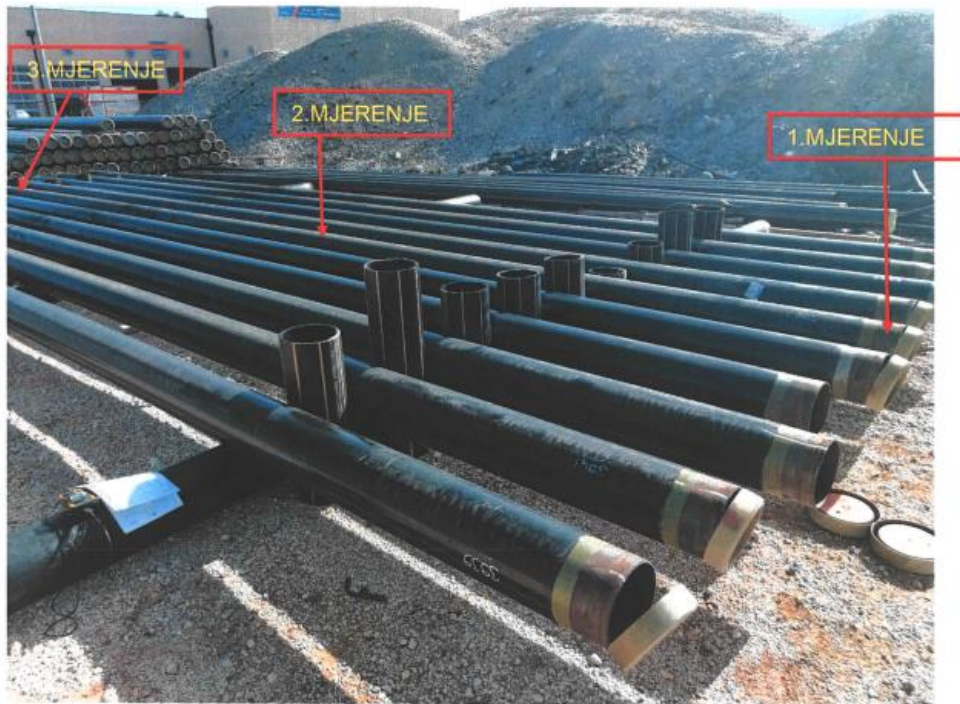
## 7.2. Mjerenje debljine stijenke čeličnih cijevi DN 200 obložene 3LPE

Potrebno je posebno obratiti pozornost na moguća smanjenja debljine stijenke uslijed korozije te stanje izolacijskog materijala na svakoj cijevi. Dno cijevi je iskustveno najugroženija zona. Napredovanjem korozije dolazi do smanjenja presjeka cijevi što će posljedično utjecati na njenu čvrstoću. Napomena je da cijevi moraju izdržati hidrauličnu tlačnu probu od 91 bar do maksimalnih 100 bara jer maksimalni radni tlak iznosi 70 bara. Ispitivanje dostupnih površina cijevi mjerenjem debljine stijenke ultrazvučnom metodom izvršeno je uređajem GE DM5E. Prije početka ispitivanja provedeno je podešavanje i umjeravanje uređaja na atestnim etalonima debljine 20 mm i 30 mm. Na odabranim pozicijama je potrebno očistiti izolacijski sloj do osnovnog materijala za potrebe mjerenja (Sl. 7.5).



*Slika 7.5 Pobrušeni dio izolacije za potrebe mjerenja debljine stijenke [44]*

Mjerenje je obavljeno na 10 cijevi na 3 uzdužne pozicije na svakoj cijevi (Sl. 7.6), tako da je na svakoj od te 3 pozicije uzeto po 4 uzorka. Zadatak ispitivanja je uočiti odstupanja debljine stijenke od početnog presjeka cijevi koji iznosi 5.6 mm. Iz Tablice 7.1 se vidi da ispitane cijevi ne odstupaju od početnog presjeka.



*Slika 7.6 Prikaz tri pozicije na kojima je odrađeno mjerenje debljine stijenke na cijevima [44]*

Dijelove izolacije na kojima su vidljiva mehanička oštećenja potrebno je sanirati, kao i pobrušena mjesta za potrebe mjerenja debljine stijenke. Pobrušena mjesta na izolaciji je potrebno ponovno izolirati u skladu sa zahtjevima i odgovarajućom tehnologijom.

