

# ISPITIVANJE UTJECAJA RADIONIČKOG TEMELJNOG PREMAZA NA SVOJSTVA ZAVARENOG SPOJA

---

**Kopčić, Mijo**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Slavonski Brod / Sveučilište u Slavonskom Brodu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:262:128885>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-05**



*Repository / Repozitorij:*

[repository.unisb.hr](https://repository.unisb.hr) - The digital repository is a digital collection of works by the University of Slavonski Brod.



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

**SVEUČILIŠTE U SLAVONSKOM BRODU**  
**STROJARSKI FAKULTET U SLAVONSKOM BRODU**

**DIPLOMSKI RAD**  
**sveučilišnog diplomskog studija**

**Mijo Kopčić**  
0152133069

Mentor diplomskog rada:  
**prof.dr.sc. Ivan Samardžić**

Slavonski Brod, 2021.

**SVEUČILIŠTE U SLAVONSKOM BRODU**  
**STROJARSKI FAKULTET U SLAVONSKOM BRODU**

**DIPLOMSKI RAD**  
**sveučilišnog diplomskog studija**

**Mijo Kopčić**  
0152133069

Mentor diplomskog rada:  
**prof.dr.sc. Ivan Samardžić**

Slavonski Brod, 2021.

## DIPLOMSKI ZADATAK br. 2020-2021

Pristupnik: Mijo Kopčić (0152133069)  
Studij: Diplomski studij: Strojstvo  
Smjer: Strojarske tehnologije

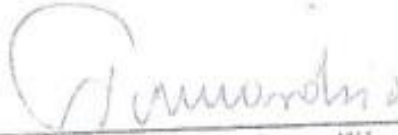
Zadatak: ISPITIVANJE UTJECAJA RADIONIČKOG TEMELJNOG PREMAZA NA  
SVOJSTVA ZAVARENOG SPOJA

### Opis zadatka:

1. UVOD. OPĆENITO O ZAŠTITI MATERIJALA PREMAZIMA.
2. IZRADA UZORAKA (NANOŠENJE PREMAZA, ZAVARIVANJE (PQR, WPS))
3. ISPITIVANJE UTJECAJA RADIONIČKOG TEMELJNOG PREMAZA (VIZUALNA KONTROLA, RADIOGRAFSKA KONTROLA, PENETRANTI, MAKRO UZORAK, MIKRO STRUKTURA, UDARNJA RADNJA LOMA, SAVIJANJE)
4. ANALIZA REZULTATA
5. ZAKLJUČAK

Zadatak uručen pristupniku: 18. siječnja 2021.  
Rok za predaju rada: 18. srpnja 2021.

Mentor:

  
\_\_\_\_\_  
prof. dr. sc. Ivan Semardžić

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:

  
\_\_\_\_\_

## I. AUTOR

Ime i prezime: MIJO KOPČIĆ

Mjesto i datum rođenja: Derventa(BiH), 18.04.1983.

Adresa: Zbjeg 51, 35254 Bebrina

**STROJARSKI FAKULTET U SLAVONSKOM BRODU**

## II. DIPLOMSKI RAD

Naslov: Ispitivanje utjecaja radioničkog temeljnog premaza na svojstva zavarenog spoja

Naslov na engleskom jeziku: Investigation of the influence of workshop primer on the properties of a welded joint

Ključne riječi:

Ključne riječi na engleskom jeziku:

Broj stranica: 51 slika: 43 tablica: 22 priloga: 0 bibliografskih izvora: 30

Ustanova i mjesto gdje je rad izrađen:

**STROJARSKI FAKULTET U SLAVONSKOM BRODU**

Stečen akademski naziv: Magistar/magistra inženjer/ka strojarstva

Mentor rada: prof.dr.sc. Ivan Samardžić

Obranjeno na Strojarskom fakultetu u Slavonskom Brodu

dana: 27. 08. 2021.

Oznaka i redni broj rada: SFSB-DSS-51/2021.

## IZJAVA

Izjavljujem kako sam diplomski rad izradio samostalno, koristeći vlastito prikupljeno znanje i iskustvo iz svakodnevnog rada i dostupnu literaturu.

U radu mi je pomogao savjetima i smjernicama voditelj diplomskog rada prof.dr.sc. Ivan Samardžić, te mu najiskrenije zahvaljujem.

Zahvaljujem se radnim kolegama iz poduzeća Đuro Đaković Centar za istraživanje i razvoj d.o.o na pomoći.

Isto tako zahvaljujem asistentu dr.sc. Dejanu Mariću na suradnji i pomoći.

Također se zahvaljujem svojoj obitelji na strpljenju i potpori u tijeku studiranja.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'M. J. Samardžić', is located in the lower right quadrant of the page.

## SAŽETAK

U radu je opisan postupak pripreme površine, nanošenja privremene zaštite u vidu epoksi temeljnog premaza te ispitivanja utjecaja navedene zaštite konstrukcijskog materijala na njegova mehanička svojstva. Poznato je da željezni konstrukcijski materijali, prije nego se ugrade u određenu konstrukciju, sklop itd., velik dio vremena provedu na nepovoljnim atmosferskim uvjetima. Takvi uvjeti mogu izazvati korozijsko uništavanje materijala, a kako bi se to izbjeglo materijal se privremeno štiti nanošenjem sloja zaštitnog premaza. Zaštitni premaz omogućuje zavarivanje preko navedenog sloja bez njegovog prethodnog uklanjanja ne narušavajući na taj način kvalitetu mehaničkih svojstava zavara. Radiografska kontrola zavara te ispitivanje strukturnih svojstava, pokus savijanjem i ispitivanje udarne radnje loma su dokazali kako nakon zavarivanja tako šticekih konstrukcijskih materijala nema negativnog utjecaja zaštitnog premaza na kvalitetu zavarenog spoja.

## **ABSTRACT**

The paper describes the process of surface preparation, application of temporary protection in the form of epoxy primer and testing of the effect of that protection structural material on its mechanical properties. It is known that iron construction materials, before being installed in a particular construction, assembly, etc., spend much time in unfavorable atmospheric conditions. Such conditions can cause corrosion destruction of the material, in order to avoid material is temporarily protected by applying a layer of protective coating. The protective coating allows for welding over said layer without its prior removal without disturbing thus the quality of the mechanical properties of the weld. Radiographic inspection of welds and testing structural properties, bending test and examination fracture tendency proved that after welding so protected construction materials has no negative impact on the quality of the protective coating of welded joints.



## PREGLED VELIČINA, OZNAKA I JEDINICA

<i>Mo</i>	- sadržaj molibdena, %
<i>C</i>	- sadržaj ugljika, %
<i>Mn</i>	- sadržaj mangana, %
<i>P</i>	- sadržaj fosfora, %
<i>S</i>	- sadržaj sumpora, %
<i>Cr</i>	- sadržaj kroma, %
<i>Cu</i>	- sadržaj bakra, %
<i>N</i>	- sadržaj dušika, %
<i>DM</i>	- dodatni materijal
<i>EN</i>	- euro norma
<i>OM</i>	- osnovni materijal
<i>p</i>	- tlak; Bar
<i>R<sub>m</sub></i>	- vlačna čvrstoća, MPa
<i>ReH</i>	- gornja granica razvlačenja, MPa
<i>R<sub>p0,2</sub></i>	- granica razvlačenja na određenoj temperaturi, MPa
<i>T</i>	- temperatura, °C
<i>t</i>	- debljina lima, mm
<i>ZUT</i>	- zona utjecaja topline
<i>KU, KV</i>	- udarna radnja loma, J

## SADRŽAJ

1 UVOD .....	2
2 VRSTE KOROZIJE PREMA MEHANIZMU PROCESA .....	3
2.1 Kemijska korozija .....	3
2.2 Elektrokemijska korozija.....	6
2.2.1 Vodikova redukcija .....	7
2.2.2 Intenzitet i tok procesa elektrokemijske korozije.....	9
2.2.3 E-pH (Pourbaixovi dijagrami).....	9
2.2.4 Tipovi korozije prema geometriji korozivnog razaranja.....	10
2.2.5 Opća korozija .....	11
2.2.6 Galvanska korozija.....	12
2.2.7 Korozija u procijepu.....	14
2.2.8. Rupičasta korozija .....	15
2.2.9. Interkristalna korozija.....	16
2.3 Selektivna korozija .....	17
2.3.1 Erozijska korozija.....	18
2.3.2 Napetosna korozija.....	19
3 SPECIJALNE BOJE .....	21
3.1 Radionički temeljni premazi – shopprimeri .....	21
3.1.1 Vrste shopprimera .....	22
3.1.2 Antivegetativni premazi .....	23
3.1.3 Povijesni prikaz .....	25
3.1.4 Protuklizne boje.....	26
3.1.5 Protupožarne boje.....	26
3.1.6 Princip djelovanja protupožarnih ekspandirajućih boja .....	27
4 EKSPERIMENTALNI DIO.....	29
4.1 Tehnički podaci o materijalu.....	29
4.2 Priprema uzoraka.....	30
4.3 Nanošenje zaštitnog temeljnog premaza (shopprimera) .....	31
4.3.1 Kontrola debljine suhog filma premaza .....	32
4.4 Zavarivanje uzoraka .....	33
4.5 Vizualna kontrola zavarenih spojeva .....	33
4.6 Penetrantska kontrola zavarenih spojeva .....	34
4.7 Radiografska kontrola zavarenih spojeva .....	36
4.8 Mehanička ispitivanja gdje je zaštitni temeljni premaz utjecao na kvalitetu zavara.....	37
4.8.1 Ispitivanje strukturnih svojstava(makrografije) .....	37
4.8.2 Pokus savijanjem.....	38

4.8.3 Ispitivanje udarne radnje loma .....	40
4.9 Temeljni radionički premaz 2 .....	41
4.10 Tehnički podaci o materijalu .....	41
4.11 Zavarivanje uzoraka .....	42
4.12 Mehanička ispitivanja gdje zaštitni premaz nije utjecao na zavar .....	42
4.13 Označavanje ispitnih uzoraka .....	43
4.14 Ispitni uzorci za pokus savijanjem .....	43
4.15 Ispitivanje strukturnih svojstava (makrografija) .....	43
4.16 Pokus savijanjem .....	45
4.17 Ispitivanje udarne radnje loma .....	45
4.18 Analiza rezultata ispitivanja .....	46
4.19 Radiografska kontrola zavarenih sklopova .....	47
5 ZAKLJUČAK .....	49
6 LITERATURA .....	50

## 1 UVOD

Velik broj željeznih materijala se spaja i uklapa u konstrukciju postupkom zavarivanja. Zbog velike zastupljenosti zavarivanja, razvijen je i velik broj postupaka kako bi se što kvalitetnije ispunili zahtjevi potreba u proizvodnom procesu. Tako je za spajanje dvaju istorodnih ili raznorodnih materijala, sa dodatnim, ili bez dodatnog materijala, razvijen velik broj postupaka zasnovanih na spajanju materijala toplinom ili pritiskom [1].