Tablica 7.1: Rezultati mjerenja debljine stjenke

Redni broj: Order No.:	Mjerno mjesto: Measured	Izmjereno (mm): Measured value:	Redni broj: Order No.:	Mjerno mjesto: Measured	Izmjereno (mm): Measured value:	Redni broj: Order No.:	Mjerno mjesto: Measured	Izmjereno (mm): Measured value:
<b>CIJEV 3213</b>			<b>CIJEV 3233</b>			<b>CIJEV 3344</b>		
1. MJERENJE	TOČKA 1	5,62	1. MJERENJE	TOČKA 1	5,62	1. MJERENJE	TOČKA 1	5,60
	TOČKA 2	5,69		TOČKA 2	5,65		TOČKA 2	5,68
	TOČKA 3	5,67		TOČKA 3	5,60		TOČKA 3	5,62
	TOČKA 4	5,68		TOČKA 4	5,64		TOČKA 4	5,67
2. MJERENJE	TOČKA 1	5,60	2. MJERENJE	TOČKA 1	5,59	2. MJERENJE	TOČKA 1	5,60
	TOČKA 2	5,60		TOČKA 2	5,59		TOČKA 2	5,60
	TOČKA 3	5,60		TOČKA 3	5,60		TOČKA 3	5,60
	TOČKA 4	5,60		TOČKA 4	5,60		TOČKA 4	5,60
3. MJERENJE	TOČKA 1	5,63	3. MJERENJE	TOČKA 1	5,59	3. MJERENJE	TOČKA 1	5,61
	TOČKA 2	5,67		TOČKA 2	5,61		TOČKA 2	5,63
	TOČKA 3	5,65		TOČKA 3	5,60		TOČKA 3	5,62
	TOČKA 4	5,69		TOČKA 4	5,64		TOČKA 4	5,69
<b>CIJEV 3364</b>			<b>CIJEV 3365</b>			<b>CIJEV 3372</b>		
1. MJERENJE	TOČKA 1	5,66	1. MJERENJE	TOČKA 1	5,63	1. MJERENJE	TOČKA 1	5,62
	TOČKA 2	5,87		TOČKA 2	5,69		TOČKA 2	5,69
	TOČKA 3	5,70		TOČKA 3	5,60		TOČKA 3	5,60
	TOČKA 4	5,75		TOČKA 4	5,72		TOČKA 4	5,70
2. MJERENJE	TOČKA 1	5,65	2. MJERENJE	TOČKA 1	5,68	2. MJERENJE	TOČKA 1	5,61
	TOČKA 2	5,65		TOČKA 2	5,68		TOČKA 2	5,61
	TOČKA 3	5,65		TOČKA 3	5,68		TOČKA 3	5,61
	TOČKA 4	5,65		TOČKA 4	5,68		TOČKA 4	5,61
3. MJERENJE	TOČKA 1	5,57	3. MJERENJE	TOČKA 1	5,70	3. MJERENJE	TOČKA 1	5,61
	TOČKA 2	5,72		TOČKA 2	5,64		TOČKA 2	5,71
	TOČKA 3	5,67		TOČKA 3	5,72		TOČKA 3	5,56
	TOČKA 4	5,64		TOČKA 4	5,71		TOČKA 4	5,65
<b>CIJEV 3941</b>			<b>CIJEV 3955</b>			<b>CIJEV 3957</b>		
1. MJERENJE	TOČKA 1	5,66	1. MJERENJE	TOČKA 1	5,61	1. MJERENJE	TOČKA 1	5,66
	TOČKA 2	5,71		TOČKA 2	5,63		TOČKA 2	5,59
	TOČKA 3	5,60		TOČKA 3	5,58		TOČKA 3	5,57
	TOČKA 4	5,68		TOČKA 4	5,63		TOČKA 4	5,63
2. MJERENJE	TOČKA 1	5,67	2. MJERENJE	TOČKA 1	5,62	2. MJERENJE	TOČKA 1	5,66
	TOČKA 2	5,67		TOČKA 2	5,62		TOČKA 2	5,66
	TOČKA 3	5,67		TOČKA 3	5,62		TOČKA 3	5,66
	TOČKA 4	5,67		TOČKA 4	5,62		TOČKA 4	5,66
3. MJERENJE	TOČKA 1	5,68	3. MJERENJE	TOČKA 1	5,61	3. MJERENJE	TOČKA 1	5,65
	TOČKA 2	5,69		TOČKA 2	5,63		TOČKA 2	5,59
	TOČKA 3	5,67		TOČKA 3	5,58		TOČKA 3	5,57
	TOČKA 4	5,71		TOČKA 4	5,62		TOČKA 4	5,60
<b>CIJEV 3939</b>								
1. MJERENJE	TOČKA 1	5,66						
	TOČKA 2	5,68						
	TOČKA 3	5,65						
	TOČKA 4	5,62						
2. MJERENJE	TOČKA 1	5,65						
	TOČKA 2	5,65						
	TOČKA 3	5,63						
	TOČKA 4	5,63						
3. MJERENJE	TOČKA 1	5,61						
	TOČKA 2	5,63						
	TOČKA 3	5,62						
	TOČKA 4	5,65						