Upravo kako bi zavareni spoj bio bez grešaka i kako bi bila ostvarena zahtijevana mehanička svojstva, osim o pravilnom izboru postupka i parametara zavarivanja, nužno je voditi računa o kvaliteti površine koja se zavaruje. Željezni materijali, prije nego se podvrgnu spajanju tehnikom zavarivanja, dosta vremena su izloženi nepovoljnim atmosferskim uvjetima pa postoji velika opasnost od nastajanja korozije. Opasnost se očituje u nepoželjnom trošenju konstrukcijskih materijala djelovanjem okoline. Korozija se najbolje može opisati kao djelovanje dvaju reaktanata, odnosno samo jedne komponente konstrukcijskog materijala i samo jedne komponente okoline uz težnju da međusobno spontano reagiraju [2]. Budući da štetne pojave i procesi u velikoj većini slučajeva započinju na površinskom sloju materijala bitno je nešto poduzeti kako bi se upravo taj sloj primjereno zaštitio [3].

Pojava korozije narušava kvalitetu površine koja se zavaruje pa ju je prije zavarivanja potrebno dovesti u željeno stanje. Takva ponovna priprema površine zahtjeva dodatne financijske troškove, a postoje i slučajevi gdje korozija ostavi previše traga pa se u pitanje dovodi i daljnja funkcionalnost konstrukcijskog materijala. Kako bi se izbjegli troškovi i ponovna priprema površine te materijal zaštitio od negativnog utjecaja okoline, koriste se temeljni premazi za privremenu zaštitu, poznatih kao shopprimeri. Prema općenitoj definiciji premazom se smatra sloj, ili više povezanih slojeva, koji na šticevoj površini čine zaštitni film, tj. suhi film premaza [4]. Radionički temeljni premazi (shopprimeri) spadaju u skupinu premaznih sredstava sa brzosušećim karakteristikama sa primjenom u privremenoj zaštiti čeličnih profila i limova za vrijeme izgradnje konstrukcije [5]. Takav zaštitni premaz štiti materijal, a osim toga prije nego se materijal zavaruje isti nije potrebno uklanjati sa površine predviđene za zavarivanje. Da bi to bilo osigurano, premazi moraju zadovoljiti određene zahtjeve kao što su kratko vrijeme sušenja, postojanost na visokim temperaturama, otpornost na atmosferilije, podudarnost sa završnim sustavima premaza, no ono što je ovdje najvažnije ne smiju oslobađati otrovne plinove tijekom zavarivanja, utjecati na brzinu zavarivanja kao niti na mehanička svojstva zavara [6, 7]. U svrhu dokazivanja tih teza provedena su mehanička ispitivanja kako bi se utvrdilo ima li negativnog utjecaja pri njegovom miješanju sa talinom pri

postupku zavarivanja te u konačnici smanjenih mehaničkih svojstava u području zavarenog spoja. Hoće li zaštitni temeljni premaz imati negativan utjecaj na kvalitetu zavarenog spoja uvelike ovisi o kemijskom sastavu istoga te reakcijama koje će nastati prilikom njegova izgaranja i miješanja sa plinom za zavarivanje.

## **2 VRSTE KOROZIJE PREMA MEHANIZMU PROCESA**

Pojavnosti korozije nekog metala mogu se klasificirati prema mehanizmu nastanka, mediju u kojemu se metal nalazi, geometriji korozijskog razaranja i vrsti postrojenja. Osnovna podjela je prema mehanizmu nastanka i mediju u kojemu se metal nalazi, i to na elektrokemijsku i kemijsku koroziju. [8]

### **2.1 Kemijska korozija**

Legure i metali prilikom postupaka obrade i prerade, odnosno tijekom eksploatacije na povišenim temperaturama reagiraju sa zrakom ili plinovima koji također sadrže kisik ili kisikove spojeve. U ovakvim uvjetima na njihovoj površini uobičajeno dolazi do nastanka termičkih oksida. Razlika u bojama na površini odraz je razlike u debljinama i sastava oksidiranog filma. Sredine u kojima se razvija kemijska korozija dijele se prema svojoj aktivnosti na reducirajuće i oksidirajuće. Sredina u kojoj se nalazi molekularni kisik ( $O_2$ ) naziva se oksidirajuća atmosfera. Nastanak termičkog oksidnog sloja koji se nalazi na površini metala rezultat je reakcije na međupovršini plin(oksid) i oksid-metal. Slojevi koji su nastali na površini metala i legura pri povišenim temperaturama su u većini slučajeva oksidi, no mogu biti i karbidi, sulfidi te mješavine svih tih vrsta. Kemijska korozija prikazana je na slici 2.1.[8]

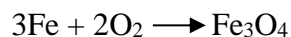


*Slika 2.1 Kemijska korozija [8]*

Kemijska korozija na metalima se događau medijima koji ne spadaju u vodiče električne struje tj. u neelektrolitima, usljed čega nastanu spojevi metalno-nemetalni spojevi (sulfidi i oksidi). Kemijsku koroziju sačinjava reagiranje metalnog atoma iz kristalne rešetke s molekularnim spojevima nekog elementa (spoja) iz okoline prilikom čega nastanu molekule spoja, te takav spoj sačinjava produkt korozije. Vreli plinovi i tekućine organskog porijekla su najbitniji neelektroliti koji u praksi uzrokuju kemijsku koroziju.

Priilikom obrade metala pri povišenim temperaturama (kaljenje, kovanje, zavarivanje itd) nastaje kemijska korozija u vrućim plinovima, u kotlovskim postrojenjima, kod ispušnih cijevi motora, itd. [8]

Prilikom toplog valjanja čelika na zraku javlja se kemijska korozija (oksidacija). Pri temperaturama višim od 600 °C oksidacija je intenzivnija, pri čemu se stvara okujina (željezni oksid).



Kemijsku koroziju mogu izazvati organske tekućine ukoliko su bezvodne, inače dođe do nastanka elektrokemijske korozije. Najbitnije su tekućine koje ne sadrže vodu kao što su naftni derivati (maziva i goriva u tekućem stanju) te otapala na osnovi ugljikovodika koja služe za razrjeđivanje i odmašćivanje (npr. kod boja).

Kemijski afinitet je podložnost dva ili više kemijskih elemenata kako bi međusobno kemijski reagirali. Kemijska pokretačka sila (kemijski afinitet) mijenja se u ovisnosti o vrsti

tvari, koncentraciji tvari koje između sebe reagiraju, agresivnosti tvari iz okoliša i temperaturi, te je stoga pokretačka sila kemijske korozije varijabilna veličina.

Reakcije pri kojima se oslobodi energija imaju pokretačku silu, tj. one reakcije koje su se dogodile spontano. Metal prirodno teži sjediniti se s drugim tvarima te oslobađanjem energije povratiti se u energetski niže stanje. Takvo umanjeње slobodne energije je sila koja pokreće korozijske reakcije. Najveća energija koju treba uložiti prilikom reverzibilnog kemijskog procesa može se uzeti kao mjera za afinitet.

Intenzitet i tok kemijske korozije ovisni su o:

- strukturi i sastavu metala koji korodira
- fizikalnim uvjetima kao što su temperatura, hrapavost, naprezanje površine, brzina gibanja okoline,
- količini i sastavu agresivne okoline u kojoj je metal okružen
- produktima korozije (fizikalna i kemijska svojstva korozijskih produkata).

U odnosu na hrapave glatke površine metala slabije korodiraju, dok je kod hrapavih stvarna veličina mnogostruko veća u odnosu na geometrijsku uveličinu, te je korozija ubrzana na takvoj površini. Površinska nečistoća na metalu kao što je npr. čađa, između ostalog onemogućuje nastajanje kvalitetnijeg zaštitnog sloja. [8]

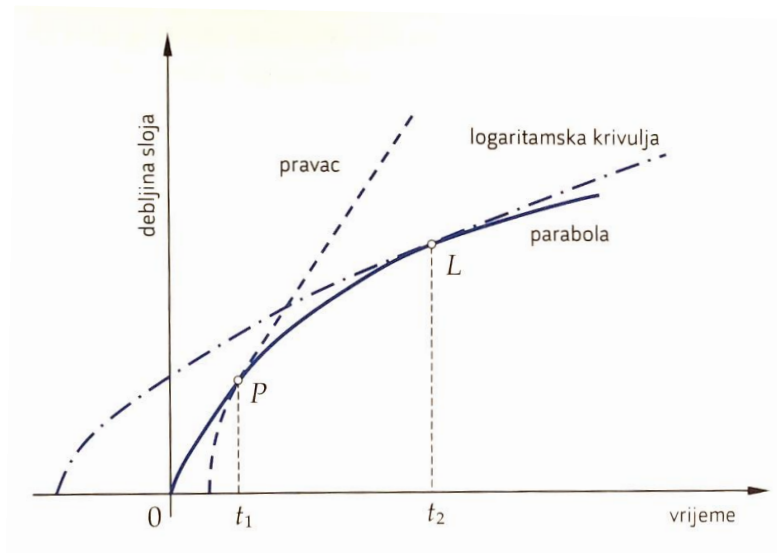
Znatnom smanjuju brzine korozije u oksidacijskoj sredini doprinose legirne komponente, koje vrlo jednostavno oksidiraju. Ubrzavanju kemijske korozije u početnoj fazi doprinose unutarnje deformacije u metalu. Snižavanjem temperature i smanjenjem brzine djelovanja korozije se snižuje i energetski nivo molekula i atoma te takvi atomi i molekule međusobnim reagiranjem stvaraju korozijske produkte na površinama metala. Pri visokim povišenim temperaturama kao što je npr. proces kaljenja postižu se značajne brzine kemijske korozije metala.

Smanjenju korozije doprinosi zaštitni sloj uz sljedeće uvjete:

- korozijski produkti moraju biti homogeni i fizikalno-kemijski stabilni u određenim uvjetima
- obujam korozivnih produkata mora biti jednak ili veći od obujma metala koji je u procesu korodiranja, tj. zaštitni sloj treba u potpunosti prekriti površinu metala.

Na dijelovima površine metala na kojima agens ima dodir s metalom nastaje sloj. Porast debljine sloja umanjuje proces korozije te se ona razvija sporije zbog težeg prodora agensa kroz navedeni sloj. Za čelike i odljevke na osnovi željeza takav sloj vrlo lako puca pri minimalnim deformacijama, što vodi kao veoma opasnom lokalnom raspadu metala.

Znanstveno je dokazano da se jačina odvijanja korozivnog procesa (porast sloja oksida), učestalo odvija prema logaritamskoj krivulji, a rijetko linerano ili prema paraboličnoj krivulji kao što je prikazano na slici 2.2. Proces razvoja korozije će se pojačati s povišenjem temperature, neovisno po kojoj se krivulji se odvija.



Slika 2.2 Rast oksidnog sloja u funkciji vremena [8]

## 2.2 Elektrokemijska korozija

Nastanak elektrokemijske korozije događa se kod metala u električki provodljivim sredinama (u elektrolitima) kao npr vodene otopine kiselina, prirodna voda, soli, lužina, mokro tlo te vlažna atmosfera (čelici legirani ugljikom korodiraju pri relativnoj vlazi većoj od 60 % (RV > 60 %)). Uzrok elektrokemijske korozije isto je afinitet koji se manifestira kao razlika potencijala (električni napon). Električni napon je razlika potencijala između dva metala, između dvije lokacije na površini metala ili razlika potencijala među elektrolitom i metalom.