## 8. Zaključak

Korozija je destruktivan, ali neizbježan proces koji se pojavljuje u svim gospodarskim granama. Korozija je glavni problem industrije cjevovoda jer uzrokuje preko 50% kvarova na cjevovodima u svijetu. Mehanizmi korozije dovode do ekonomske štete, gubitka ljudskih života te katastrofalnih posljedica po okoliš. Različite vrste korozije, poput opće, rupičaste, jamičaste i galvanske korozije, mogu bitno utjecati na svojstva konstrukcija.

U slučaju cjevovoda, korozija uz naprezanje, učestalo potaknuta vodikom, predstavlja veliku prijetnju njegovu integritetu. Vodik je ključan element koji može izazvati smanjenje fizikalnih i mikrostrukturnih svojstava materijala te uzrokovati mnoge probleme, uključujući pukotine, bubrenje i dekoheziju. Najčešći mehanizmi korodiranja uzrokovani vanjskom korozijom su korozija uzrokovana vodikom, korozija uz naprezanje te kombinacija navedenih; korozija izazvana zamorom i mikrobiološki inducirana korozija. Najbolja metoda sprječavanja ili ublažavanja vanjske korozije ukopanih cjevovoda je kombinacija katodne zaštite i premaza. Primjena same katodne zaštite bila bi nepraktična, jer je količina potrebne struje proporcionalna površini metala, stoga su potrebni premazi za smanjenje izložene površine, te su stoga i primarna metoda zaštite.

Postoji više vrsta zaštitnih površinskih premaza. Prevlake od katrana i asfalta su neke od prvih oblika premaza te već postupno zastarijevaju zbog razvoja novih oblika zaštite. Epoksidni premazi vezani fuzijom su najrašireniji oblik zaštite cjevovoda, bilo u jednoslojnom ili dvoslojnom obliku, te presvučeni polietilenskim/polipropilenskim slojem ili betonom. Ovaj oblik prevlaka je popularan zbog mnogih prednosti, kao što su: jednostavnost primjene, manje rasipanja materijala, brze primjene i bržeg proces proizvodnje. FBE prevlake su vrlo učinkovite u zaštiti cjevovoda od vanjske korozije te su otporne na širok raspon kemikalija i okolišnih uvjeta. Također, ne zahtijevaju servisiranje jer jednom naneseni FBE premazi zahtijevaju minimalno održavanje tijekom svog životnog vijeka.

Poli-stakleni premaz također ima odlična svojstva te ga odlikuju mogućnost nanošenja u samo jednom sloju, brzo vrijeme otvrdnjavanja i jednostavno nanošenje. U ekstremno korozivnim okruženjima poli- stakleni premaz je vrlo učinkovit.

Prevlake kao što su trake i viskoelastične obloge, prevlake na bazi voska, skupljajuće prevlake i mastike se koriste za popravke postojećih cjevovoda. Sve cijevi pri ugradnji moraju

imati čvrst vanjski premaz bez praznina ili poroznosti. Oštećene cijevi se smiju popravljati ali ne do u nedogled, postoji određena količina mogućih popravaka.