Dva elektrokemijska parcijalna procesa daju sumarni redoks proces u kojemu nema sudjelovanja električnih naboja (redukcijom se vezuju elektroni oslobođeni prilikom oksidacije). Količina elektrona koji se troše prilikom katodne reakcije treba biti jednaka količini elektrona koji se oslobađaju prilikom anodne reakcije, tj. katodna struja treba biti izjednačena s anodnom strujom. Kako bi anodna reakcija stvorila koroziju, reakcije se trebaju zbivati istodobno. U suprotnom reakcije postaju povratne (reverzibilne) i dolazi do uspostave ravnoteže. U tijeku elektrokemijskog korodiranja na površinama metala dolazi do uspostave korozijskog potencijala, prilikom čega se brzina katodnog procesa izjednačava s brzinom

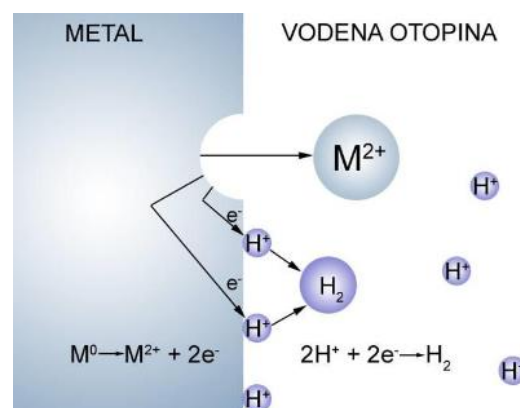


anodnog procesa. Anodni proces naziva se ionizacija metala ili otapanje te se na taj način stvaraju elektroni.

Katodni proces (trošenje elektrona) dijeli se na vodikovu i kisikovu redukciju.

### 2.2.1 Vodikova redukcija

Katodni postupak prilikom korodiranja metala u dodiru s kiselim rastvorima bez jačeg oksidirajućeg djelovanja naziva se vodikova redukcija. Pristižući elektroni na lokalnoj katodi privlače suprotno naelektrizirane ione vodika, na taj način stvaraju atome vodika koji dalje tvore molekule vodika, te iz takve otopine izlaze kao mjehurići. U neutralnoj (slabo kiseloj) sredini ne nastupa trajna vodikova redukcija jer je količina iona vodika preniska. Slika 2.3 prikazuje korozijski članak u sredini s kiselom otopinom.



Slika 2.3 Shematski osvrt elektrokemijske korozije u sredini s kiselom otopinom [9]

Kisikova redukcija obično nastaje zato što elektroliti sadržavaju otopljen kisik, jer imaju kontakt s atmosferom. Razlika takve katodne reakcije u odnosu na prije opisanu sastoji se od toga kako se vodik ne odvaja zbog uvjeta koji vladaju zbog nedovoljne kiselosti agresivne tekućine. Stoga kod važnijih tehničkih metala kao što su željezo, olovo i cink nastupa kisikova redukcija u kontaktu s vodom u prirodi tj. u neutralnim ili slabo kiselim otopinama.

Katodno-anodne reakcije upravljaju brzinom korozije. U ovakvim reakcijama dolazi do prijenosa elektrona te na taj način nastaje struja korozije. Protjecanjem struje, potencijali anode i katode se pomiču iz ravnotežnih vrijednosti, te se približavaju jedan drugome. Na ovaj način nastaje polarizacija.

Stvaranjem mikročlanaka nastaje elektrokemijska korozija na metalnoj površini odnosno galvanski članak.

Radi lokalne razlike u potencijalima pri površini istog metala ako se metal uroni u elektrolit stvaranjem mikročlanaka nastaje elektrokemijska korozija. Zbog unutrašnjih neravnomyjnosti (ovisno u kakvom je stanju površina) ili vanjskih korozijskih faktora (koncentracije otopljenog kisika) određeni dijelovi površine metala na elektrolitu elektrokemijski vrlo su razlikuju, te su jedni u odnosu na druge prikladniji za razvijanje ionizacije metala, dok su drugi pogodniji za odvijanje redukcijskog procesa. Iz tog se razloga procesi redukcije i ionizacije kod metala na površini lokalno odvajaju. Anodni (neplemenitiji) segmenti ioniziraju metal površine, dok se redukcija odvija na katodnim (plemenitijim) segmentima površine.

Anodna reakcija se zbiva kod niskolegiranih čelika na feritu. Ukoliko pri tome u vodi ima otopljenog kisika, katodna reakcija događa se na cementitu uz redukciju kisika. Novonastali ioni hidroksida reagiraju s prethodno stvorenim željeznim kationima i tvore hidrokside. Ukoliko se kisik u vodi nije potrošio, u tom slučaju može nastupiti reakcija a prethodno stvorena hrđa pretvara se u smeđo-crvenu hrđu. Razlika ravnotežnih potencijala lokalne anode i katode je pokretna sila elektrokemijske korozije.

Napon ili razlika potencijala nastaje usljed:

- unutarnjih i vanjskih deformacije i naprezanja
- kristalografske neu jednačenosti na metalnoj površini
- prevlaka i filmova koje nisu homogene na površini metala
- neravnmjerne rpoloživosti kisika otopljenog u elektrolitu
- djelovanja neravnomjernog sastava elektrolita, temperature i koncentracije
- djelovanja mikroorganizama u vodenim sredinama koji razlažu sulfate na sulfide
- neravnomjerne osvjetljenosti i
- vrtložnih lutajućih struja na podvodnim i podzemnim cjevovodima.

Nastajanjem galvanskih članaka između dva metala i elektrolita nastupa proces elektrokemijske korozije. Izvor električne energije možemo dobiti na način tako što uronimo dva metala različitih potencijala u elektrolit koji se izvana povežu vodičem. Takav sustav naziva se galvanskim članakom, a metali uronjeni u elektrolitu nazivaju se elektrode. Razlika potencijala na elektrodama stvara napon, takav napon daje struju elektrona. Metal nižeg potencijala je aktivniji, tj. pozitivna elektroda (anoda). On daje elektrone (oksidira), te njegovi ioni izlaze u otopinu. Elektroda koja se troši tj. korodira naziva se anoda. Elektron sa anode uz pomoć vanjske veze odlazi do negativne elektrode (katode), pri tome nastoji razviti jednakost električnog naboja u sustavu. Elektroni sa katode se povezuju za pozitivne ione na elektrolitu pri čemu dolazi do procesa redukcije. Nosioci električne struje u elektrolitima su ioni (pozitivni ioni su kationi, a negativni anioni), dok su kod metala nosioci elektroni. Posljedica takve

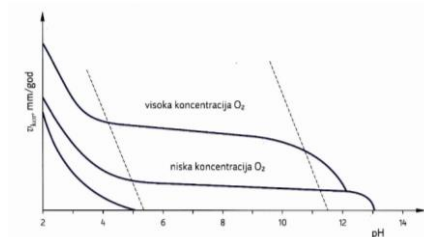
provodljivosti električne struje su kemijske promjene tvari. Broj aniona i kationa u elektrolitu je jednak, te je iz tog razloga elektrolit kao cjelina neutralan.

### 2.2.2 Intenzitet i tok procesa elektrokemijske korozije

Najvažniji parametri intenziteta i toka postupka elektrokemijske korozije jesu:

- struktura
- sastav
- stanje površinske obrađenosti pojedinog materijala
- temperatura
- količina kisika i iona vodika u u samom elektrolitu.

O stupnju hrapavosti površine metala ovisi sklonost prema elektrokemijskoj koroziji. Hrapaviji dijelovi površine skloniji su ionizaciji u odnosu na glade, usljed čega se događa nastajanje korozivskih članaka u kojima su glatke površine katode. Termokorozivski članci nastaju prilikom nejednake raspodjele temperature u kojima su anode toplija mjesta. Udio iona vodika u elektrolitu kao i udio kisika u istome silovito utječe na jačinu razvoja elektrokemijske korozije, brzina korozije jača je što je viša koncentracija kisika. Pri povećanju kiselosti otopine (kada su pH-vrijednost ispod 5), porast brzine korozije je velik što se vidi na slici 2.4. [8,9]



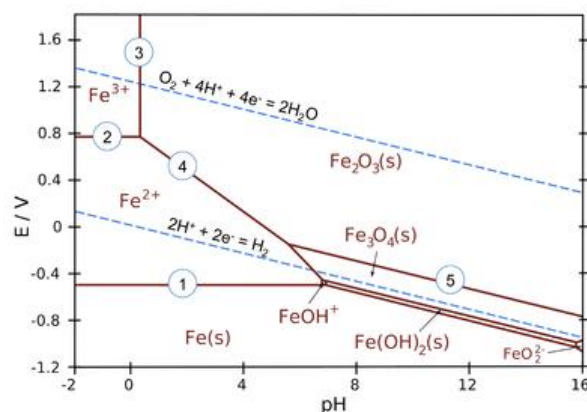
Slika 2.4 Ovisnost brzine korozije o koncentraciji kisika i pH-vrijednosti [10]

### 2.2.3 E-pH (Pourbaixovi dijagrami)

S ciljem jednostavnijeg shvaćanja korozivnih postupaka izrazito je važan rad belgijskog znanstvenika M. Pourbaixa koji E-pH dijagramima prikazuje termodinamičke korelacije među primarnim i sekundarnim elektrodskim reakcijama te sekundarnim kemijskim reakcijama prilikom korozije metala u vodenoj sredini.

Prema Pourbaixovim dijagramima imamo tri zone termodinamičke stabilnosti, i to stabilno područje metala sniženog potencijala, stabilno područje metalnih iona, i stabilno područje

oksida, metalnih hidroksida i hidratiranih oksida i njegovih sklopova u krutom stanju. Kako u prvoj zoni nema pokretne sile za korozijski proces pa do njega ne može niti doći. U tom slučaju metal se nalazi u tzv. imunom stanju. Ako se metalni ioni stabiliziraju, on se nalazi u stanju aktivnosti, te u tom slučaju postoji sila koja pokreće koroziju uz proces ionizacije metala. Kod krutih spojeva metala u stabilnom području isto tako postoji sila pokretanja za proces korozije, dok metal korodira u slučaju ako se navedeni spojevi obustave u vodenom mediju stvarajući u kombinaciji s vodom muljevite smjese. Nasuprot tomu, ukoliko kruti spojevi stvaraju na metalnoj površini slojeve (filmove) koji imaju dobro prijanjaje, korozijski proces se zaustavlja, a metal je ostaje u pasivnom stanju. Vidljivo je iz Pourbaixova dijagrama za Fe (željezo) kao što se vidi na slici 2.5, kako se područje otpornosti čistog i "tehničkog" željeza nalazi ispod -0,6 V za pH-vrijednost od 2 do 9, korozivni potencijal takvih metala uglavnom se kreće oko -0,35 V, što znači kako se potencijal mora sniziti primjenom katodne zaštite za napon od 0,25 V. Plavi pravci na dijagramima, opisuju elektrodni potencijal i vodikovu i kisikovu redukcija. Reduciranje kisika u  $\text{OH}^-$  kao također i redukcija  $\text{H}^+$  u  $\text{H}_2$  omogućena je jedino ispod ovih pravaca.



Slika 2.5 Pourbaixov dijagram za željezo [11]

#### 2.2.4 Tipovi korozije prema geometriji korozivnog razaranja

Pojave korozije klasificiraju se prema svome aspektu i raspoređenosti na površini materijala ili prema geometriji korozivnog propadanja. Najčešća podjela je prema pojavnim oblicima korozije:

1. opća korozija
2. galvanska korozija

3. korozija u procijepu
4. rupičasta korozija
5. interkristalna korozija
6. selektivna korozija
7. erozijska korozija
8. napetosna korozija.

### 2.2.5 Opća korozija

Korozija općeg tipa najrašireniji je, te ujedno i najčešći oblik korozije, no ujedno i najmanje opasan, zahvaća otprilike jednoliko cijelu površinu materijala koja je izložena agresivnoj sredini. Pri projektiranju brzina opće korozije mora se uzeti kao mjerodavna veličina kod odabira materijala. Iskazuje se u mm/god, a mjeri se kao prosječna dubina prodora korozije u metal ili materijal u godini dana. Ovakav pristup je poželjan samo ukoliko je u uvjetima eksploatacije korozija približno u prosjeku ravnomjerna, a to ponajviše ovisi o samim svojstvima materijala te o svojstvima okoline koja ga okružuje (izvanjski faktori korozije). Ravnomjerna opća korozija gledano s tehničkog aspekta najmanje je opasna iz razloga što je proces moguće jednostavno i lako nadzirati te predviđati ako je potrebno određeni dio zamijeniti novim ili se može popraviti. Opća korozija podvodnih dijelova brodskog trupa vidljiva je na slici 2.6.



*Slika 2.6 Opća korozija podvodnog dijela brodskog trupa [12]*

Daleko opasnijom se smatra neravnomjerna opća korozija prilikom koje prosječni prodor u dubinu materijala ne daje uvid u realno stanje trajnosti konstrukcije, posebno izraženo u primjerima cjevovoda i spremnika gdje neravnomjernost korozijskog razaranja dovodi do propuštanja kroz stjenku cijevi. Na slici 2.7 prikazano je korozijsko oštećenje čeličnog cjevovoda rashladne tehnološke vode u pogonu za proizvodnju cementa usljed kojega je došlo do stanjenja stijenke cjevovoda, a zbog naslaga smanjen je i kapaciteta rashladnog sustava.



*Slika 2.7 Opća korozija čeličnog cjevovoda rashladne tehnološke vode u pogonu cementare [13]*

Bez poznavanja korozijskog ponašanja materijala nije moguć racionalan izbor konstrukcijskog materijala (legure), a takav izbor osigurava trajnost same konstrukcije. Opći konstrukcijski čelik u gradskoj atmosferi korodira brzinom 0,2 mm/god. U razblaženoj sumpornoj kiselini brzina korodiranja kreće se oko 10 mm/god. Radi različitih vodenih otopina, suhih i kondenzirajućih plinova čelik u atmosferi korodira intenzivnije što je veći udio (%) C. Visokolegirani korozijski postojani Cr-Ni čelici u gradskoj atmosferi korodiraju do 0,005 mm/god, dok aluminij u gradskoj atmosferi ima brzinu korodiranja oko 0,013 mm/god.

Za uporabu je materijal ukoliko korodira brzinom oko 0,1 mm/god. U suprotnom, treba primijeniti adekvatnu antikorozivnu zaštitu.

Kod opće korozije imamo sljedeće načine zaštite:

- izbor korozijski postojana čelika
- legiranje niskougličnih čelika s više od 0,2 %C
- navlačenje organskih prevlaka
- galvansko prevlačenje (niklanje, kromiranje, cinčanje, itd.)
- dodavanje inhibitora korozije u okolišni medij
- elektrokemijska zaštita.

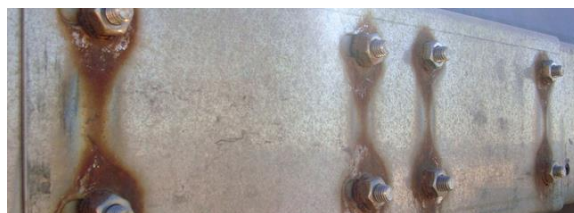
## **2.2.6 Galvanska korozija**

Spajanjem dva ili više materijala različitih potencijala u elektrolitu nastaje galvanska (bimetalna) korozija, prilikom čega dolazi do korodiranja metala s nižim električnim potencijalom. Kako bi se stvorio galvanski članak potrebno je spojiti dva ili više metala različitih potencijala u elektrolitu, gdje je elektronegativni metal anoda, dok je elektropozitivni metal katoda. Usljed razlike potencijala javlja se protok struje elektrona od anode ka katodi, te

anoda oksidira. Slika 2.8 prikazuje galvansku koroziju. Aluminijska oplata (trup) ojačan je čeličnim ojačanjem u dijelu ispod vode te spojen sa zakovicama. Aluminiij posjeduje manji elektrodni ionizacijski potencijal nego ugljični čelik i u tako nastalom galvanskom članku ubrzana je korozija aluminiija. U ovisnosti o elektrodnom potencijalu metala jednog naspram drugog u galvanskom spektru, svaki metal može se ponašati kao katoda ili anoda. Galvanski niz može se opisati kao raspored metala prema njihovom elektrodnom potencijalu izmjenom u specifičnom mediju u odnosu prema određenoj referentnoj elektrodi. Korodirajući metal je na nižem elektrodnom potencijalu i ponaša se kao anoda, te na taj način on korodira. Galvanski niz upućuje na težnju prema galvanskoj koroziji, ali ne daje podatak o mogućoj vrijednosti brzine korozijske reakcije. Značajne promjene u rasporedu galvanskog niza mogu uzrokovati promjene temperature i sastava elektrolita. U galvanskom nizu uočavamo kako se neke vrste materijala nalaze na dva mjesta u nizu, u aktivnom te u pasivnom stanju. Razlog ovome je što su pojedini metali ili legure podložni tvorbi filmova na površini, posebno u okolini gdje oksidacija dolazi do izražaja. Takvi filmovi "pomjeraju" izmjereni potencijal ka smjeru plemenitih metala, te se u takvom stanju materijal uzima u obzir kao pasivan. Ukoliko uz raspored metala stoji i vrijednost ravnotežnih potencijala, tada se govori o elektrokemijskom nizu. [8]

Samo razlika potencijala nedovoljan je podatak za ocjenu od rizika galvanske korozije. Kod pojave i jakosti galvanske korozije značajano utjecaj imaju i odnosi ploština površina katode i anode, vodljivost elektrolita, protok fluida i temperatura. U kontaktu najveću površinu bi trebao posjedovati plemenitiji metal, jer se s tim načinom smanjuje gustoća korozijske struje. U suprotnom, dolazi do bržeg trošenja anode. Iz tog razloga se spojni elementi (vijci, zakovice i zavari) izrađuju od plemenitijeg metala u odnosu na osnovni metal na konstrukciji.

Ukoliko se koriste različiti metali u konstrukciji, potrebno je izabrati metale koji su po mogućnosti u galvanskom nizu što bliže ili ih treba međusobno razdvojiti izolacijskim slojem, kao npr. prevlačenjem. Ukoliko se raznorodni metali nađu u elektrolitu i spojeni su, te međusobno su dovoljno dobro izolirani, korozivni proces se ne može pojaviti bez obzira na njihove različite elektrokemijske potencijale.

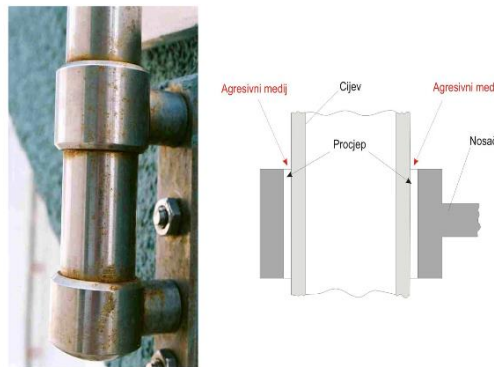


*Slika 2.8 Shematski prikaz galvanske korozije [14]*

## 2.2.7 Korozija u procijepu

Pojavljivanje korozije na površini u uskim pukotinama ili u procijepu konstrukcije, kod materijala identičnih korozivnih potencijala naziva se korozija u procijepu (eng1. crevice corrosion). U ovakvim procijepima i pukotinama pojavljuje se skupljanje vode i raznih nečistoća, ujedno se povećava kiselost otopine, snižava se vrijednost pH dok se raste količina agresivnih faktora. Katodna reakcija događa se na vanjskim dijelovima procijepa, dok se unutarnji dio procijepa pretvara u anodno područje.

Također ovakav tip korozije zna nastati i radi nejednolike raspodjele kisika, prilikom čega se anode pozicioniraju na teže pristupačnim mjestima, dok su katode gdje je veća pristupačnost. Usljed otežanog ulaska kisika u procijep, metalna ploha u procijepu djeluje kao anoda. Iz tog razloga vrlo učestalo intenzivno korodiraju navoji matica i vijaka. Pri oblikovanju konstrukcije kao i odabiru tehnologije njezine izrade, osobito je povezana pojava tog oblika korozije. Primjer korozije u procijepu između nosača ograde i cijevnog elementa vidljiv je na slici 2.9.



Slika 2.9. Primjer korozije u procijepu između nosača ograde i cijevnog elementa [15]

Izbjegavanjem uskih procijepa pri konstruiranju smanjuje se sklonost koroziji u procijepu, a postiže se katodnom zaštitom, izbjegava se stagnacija medija i osigurava bolja drenaža. Uzimajući u obzir korozijsku postojanost zavarenih sklopova prednost se daje neprekinutim i ispravno staljenim sučeljenim zavarenim sklopovima nad isprekidanim i preklapljenim sklopovima.



## 2.2.8. Rupičasta korozija

Rupičasta (engl. pitting) korozija veoma je lokalizirana korozija, okruglog oblika, prilikom čega je nakon dužeg vremena prodiranja dubina višestruko veća u odnosu na njenu širinu na samoj površini materijala. Takav lokalizirani vid korozije napada samo pojedine dijelove površine materijala. Takav vid korozije može pokrenuti:

- mehaničko-kemijska oštećenja filma koji ima zaštitnu ulogu na metalnoj površini
- nehomogenu metalnu strukturu ili
- lokalno djelovanje mikroorganizama.

Nastanak rupičaste korozije nastaje najprije u vodenim sredinama otopljenim kloridnim ionima ( $\text{Cl}^-$ ) koji razaraju pasivni film. Jednom kada se jamica stvori, u unutrašnjosti oštećenog mjesta dolazi do izrazitog nagomilavanja metalnih kationa u kombinaciji s kloridima, a sve slabijeg utjecaja katodnih reaktanata. Kloridni medij nastao na ovaj način vrlo je agresivan, ima ulogu sprječavanja ponovne uspostave pasivnoga filma i potiče daljnje širenje jamice.

Usljed zavarivanja rupičasta korozija najviše se pojavljuje na nehrđajućim čelicima. Usljed unosa topline, na površini metala nastupa pobojenost u blizini zavarenog spoja (engl. heat tints), takva pobojenost u agresivnoj okolini pospešuje nastanku korozije kao što je vidljivo sa slika 2.10. Novonastali film je ustvari sloj oksida čiji je kemijski sastav a i struktura različit u odnosu na pasivni film koji ima ulogu zaštite od korozije, dok se odmah ispod pobojenog područja nalazi područje u metalu u kojemu je udjel kroma značajno smanjen.



*Slika 2.10 Pobojenost površine uzrokovana djelovanjem topline pri zavarivanju [16]*

Pobojenost površine, nehomogenosti kao npr. nečistoće, vlaga, mikroorganizmi, površinska hrapavost, masti, soli iz atmosfere pospješuju pokretanje ovog vida korozije.

Postupci zaštite od rupičaste korozije:

- neposredno iza zavarivanja potrebno je površinu obraditi mehanički, elektrokemijski ili kemijski da bi se eliminirale nehomogenosti te ponovno formirao pasivni zaštitni sloj
- preporuka je upotrebljavati visokolegirane čelike s dodatkom Mo
- za agresivnije sredine treba razmotriti primjenu duplex čelika i legura nikla (s 20-25 % Cr, 20-25 % Ni, te 4-5 % Mo)
- smanjiti agresivnost medija (snižavanje temperature i povišenje pH-vrijednosti)
- anodno zaštititi konstrukcije.