Na kraju, u kontekstu zaključka ovog rada, treba istaknuti da je razumijevanje procesa korozije i primjena odgovarajućih zaštitnih mjera iznimno važna karika u lancu osiguranja dugotrajnosti i funkcionalnosti različitih vrsta ukopanih cjevovoda.

## Literatura

- [1] Stupnišek–Lisac E.; “*Korozija i zaštita konstrukcijskih materijala*”; udžbenik, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu, 2007.
- [2] Shayam Prasad R.: “*Corrosion of buried pipes due to soil*”; The Department of Civil Engineering, University of Roorkee, Roorkee, 1993.
- [3] THAIR ALI A.; “*Performance of cathodic protection for pipelines*”; Chemical Engineering, College of Engineering of Alnahrain University, Baghdad, 2006.
- [4] Wikipedia, Elektrodni potencijal. Dostupno na: [https://bs.wikipedia.org/wiki/Elektrodni\\_potencijal](https://bs.wikipedia.org/wiki/Elektrodni_potencijal) dana 9. 6. 2023.
- [5] Špadina B.; “*Galvanska korozija*”; Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet u Sisku, Šibenik, 2007.
- [6] Wikipedia, Korozija. Dostupno na: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Korozija> dana 9. 6. 2023.
- [7] Ljumović P.; “*Korozija i površinska zaštita*”; predavanja SVEUČILIŠTE U SPLITU SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE, Split, 2022.
- [8] Ginzl, R.K, Kanters W.A.; “*Pipeline Corrosion and Cracking and the Associated Calibration Considerations for Same Side Sizing Applications*”, EclipseScientific Products Inc., Ontario, Canada, 2002.
- [9] Muhammad W., Djukic M.; “*External corrosion of oil and gas pipelines: A review of failure mechanisms and predictive preventions*”, University of Melbourne, University of Belgrade, 2022.
- [10] Sciencedirect, Soilcorrosion. Dostupno na: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/soil-corrosion> dana 15. 6. 2023.
- [11] Corrosionpedia, Stress Corrosion Assessment and Mitigation in Buried Pipelines. Dostupno na: <https://www.corrosionpedia.com/stress-corrosion-assessment-and-mitigation-in-buried-pipelines/2/7401> dana 16. 6. 2023.
- [12] Researchgate. Dostupno na: [https://www.researchgate.net/figure/Pitting-on-a-steel-pipe-due-to-microbiologically-influenced-corrosion\\_fig1\\_311735007](https://www.researchgate.net/figure/Pitting-on-a-steel-pipe-due-to-microbiologically-influenced-corrosion_fig1_311735007) dana 16. 6. 2023.

- [13] SpringerLink, Under-Deposit Corrosion on Steel Pipeline Surfaces. Dostupno na: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40735-021-00485-9> dana 16.6. 2023.
- [14] Corrosionalliance, Corrosion mechanisms. Dostupno na: <https://www.corrosionalliance.com/corrosion-mechanisms/what-is-hydrogen-induced-corrosion-cracking/> dana 17.6.2023.
- [15] Imetllc, Hydrogen embrittlement steel. Dostupno na: <https://www.imetllc.com/hydrogen-embrittlement-steel/> dana 19.6.2023.
- [16] Wikipedia, Hydrogen embrittlement. Dostupno na: [https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen\\_embrittlement](https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_embrittlement) dana 19.6.2023.
- [17] Frank Cheng Y.; *“Stress Corrosion Cracking of Pipelines”*, University of Calgary, Hoboken, New Jersey, 2013.
- [18] El-Sherik A. M.; *“Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies”* Woodhead Publishing, 2017,
- [19] Testex-ndt, Corrosion Fatigue Cracking Paper. Dostupno na: <https://testex-ndt.com/articles/corrosion-fatigue-cracking-paper/> dana 20.6.2023.
- [20] Strelec V.; *“Plinarski priručnik, 3.izdanje”*, Zagreb, 1982.
- [21] Saheb M. M.; *“Petroleum Underground Pipelines Protective Coating”*, Materials Engineering Department Al-mustansiriya University, Baghdad, Iraq, 2016.
- [22] Baker Jr. M.; *“Pipeline Corrosion”*, U.S. Department of Transportation Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, 2012
- [23] Didas J.; *“Pipeline Coatings”*, Matcor, Mechanicsville, 2012.
- [24] Thepiping talk, Types of coating & wrapping for underground pipes. Dostupno na: <https://thepipingtalk.com/types-of-coating-wrapping-for-underground-pipes/> dana 30.6.2023.
- [25] Rahabitumen, Bitumen enamel. Dostupno na: <https://rahabitumen.com/bitumen-enamel/> dana 5.7.2023.
- [26] PCI, Significance of Coal Tar Tape in Underground Pipelines. Dostupno na: <https://www.pcimag.com/articles/107978-significance-of-coal-tar-tape-in-underground-pipelines> dana 5.7.2023.