### **2.2.9. Interkristalna korozija**

Izrazito opasan vid korozije koja ima svojstvo da napreduje nevidljivo, napredak se događa dužinom granica zrna, što uzrokuje razaranje metalnih veza među kristalima u mikrostrukturi čelika, što dovodi do raspada čitavog dijela. Interkristalna korozija ukoliko ostane ne primijećena naglo smanjuje žilavost i vlačnu čvrstoću materijala. U većini slučajeva javlja se kod nehrđajućih čelika, legura legiranih niklom i aluminijem. Ovakvom tipu korozije izrazito su podložni nehrđajući čelici (austenitni i feritni). Uvjeti pri kojima nastaje interkristalna korozija po granicama zrna austenitnih Cr-Ni čelika (slika 2.11):

- na temperaturama od 800 do 400 °C usljed procesa difuzije i podložnosti ugljika prema Cr te preniske brzine hlađenja nastupa tzv. senzibilizacije austenita, formiraju se kromovi karbidi na granicama zrna. Tako nastali intermetalni spojevi sadrže u sebi vrlo visoki sadržaj Cr (~ 94 %), a osiromašuju se dijelovi uz granice zrna s kromom, nakon čega takva rubna područja više ne ispunjavaju minimalne uvjete postojanosti na koroziju (Cr < 12 %)
- u elektrolitu galvanski članak se zatvara na području između katode i anode sa umanjenim postotkom kroma, te je rezultat svega toga razaranje strukture i gubitak vlačne čvrstoće.



*Slika 2.11 Interkristalna korozija Cr-Ni čelika [17]*

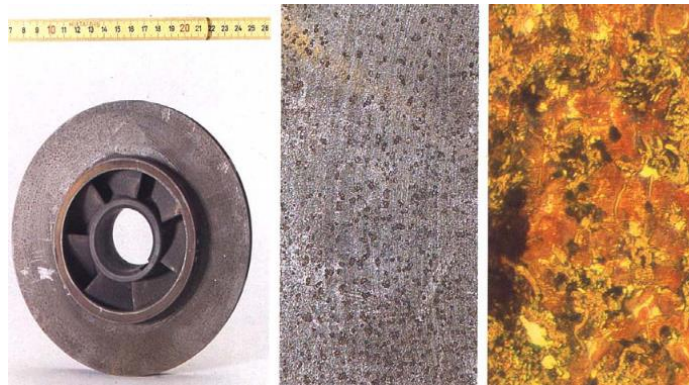
Skлонost interkristalnoj koroziji smanjuje se:

- žarenjem na temperaturi od 1050-1100 °C, u trajanju od 10-40 min, prilikom čega se kromovi karbidi tope u austenitu i gase u vodi
- stabiliziranjem karbidotvorcima kao što su Nb, Ti, Ta, koji spadaju u intenzivnije karbidotvorce od kroma, te zagrijavanjem nastaju karbidi kao što su NbC, TiC, TaC, a ne izrazito opasni Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>
- smanjenjem postotka ugljika na C < 0,03 %, blokira se izlučivanje karbida (engl. low carbon steel).

### **2.3 Selektivna korozija**

Napadanje samo jedne neplemenitije faze ili komponenata višefaznoga materijala naziva se selektivna korozija. Grafitizacija sivoga lijeva u slanoj vodi je jedan od primjera fazne selektivne korozije, razblaženim kiselinama, prilikom čega dolazi do isključivog otapanja perlita i ferita, gdje zaostaje grafit sa spužvastim svojstvima prožet hrđom. Na jednofaznim legurama obično se pojavljuje komponentna selektivna korozija, kao što je decinkacija mjedi s >15 % Zn, pri čemu nastupa otapanje cinka, dok ostaje porozna bakrena matrica. Slika 2.12 prikazuje grafitizaciju sivog lijeva te primjer selektivne korozije na njemu. Korozija selektivnog tipa vrlo je opasan vid korozije, zato što pretvara čvrst i duktilan metal u krhak i slab sklon lomovima. Kod selektivne korozije nema velikih dimenzionalnih promjena pa ova vrsta korozije prolazi neopaženo te zna izazvati iznenadnu havariju. Selektivna korozija dijeli se na opću i lokalnu. Decinkacija mjedi sprječava se zadržavanjem udjela bakra u leguri minimalno 85 %, dok se

grafitizacija sivoga lijeva izbjegava nanošenjem prevlaka i dodatno katodnom zaštitom za ukopane konstrukcije.



*Slika 2.12 Korozija selektivnog tipa [18]*

### **2.3.1 Erozijska korozija**

Istodobno djelovanje kemijskoga procesa kao što je korozija i fizikalnog procesa kao što je erozija, oštećivanje materijala klasični je primjer erozijske korozije. Mehanički poduprt postupak trošenja materijala naziva se erozija, a može se definirati kao progresivni porast gubitka materijala na površini usljed mehaničkog međudjelovanja medija i površine. Funkcioniranjem u korozivnom (agresivnom) mediju javlja se erozijska korozija. Ovaj vid korozije učestalo se događa u sustavima koji služe prijenosu tekućina. U takvom slučaju oštećenje veoma brzo nastane čak i kada je korozivno djelovanje medija malo.

Erozija skida zaštitni sloj s površine materijala kao otopljene ione ili dimenzijski stabilne korozijske produkte, te na taj način poništava njihovo zaštitno djelovanje, pri čemu se izlaže površina materijala korozivnom djelovanju medija. Pritom, korozija pogrubljuje površine metala i na taj način kompaktni pretvara metal u rahli i mekani korozivski produkt, čime se dodatno pospješuje erozija. Ugljični čelici spadaju u metale koji tvore razmjerno deblje slojeve zaštitnih korozivnih produkata, podložni su erozijskoj koroziji u odnosu na konvencionalne pasivne metale (kao što su nehrdajući čelici i titan) jer je oksidni sloj nekorodirajućih metala mnogo tanji i mnogo bolje prianja uz površinu. Mekši metali kao što su bakar i bakrene legure vrlo su skloni eroziji. Slika 2.13 prikazuje erozijsko-korozivna oštećenja.



*Slika 2.13 Erozijsko-korozivna oštećenja [19]*

Metode sprječavanja erozijske korozije su:

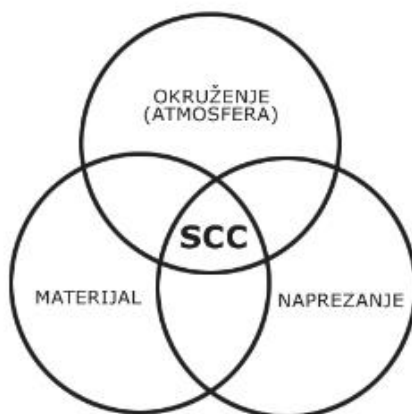
- uporaba materijala veće erozijske i korozivne postojanosti
- prevencija tehnološko konstrukcijskim rješenjima (povećanjem promjera cijevi radi smanjenja brzine strujanja fluida, koljena blažeg radijusa i sl.)
  - zaštita izmjenom situacije (umanjenje agresivnosti medija, katodna zaštita, uporaba inhibitora korozije,)
  - nanošenje zaštitnih prevlaka.

### **2.3.2 Napetosna korozija**

Oblik korozije koji je nastao usljed uzajamnog utjecaja agresivnog okoliša i vlačnih napreznja na materijalu naziva se napetosna korozija. Vlačna napreznja u većini slučajeva su posljedica zaostalih napreznja, koja su zaostala usljed hladnog deformiranja ili zavarivanja, no mogu biti i iz vana dodana napreznja, kao npr. kod dijelova visećih mostova i slično. Pukotine se razvijaju u okomitom smjeru u odnosu na smjer vlačnog opterećenja, te se šire transkristalno ili interkristalno.

Za napetosnu koroziju istovremeno se moraju ispuniti tri uvjeta (slika 2.14):

1. materijali skloni napetosnoj koroziji (legirani metali više su skloni nego čisti)
2. agresivni medij (osobito pri povišenim temperaturama) koji kombiniran s materijalom pospješuje nastajanje napetosne korozije
3. opterećenje (napreznje).



*Slika 2.14 Čimbenici koji značajno utječu na pojavnost napetosne korozije [20]*

Napetosna korozija uobičajeno se povezuje sa nehrđajućim čelicima, i to martenzitne i austenitne, dok su feritni čelici imuni na ovu vrstu korozije, takav tip korozije pojavljuje se i kod drugih materijala, te u njihovim legurama, kao i kod tehničkih materijala kao što su polimerni materijali, keramika i staklo. Ovaj vid korozije učestalo se javlja kod elektrolita koji sadržavaju  $\text{Cl}^-$  i  $\text{OH}^-$  (povišena vrijednost pH) ili  $\text{H}_2\text{S}$ , kod nehrđajućih čelika, pri čemu je značajan faktor temperatura pri kojoj se izvodi eksploatacija. Pri temperaturama ispod  $\sim 55^\circ\text{C}$  takav vid korozije ne nastaje. Pri sniženim temperatura često se događa pojava interkristalnog loma, dok se transkristalni lom događa pri temperaturama višim iznad  $80^\circ\text{C}$ .

Prilikom uporabe niskolegiranih ugljičnih čelika izrazito je nepoželjna sulfidna napetosna korozija, ona se javlja ako na vlak opterećena konstrukcija dođe u kontakt sa sumporovodikom ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Sumporovodik sa željezom tvori atomarni vodik te takav vodik difundira u rešetku kristala, te uzrokuje napetost i izvijanje rešetke što uvodi u pojavu mikropukotina. Što je viša čvrstoća i tvrdoća čelici su podložniji na sulfidnoj napetosnoj koroziji. Prihvatljiva granica razvlačenja je  $R_{p0,2} < 660 \text{ N/mm}^2$ , te tvrdoće  $\text{HRC} < 22$ . Čelici Cr-Ni (austenitni) imaju odličnu otpornost na sulfidnu napetosnu koroziju.

Napetosna korozija vrlo je opasna prilikom predviđanja jer se korozijski procesi teže uočavaju, a rezultiraju velikim padom vlačne čvrstoće, te izazivaju lomove konstrukcija, i sve to uz minimalni gubitak na masi. Oštećenja koja nastanu usljed ovakve vrste korozije potpuno su neočekivana te često prave vrlo velike troškove.

Smanjenje podložnosti napetosnoj koroziji postiže se smanjenjem vlačnog naprezanja uz pomoć toplinske obrade, konstrukcijskim promjenama, obradom sačmarenjem, uporabom inhibitora, katodnom zaštitom i deaktivacijom medija.

### 3 SPECIJALNE BOJE

Bilo koja prevlaka treba štititi podlogu, no najvažnija svrha prevlake podloge može biti raznovrsna. U grupu specijalnih (posebnih) boja može se svrstati i radionički temeljni premaz, tzv. shopprimer. To je boja (sloj) koji se nanosi po metalu odmah nakon osnovne pripreme površine, te služi kratkoročnoj zaštiti limova od čelika i profila u tijeku izgradnje. Tu su također i protuobraštajni premazi koji se koriste isključivo za brodogradnju, a svrha im je zaštita podvodnog segmenta konstrukcije, kako ne bi došlo do obrštanja biljnih i životinjskih organizama. Zatim tu su i protuklizne boje koje se primjenjuju za površine po kojima se hoda, dok je poželjno da zadrže svojstvo hrapavosti i u slučaju kada je površina onečišćena uljem. I ne manje važne protupožarne boje kojima je cilj sprječavanje širenje požara. [21]

#### 3.1 Radionički temeljni premazi – shopprimeri

Posebna premazna brzosušeća sredstva koja služe kao privremena radionička zaštita čeličnih profila i limova nazivaju se Shopprimeri. Također se nazivaju i temeljnim premazima za pretkonstrukcije, te se nanose odmah nakon procesa sačmarenja u radionicama.



Slika 3.1 Radionica za privremenu radioničku zaštitu, Brodogradilište Uljanik [21]

Proces privremene radioničke zaštite je automatiziran i sastoji se od transporta profila i limova, sušenja pod kontrolom, primarne pripreme površine (npr. sačmarenjem) te vrlo zahtjevnog postupka pripremanja i nanošenja shopprimera prikazanog na slici 14. Površina se priprema uglavnom prema standardu Sa 2,5 (HRN EN ISO 8501-1:2007)

Provizorna radionička zaštita dolazi prije svih tehnoloških procesa izradbe i montaže konstrukcije, stoga shopprimeri trebaju udovoljiti sljedećim posebnim zahtjevima:

- primjenjuju se kod automatskog nanošenja prskanjem u tankom sloju ( $DSF < 25 \mu m$ )
- skraćeno je sušenje (3 - 5 minuta)
- ne smiju utjecati na kvalitetu brzine zavarivanja i rezanja
- ne trebaju utjecati na mehaniku zavarenog sklopa
- postojanost pri visokim temperaturama
- ne smiju oslobađati toksične plinove prilikom rezanja i zavarivanja
- sposobnost kako bi izdržali grubo rukovanje
- otpornost prema atmosferilijama
- kompatibilnost sa završnim sustavima premaza.

### 3.1.1 Vrste shopprimera

#### 1. Na osnovi PVB-a (polivinil butiral)

PVB posjeduje veoma slabu otpornost prema lužinama i sklon je tvorbi mjehurića na uronjenim dijelovima, sa sustavom katodne zaštite narinutom strujom i bez sustava takve zaštite. Trajnost je premaza limitirana.

#### 2. Epoksi

Ova vrsta zaštite je dobar shopprimer te posjeduje odličnu otpornost prema atmosferilijama, kompatibilan je s velikom količinom premaznih sustava, te daje odlične rezultate kod površina koje su uronjene i dodatno se štite katodnom zaštitom narinutom strujom. Kod pigmentacije se najčešće primjenjuju željezni oksid i cink.

##### *Cink-epoksi shopprimer*

Ukoliko se kao pigmentacija rabi cink koji daje zaštitu čeliku svojim otapanjenem, veliku pažnju treba usmjeriti na otklanjanje cinkovih spojeva prije nanošenja specificiranog zaštitnog premaza. Spojevi cinka stvaraju alkalični medij iz boje saponificira sa smolom. Teško su odstranjivi s površine (što je obvezno odraditi) i topljivi su u vodi. Zbog takvih nepoželjnih osobina cinkovih oksida, u više slučajeva se rabi shopprimer na bazi željeznog oksida.

##### *Željezno oksidni shopprimer*

Cink-epoksi shopprimer u odnosu na željezno-oksidni shopprimer pruža relativno dužu zaštitu. Velika prednost je što na površini ne stvaraju soli koje loše utječu na premazani sustav, te ih je potreba dodatno čistiti. Cjenovno je znatno povoljniji u odnosu na cink-epoksi shopprimera i izlučuje manju količinu štetnih plinova prilikom zavarivanja, a brzina zavarivanja i rezanja mnogo je veća.



### 3. Cinksilikat

Najtrajniji među radioničkim temeljnim premazima je cinksilikatni shopprimer te također posjeduje najbolja antikorozivna svojstva. Tvar za premazivanje je na osnovi etilsilikatnoga veziva, gdje se cink rabi kao pigment. Glavni nedostatak cinksilikatnog shopprimera je što se kroz određeno vrijeme na površini stvore cinkovi oksidi pa je potrebno detaljnije čišćenje površina prije nanošenja konačnog premaza.

Razvoj treće generacije shopprimera na bazi cinsilikata sa smanjenim udjelom cinka ( $Zn < 25$  do 35 %) donosi smanjenje nepoželjne pojave cinkovih soli i omogućuje kvalitetnije i brže zavarivanje. Smanjenje udjela cinka rezultira i nižim cijenama, iz tog razloga se u današnje vrijeme cinksilikatni shopprimeri koriste u većini brodogradilišta. Najvažnija svojstva svih vrsta shopprimera prikazana su u tablici 3.1. [21]

Tablica 3.1 Vrste shopprimera i njihova važnija svojstva [21]

Svojstva	Tip shopprimera			
	Cink-epoksi	Cinksilikat	Epoksi željezni oksid	PVB
pakiranje	dvokomponentno	dvokomponentno	dvokomponentno	jednokomponentno
otapalo razrijeđivač	esteri, ketoni, aromati	voda, alkohol	esteri, ketoni, aromati	alkohol, ketoni
dsf [ $\mu\text{m}$ ]	12-20	12-20	20-25	15-25
antikorozivna svojstva	vrlo dobra	odlična	dobra	zadovoljavajuća
mehanička čvrstoća	dobra	odlična	vrlo dobra	dobra
utjecaj na zdravlje	pojava cinkove groznice	pojava cinkove groznice	neznatan	neznatan
međupremazni interval	kritičan	kritičan	ponekad kritičan	dobar
otpornost na katodnu zaštitu	dobra	dobra	dobra	ograničena

#### 3.1.2 Antivegetativni premazi

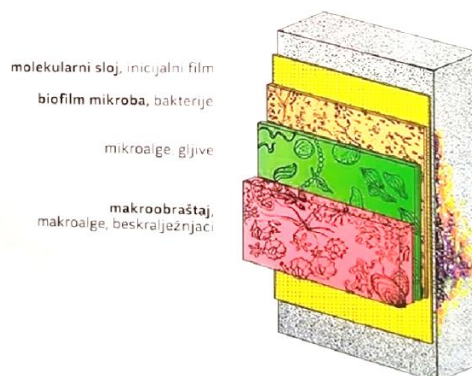
Anti vegetativni (protuobraštajni) premazi koriste se prilikom zaštite podvodnih dijelova brodova od obraštaja biljnog i životinjskog porijekla. Takvo obraštanje umanjuje brzinu broda a time povećava i utrošak goriva. Antivegetativni premazi štite se i ostali pomorski objekti (kao

npr. dokovi, platforme, bove itd.) jer obraštanje izaziva anaerobnu koroziju metalnih površina i povećava masu uronjene konstrukcije. Na slici 3.2 prikazan je antivegetativni premaz.



Slika 3.2 Antivegetativni premaz [21]

Iz istraživanja koja je 2002. provela mornarica SAD-a, teški obraštaj na podvodnom dijelu trupa jednog nosača zrakoplova uzrokuje povećanu potrošnju goriva i do 40 % kako bi se nadoknadio gubitak brzine od 1,5 čvorova i postigla radna brzina od 20 čvorova. Za tanker od 250 000 tona nosivosti pri obraštaju podvodnog dijela trupa od samo 5 % potrošnja goriva je povećana za 17 %. S povećanom potrošnjom goriva rastu i emisije štetnih plinova ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ) koji se ispuštaju u okoliš. [9]



Slika 3.3 Faze razvoja obraštaja na uronjenom dijelu konstrukcije [21]

Obraštanje (engl. *fouling*) počinje u onom trenutku kada se umjetno stvoreni objekt uroni u more (slika 3.3). Radilo se o drvu, metalu ili plastici, njegova površina vrlo brzo skuplja otopljenu organsku tvar i molekule kao što su polisaharidi, proteini i dijelovi proteina, što se smatra početnim stadijem obraštanja. Alge i bakterije i u tom slučaju imaju povoljne uvjete za obraštanje na uronjenoj površini objekta, gdje se nastanjuju tvoreći mikrobnj biofilm. Takav

stadij obraštanja podrazumijeva izlučivanje ljepljivih muko-polisaharida i drugih kemikalija sa znatnim efektima koji su uzrok mikrobiološke korozije. Prisutnost adhezijskih izlučevina u kombinaciji s hrapavošću kolonija mikroba pomaže uhvatiti još više čestica organizama kao što su npr spore algi. Kao treći stadij obraštanja može se uzeti prijelazni stadij od mikrobnog biofilma na složeniju zajednicu. Četvrta i ujedno završna faza obuhvaća naseljavanje i rast većih morskih beskralježnjaka. Dotrajalost i obraštanje površine glavni su uzroci povećanja hrapavosti vanjske oplata uronjenog dijela trupa, dok hrapavost ima najznačajniji utjecaj na otpor trenja. Upravljivost broda se smanjuje s pojavom obraštanja, a time rastu i troškovi održavanja. Brod mora učestalo u dok, a priprema površine uz nanošenje premaza zahtijeva više vremena i sredstava (slika 3.4). Kao posljedica obraštaja na brodu javlja se širenje morskih organizama iz prirodnog staništa u područja gdje prijete narušavanju ekološke ravnoteže.



*Slika 3.4 Dokiranje remorkera „Smjeli“, NCP Remontno brodogradilište Šibenik [21]*

### **3.1.3 Povijesni prikaz**

Kroz povijest pojavile su se mnogobrojni načini zaštite od obraštanja, dok su danas u uporabi najčešće premazi koji su sve kvalitetniji i po okoliš neškodljivi. Prvi pisani dokaz o tretmanu dna broda potječe iz 5. st. pr. Krista. Vjeruje se kako su drevni Feničani i Kartažani rabili katran kao zaštitni premaz, pojavljuje se i upotreba arsena i sumpora u kombinaciji s uljem. Venecijanska flota u srednjem vijeku rabila je katran pomiješan s lojem i smolom, dok su Portugalci toplinski poughlenili vanjsku oplatu brodova. Kao odlično sredstvo protiv obraštanja bakar je prihvaćen nakon pokusa na brodu "Alarm" 1758. god. Od 1777. obloga od bakra postala je standardna na brodovima britanske mornarice. Dolaskom čeličnih brodova, bakrene obloge su napuštene zbog korozivnog djelovanja bakra na čelik. Prvu prevlaku kao sredstvo protiv obraštanja patentirao je Willam Beale 1625. god. Navedena prevlaka bila je složena od željeza u prahu, cementa i nekoga bakrenog spoja. Nakon 1835. konkretno je

shvaćen problem galvanske korozije čeličnog trupa i povećana potreba za sredstvima protiv obraštanja koja ne stvaraju galvanske efekte, te se počinju razvijati premazi koji otpuštaju otrovne tvari. Učestalo korišteni otrovi bili su arsen, bakar i živa zajedno sa svojim spojevima. Na početku 20. st. prevladalo je mišljenje kako je Talijanska Moravia (premaz na bazi vrele plastike, smjesa prirodne smole i bakrenih spojeva) jedan od najboljih antivegetativnih premaza. tributiltin) komercijalizirani su šezdesetih godina 20. st. i prezentirani su kao "Čarobno oružje" jer su pružali maksimalnu zaštitu od obraštanja tijekom 5 godina, a bilo ih vrlo jednostavno nanositi. Mislilo se kako je problem obraštanja riješen, no 1980-ih godina uočeno je kako organokositreni spojevi ne ubijaju samo organizme koji obraštaju brodove već truju i sve ostale morske organizme. Nakon takve spoznaje izbačeni su iz upotrebe, a danas i zabranjeni. [9]

### **3.1.4 Protuklizne boje**

Protuklizne boje primjenjuju se kod površina za hodanje i voznih površina kako bi se zadržala hrapavost podloge i dok je mokra ili onečišćena uljem. Kako bi premaz imao protuklizni učinak dodaju se primjese kao što su pijesak i kvarcni prah koji nakon sušenja boje, izbijaju na površinu prevlake te daju površini potrebnu hrapavost. Izrađuju se na bazi epoksidnog veziva, te ih je potrebno nanositi u što tanjem filmu.