[27] Useon, 3LPE External Coating Line. Dostupno na: <https://www.useon.com/3lpe-external-coating-line/> dana 5.7.2023.

[28] Wanlei, 3LPE External Coating Steel Pipe For Oil And Gas Pipeline. Dostupno na: <https://www.seamlesscarbonsteelpipess.com/corrosion-resistant-steel-pipe/steel-pipe-coating-3lpe-and-fbe/3lpe-external-coating-steel-pipe-for-oil-and-g.html> dana 5.7.2023.

[29] Indiamart, Polyglass. Dostupno na: <https://www.indiamart.com/proddetail/polyglass-15185221530.html> dana 15.7.2023.

[30] ABRACO, Concrete coating for negative buoyancy. Dostupno na: <https://abraco.org.br/abraco-cursos/revestimento-em-dutos/docs/giovanni-portesan-concrete-coating-for-negative-buoyancy.pdf> dana 15.7.2023.

[31] Bauhuis, Concrete weight pipe coating. Dostupno na: <https://bauhuis.com/pipe-coating-solutions/concrete-weight-pipe-coating/> dana 15.7.2023.

[32] Corrosionalliance, What is a visco-elastic coating?. Dostupno na: <https://www.corrosionalliance.com/coat/what-is-a-visco-elastic-coating/> dana 15.7.2023.

[33] Spec-net, Anti Corrosion Pipe WrappingTape. Dostupno na: [https://www.spec-net.com.au/press/1219/bel\\_041219/Trenton-Wax-Tape-](https://www.spec-net.com.au/press/1219/bel_041219/Trenton-Wax-Tape-) dana 16.7.2023.

[34] Dostupno na: <https://www.corrosionpedia.com/definition/1233/heat-shrink-sleeve> dana 18.7.2023.

[35] Wikipedia, Heat shrinkable sleeve. Dostupno na: [https://en.wikipedia.org/wiki/Heat-shrinkable\\_sleeve](https://en.wikipedia.org/wiki/Heat-shrinkable_sleeve) dana 19.7.2023.

[36] RELI SLEEVE, Heatshrinkingsleeve. Dostupno na: <http://halfrepairsleeve.com/wp-content/uploads/2020/02/Heat-Shrink-Sleeve-Final.pdf> dana 19.7.2023.

[37] Denso, Premier shrink sleeves. Dostupno na: <https://www.denso.net/products/premier-shrink-sleeves-2/> dana 19.7.2023.

[38] Corrosionpedia, Mastic. Dostupno na: <https://www.corrosionpedia.com/definition/2235/mastic> dana 19.7.2023.

[39] STANDARD SPECIFICATION FOR 3 LAYER POLYETHYLENE COATING OF LINEPIPES, Bharat Petroleum Corporation Limited.

[40] Idef.hr, Ispitivanje izolacije. Dostupno na: <https://idef.hr/ispitivanje-izolacije-iso> dana 18.10.2023

[41] Reliable pipes & tube slt, 3lpp pipe coatings. Dostupno na: <https://www.reliablepipestubesltd.com/3lpp-pipe-coatings.html> dana 25.10.2023.

[42] Wikipedia, EVN Group. Dostupno na: [https://en.wikipedia.org/wiki/EVN\\_Group](https://en.wikipedia.org/wiki/EVN_Group) dana 25.11.2023.

[43] EVN.hr. Dostupno na: <https://www.evn.hr/> dana 25.11.2023.

[44] Materijal dobiven od strane EVN Croatia Plina.