Klasični načina protuklizne zaštite je da se na voznu površinu navare trake četvrtastog profila raspoređene u "riblju kost". Protuklizni premazi pokazali su se kao odlično rješenje i za takvu namjenu jer se izbjeglo zavarivanje traka. Najprije se na podlogu nanese premazno sredstvo koje se zatim posipa abrazivnim zrnima. Dok se premazno sredstvo suši, na taj način abrazivna zrnca se učvršćuju u hrapavu protukliznu prevlaku. U današnje vrijeme protuklizni premazi upotrebljavaju se na unutrašnjim rampama brodova za prijevoz automobila. [9]

### **3.1.5 Protupožarne boje**

Protupožarne boje primjenjuju se kod pasivne protupožarne zaštite tako da spriječe širenje požara i uspore zagrijavanje do kritičnih temperatura pri kojima dolazi do deformacija konstrukcijskih materijala koje ugrožavaju nosivost same konstrukcije. Protupožarna boja ograničeno vrijeme (uobičajeno 30 do 60 minuta) održava stabilnost konstrukcije i time obezbjeđuje dodatno vrijeme potrebno za evakuaciju i gašenje požara. Npr. za čelik kritična

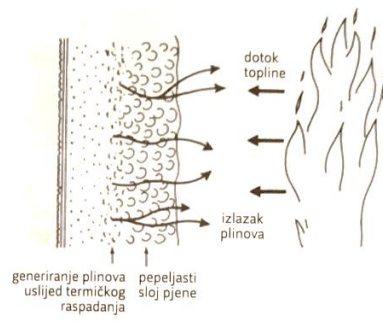
temperatura prilikom koje dolazi do degradacije mehaničkih vrijednosti iznosi 500 °C, dok je kod aluminijske ta temperatura znatno niža 200 do 250 °C. Postoje dvije najvažnije vrste protupožarnih boja koje se nanose raspršivanjem, organske i anorganske. Kod organskih premaza najčešće se koriste ekspandirajuće (termoreaktivne) boje, dok kod anorganskih cementne prevlake. Kao pasivna zaštita od požara primjenjuju se također i izolacijske ploče kojima se oblažu konstrukcijski dijelovi. [9]

### **3.1.6 Princip djelovanja protupožarnih ekspandirajućih boja**

Prilikom pojave požara protupožarna ekspandirajuća boja ekspandira i stvara zaštitnu pjenu koja služi kao izolator i usporava prijenos topline te štiti površinu od pregrijavanja na temperature pri kojima dolazi do degradacije mehaničkih svojstava materijala. Volumen premaza ekspanzijom se širi i više od 100 puta. Premaz debijine oko 1 mm, pod djelovanjem plamena širi se u zaštitni sloj pepeljastog čvrstog nanosa od oko 100 do 150 mm. Postoje tri osnovne komponente ekspandirajućih boja koje su ujedno i aktivne komponente:

- katalizator - najčešće amonijev polifosfat, izvor kiseline
- izvor ugljika - radi se o penteritritolu ili dipentaeritritolu
- izvor inertnog plina - najčešće melamin ili dicitandiamid koji je generator dušika.

Proces nastajanja termoizolacijske pjene iz premaza (prikazan na slici 3.5) događa se u više faza. Pri temperaturi oko 250 °C amonijev polifosfat se dijelom raspada pri čemu oslobađa amonijak te prelazi u polifosforu kiselinu koja nakon toga ulazi u reakciju s poliolum, oduzimajući iz polioluma vodu. Na taj način nastaje ugljično-polifosfatna struktura, građevno vezivo buduće pjene. U narednoj fazi dolazi do raspada komponente (npr. melamina) koja je izvor inertnog plina, oslobađa se dušik koji provodi širenje (ekspanziju) materijala i stvara pjenu. [9] Vrlo je važno da se proces razvija po određenoj koncepciji, najprije se stvara materijal za pjenu, a tek nakon toga plin koji će ga širiti (ekspandirati). Pri tome je vrlo važno da je pjena što većeg volumena, izdržljiva, dovoljno čvrsta, da što bolje prijanja na podloge ostavljajući ju zaštićenom te bez pukotina. Vezivo ima vrlo važnu odluku u završnoj kvaliteti tih vrsta premaza, tvori film, a o njegovoj kompaktnosti ovisi svojstvo zadržavanja homogenosti. U vremenu prije požara vezivo ima najvažniju ulogu jer osigurava prevlak prevlaci dobra fizičko-mehanička svojstva, odlično prijanja na podlogu koja treba biti otporna na mehaničke utjecaje i različite agense. Kao vrlo kompatibilna veziva s vremenom izdvojili su se termoplastični akrilati, stirolo – akrilat i vinilkloridi.



*Slika 3.5 Nastajanje izolacijske pjene pri izlaganju vatri [21]*

## 4 EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada ispitan je utjecaj temeljnog zaštitnog premaza na kvalitetu zavarenog spoja. Utjecaj je ispitan laboratorijskim mehaničkim metodama, odnosno kroz tri posebna testiranja. Ispitni uzorci izrađeni su od materijala P265GH na koje je nakon pripreme podloge nanešen zaštitni premaz. Nakon kondicioniranja ispitne ploče su zavarene MAG postupkom zavarivanja te podvrgnute pripremi i testiranju ispitnih uzoraka.

Plan pokusa, tj. ispitivanje utjecaja temeljnog zaštitnog premaza 1 na kvalitetu zavara izvedeno je slijedećim redoslijedom:

- priprema ispitnih uzoraka
- nanošenje zaštitnog premaza
- zavarivanje ispitnih uzoraka
- radiografska kontrola zavarenog spoja ispitnih uzoraka
- priprema i označavanje ispitnih epruveta
- ispitivanje mehaničkih svojstava zavarenog spoja
- analiza rezultata ispitivanja

### 4.1 Tehnički podaci o materijalu

Ispitni uzorci izrađeni su od ugljičnog čelika P265GH, koji je pogodan za upotrebu pri povišenim temperaturama. Ugljični čelik P265GH je idealno pogodan za povišene temperature i često se koristi u naftnoj, plinskoj, petrokemijskoj, kemijskoj industriji, te kod proizvodnje električne energije. Ugljični nelegirani čelik P265GH koristi se za posude pod tlakom, otporan je na toplinu te definiran normom EN 10028. Jedan je od glavnih materijala za izradu kotlova i posuda pod tlakom. Normalizira se na temperaturi od 890 do 950 °C. Dostupan je u cijevima, limovima ili čak u kovanom obliku.

Karakteristike ugljičnih ne legiranih čelika iz te skupine su slijedeće:

- ovim čelicima ne jamči se ukupni kemijski sastav, nego se samo sadržaj nekih legirajućih elemenata, primjesa i nečistoća ograničavaju "prema gore" kao što je prikazano u tablici 4.1

- jamče im se neka mehanička svojstva  $R_m$ ,  $ReH$ ,  $A_5$  i  $KV$  (ovo posljednje pri nekoj zadanoj temperaturi) kao što je prikazano u tablici 4.2

- isporučuju se, prema želji i propisima korisnika čelika, u nesmirenom, smirenom ili posebno smirenom stanju, a čelici ove grupe i svih ostalih grupa još i u stanju ohlađenom na zraku sa završne temperature tople obrade deformiranjem ("prirodno stanje") ili u normaliziranom stanju
- ovim čelicima u normaliziranom stanju jamči se zadana udarna radnja loma 27 J pri temperaturi ispitivanja -20 °C
- broj "265" predstavlja minimalnu granicu razvlačenja u normaliziranom stanju.

*Tablica 4.1 Kemijski sastav materijala*

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni
≤0,20	≤1,4	≤1,4	≤0,025	≤0,020	≤0,3	≤0,3

*Tablica 4.2 Jamčena mehanička svojstva materijala*

$R_m$	$ReH$	$A_5$	Rad loma $KV$	
MPa (3...100 mm)	MPa min. (≤ 16mm)	% min. (3...40 mm)	J min.	Pri θ, °C
400...530	265	22...23	27	-20

## 4.2 Priprema uzoraka

Ispitni uzorci dimenzija 150x300x12 mm izrezani su iz lima gore navedenog kemijskog sastava i mehaničkih svojstava. Izrezano je šest ispitnih ploča koje su naknadno postupkom zavarivanja spojene u tri zavarena sklopa. Svaka ispitna ploča prije samog postupka zavarivanja prošla je nekoliko koraka. Prvi korak nakon izrezivanja ispitnih ploča zadanih dimenzija bio je pravljenje žljeba za zavarivanje. Žljeb za zavarivanje izrađen je u "V" obliku, tako da je rub ploče obrađen na 30° kako bi ukupni kut žljeba za zavarivanje iznosio 60°. Nakon što su žljebovi pripremljeni, ispitni uzorci su podvrgnuti mehaničkoj obradi površine.

Mehaničko čišćenje površine mlazom abraziva provodi se u svrhu otklanjanja korozivskih produkata sa površine te istodobno postizanja određene hrapavosti koja je potrebna za dobro vezanje zaštitnog premaza na šticieni materijal, u ovom slučaju primjenom okruglijeg abraziva omogućilo bi se bolje vezanje sloja radioničkog temelja za površinu [22].



Učinak samog mlaza kod mehaničkog postupka u ovisnosti je o različitim faktorima koje treba optimalno izabrati kako bi se kvaliteta tretirane površine mogla svrstati u zahtijevanu kategoriju. Tvrdoća, oblik i veličina čestica te upadni kut i brzina mlaza definirat će kvalitetu obrađene površine [23].

Zahtijevana kvaliteta površine nakon čišćenja mehaničkim postupkom mora biti u skladu sa kvalitetom Sa 2½ prema HRN EN ISO 12944/4 normi. Pri tom treba postići hrapavost površine u rasponu od 40-70 µm.

Kako bi se provjerilo jesu li zadovoljeni prethodni uvjeti uređajem je mjerena hrapavost površine, a rezultati pokazuju da je prosječna hrapavost (od izvedenih 20 mjerenja) tretiranog sloja 77,2 µm što je vidljivo u tablici 4.3.

*Tablica 4.3 Hrapavost površine nakon čišćenja mlazom abraziva*

Broj mjerenja	Najmanja izmjerena vrijednost, µm	Najveća izmjerena vrijednost, µm	Srednja izmjerena vrijednost, µm
20	47	200	77,2

### **4.3 Nanošenje zaštitnog temeljnog premaza (shopprimera)**

Kako je ranije spomenuto pripremljeno je šest ispitnih ploča koje će biti zavarene u tri sklopa na kojima će se vršiti laboratorijska ispitivanja mehaničkih svojstava. Kako bi postojao kontrolni uzorak na dvije ispitne ploče (naknadno zavarene u jedan sklop) nije nanešen zaštitni premaz. Na druge dvije ploče nanešen je premaz preporučene debljine od strane proizvođača temeljnog zaštitnog premaza koji iznosi 15 µm suhog filma, dok je na preostale dvije ploče nanesen zaštitni sloj u vrijednosti duplo većoj od preporučene, tj. 30 µm suhog filma. Zaštitni sloj moguće je nanijeti bezračnim špricanjem ili špricanjem sa komprimiranim zrakom uz redovito provjeravanje čistoće filtera.

Razlika između zračnog špricanja, odnosno špricanja komprimiranim zrakom i bezračnog špricanja je u tome što se kod zračnog špricanja zaštitno sredstvo podtlakom, koji nastaje na ušću zračne mlaznice, usisava iz spremnika koji je montiran ispod raspršivača ili se tlači iz spremnika, dok kod bezračnog špricanja mlaz nastaje u pištolju bez miješanja sa zrakom, snažno potiskujući boju kroz mlaznicu pneumatski ili hidraulički [3,24].

Zaštitni premaz korišten u antikoroziivne svrhe pri ovom ispitivanju je dvokomponentni epoksi premaz. Parametri nanošenja zaštitnog premaza prikazani su u tablici 4.4. Vezivo,

otapala, pigmenti, punila, aditivi su osnovne komponente od kojih se sastoji svaki premaz. Ono što karakterizira ovdje korišteni premaz je korištenje epoksidne smole kao veziva. Takva veziva su polieteri fenola i viševalentnih alkohola. Primjenom takvog veziva moguće je proizvesti jednokomponentne i dvokomponentne premaze [3, 24].

*Tablica 4.4 Parametri nanošenja zaštitnog premaza*

Izlazni pritisak	Otvor mlaznice	Kut mlaza
10-15 MPa	0,015-0,021“ (0,38-0,53 mm)	30-80°

### 4.3.1 Kontrola debljine suhog filma premaza

Za kontrolu nanešenog zaštitnog premaza, odnosno mjerenje debljine suhog filma korišten je uređaj Elcometer, a takav način mjerenja spada u nerazorne metode. Uređaji poput navedenoga rade na principu magnetizma ili vrtložnih struja, a privlačna sila između permanentnog magneta i magnetične metalne podloge obrnuto je proporcionalna udaljenosti između njih [25].

U tablici 4.5 i tablici 4.6 prikazani su dobiveni rezultati mjerenja za obje debljine nanešenoga temeljnog zaštitnog premaza.

*Tablica 4.5 Debljina nanešenog sloja suhog filma preporučene vrijednosti*

Broj mjerenja	Najmanja izmjerena vrijednost, $\mu\text{m}$	Najveća izmjerena vrijednost, $\mu\text{m}$	Srednja vrijednost, $\mu\text{m}$
20	11,5	19,0	15,94

*Tablica 4.6 Debljina našešenog sloja suhog filma vrijednosti duplo veće od preporučene*

Broj mjerenja	Najmanja izmjerene vrijednost, $\mu\text{m}$	Najveća izmjerena vrijednost, $\mu\text{m}$	Srednja vrijednost, $\mu\text{m}$
20	27,3	49,9	34,3

Budući da su debljine zaštitnog sloja zadovoljavajuće, ispitni uzorci prije daljnjih koraka, odnosno zavarivanja, ostavljaju se deset dana na kondicioniranju u uvjetima sobne atmosfere.

#### 4.4 Zavarivanje uzoraka

Ispitni uzorci zavareni su MAG postupkom zavarivanja, tj. elektrolučnim postupkom zavarivanja taljivom žicom u zaštiti aktivnog plina, CO<sub>2</sub> i plinskih mješavina (npr. 82% Ar i 18% CO<sub>2</sub>). Kod MAG postupka zavarivanja električni luk se uspostavlja kratkim spojem između taljive, kontinuirane, elektrode u obliku žice i radnog komada, odnosno priključaka na polove istosmjerne električne struje. Nakon ostvarenog električnog luka, dodaje se žica za zavarivanje i formira se zavareni spoj [26].

Parametri MAG postupka zavarivanja dani su u tablici 4.7.

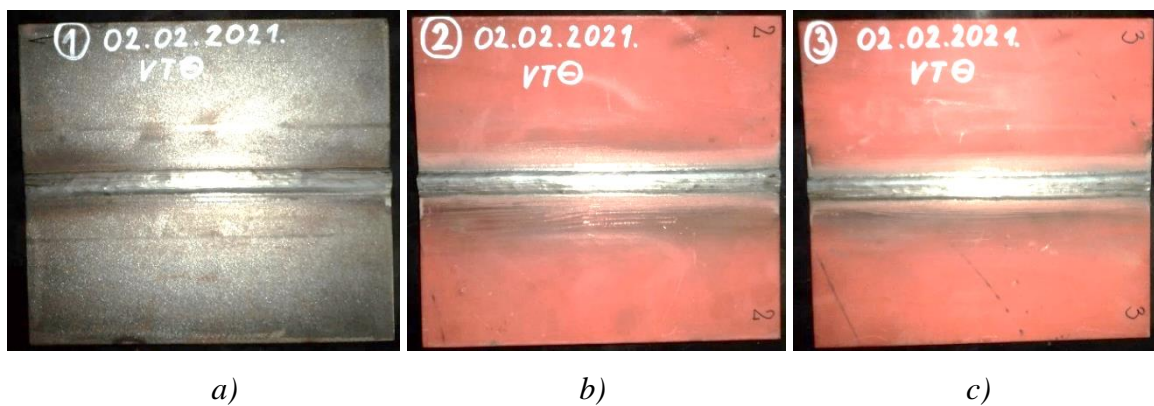
*Tablica 4.7 Parametri MAG postupka zavarivanja*

Postupak	135
Položaj zavarivanja	PA, PG
Dodatni materijal	EN ISO 14341-A: G 3 Si 1
	MG2/ Oerlikon
	Magmaweld
Promjer	1,0 i 1,2 mm
Struja	270-280 A
Napon	24,0-28,0 V
Brzina zavarivanja	30,0-50,0 cm/min
Unos topline	≤1,000 kJ/mm

#### 4.5 Vizualna kontrola zavarenih spojeva

Prije bilo koje druge kontrole bez razaranja materijala primjenjuje se vizualna metoda kontrole zavara. Vizualna metoda kontrole zavara relativno je jeftina, ne oduzima previše vremena, a daje vrlo korisne informacije o kvaliteti i stanju zavarenih spojeva, te određuje i ima li potrebe za kontrolom nekom drugom metodom kao npr. penetrantska metoda, radiografska metoda, usltrazvučna metoda i slično. Kao pomoć kod vizualne kontrole u skućenim i nepristupačnim dijelovima konstrukcije koriste se različita povećala uz osvjetljenje.

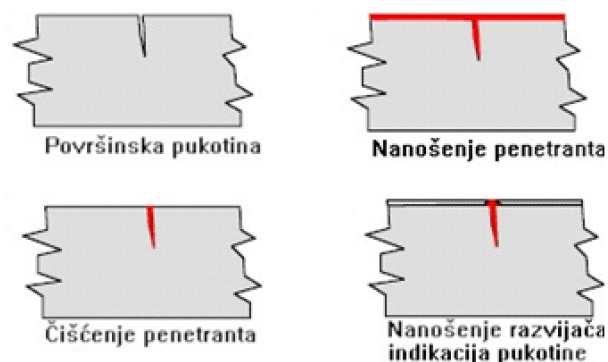
- Nakon zavarivanja ispitnih uzoraka napravljena je vizualna metoda zavarenih spojeva u skladu sa normom EN ISO 17637-1, prema kriteriju prihvatljivosti EN ISO 5817 u klasi B za sučeone zavarene spojeve. Tumačenje nepravilnosti provodi se u skladu sa EN ISO 5817. Iz priloženih rezultata vizualne kontrole uzoraka P1, P2 i P3 vidljivo je kako je referentni uzorak bez premaza zadovoljio postavljene zahtjeve, te da su ispitni uzorci s premazom također zadovoljili postavljene zahtjeve. Vizualnim pregledom uzoraka za atest postupka zavarivanja uočeno je kako su zavareni spojevi pravilnog oblika, na spoju nema pukotina i nepravilnosti (rupa, poroznosti i nedozvoljenih zajedaja), dimenzije i nadvišenje zavarenog spoja zadovoljavaju propisanu normu kao što je prikazano na slikama 4.1 a), 4.1 b) i 4.1 c).



Slika 4.1 Izvješće o vizualnom pregledu uzoraka P1, P2 i P3

#### 4.6 Penetrantska kontrola zavarenih spojeva

Kontrola penetrantima često se koristi kod kontrole zavarenih spojeva na konstrukcijama. Na slici 4.2 prikazan je shematski princip kontrole penetrantima.



Slika 4.2 Shematski prikaz procedure provođenja kontrole tekućim penetrantima [27]

Na prethodno očišćenu i odmašćenu površinu nanosi se penetrant (obično crvene boje). Nakon penetriranja u eventualnu pukotinu (vrijeme penetriranja, tj. prodiranja u pukotine ovisi o vrsti penetranta i o dimenzijama pukotine, ali se približno uzima 10 do 15 minuta), odstranjuje se penetrant na odgovarajući način (vodom, suhom krpom). Kod penetranta koji se odstranjuju vodom treba biti pažljiv i mlaz vode usmjeriti paralelno sa površinom lima, kako mlaz vode ne bi istisnuo penetrant iz pukotine. Nakon sušenja površine lima (suha krpa) nanosi se razvijlač (obično je bijele boje), koji izvlači penetrant iz pukotine, pa je na bijeloj površini lima lako uočljiva crvena linija od penetranta iz pukotine. Kod tanjih limova na jednu se stranu nanosi penetrant, a na drugu razvijlač. Ukoliko postoji pukotina kroz cijelu debljinu lima, tada će razvijlač izvući penetrant na svoju stranu, što će se detektirati kao lako uočljiva crvena linija od penetranta iz pukotine na bijeloj (od razvijlača) površini lima.

Ovom je metodom moguća detekcija pukotine, ali ne i dimenzije i ostale karakteristike pukotine. Kontrola tekućim penetrantima ne primjenjuje se kod zavarenih spojeva zavarenih proizvoda za prehrambenu industriju, kao ni kod zavarenih spojeva gdje postoji sklonost prema koroziji (posebno koroziji uz naprezanje).

Nakon zavarivanja ispitnih uzoraka napravljena je penetrantska kontrola zavarenih spojeva u skladu sa normom EN ISO 15614-1, prema kriteriju prihvatljivosti EN ISO 23277 i EN ISO 3452-1 za zavarene spojeve. Tumačenje nepravilnosti provodi se u skladu sa EN ISO 6520. Iz priloženih rezultata penetrantske kontrole vidljivo je kako je referentni uzorak bez premaza zadovoljio postavljene zahtjeve, te da su ispitni uzorci s premazom također zadovoljili postavljene zahtjeve što je prikazano na slikama 4.3 a), slika 4.3 b) i 4.3 c).



a)

b)

c)

*Slika 4.3 Izvješće o penetrantskom pregledu uzorka P1, P2, P3*

## 4.7 Radiografska kontrola zavarenih spojeva

Ispitni uzorci podvrgnuti su kontroli bez razaranja, koju moraju zadovoljiti prije nego bi se prešlo na ispitivanje mehaničkih svojstava zavarenog spoja. Kontrola bez razaranja neizostavni je dio proizvodnog procesa, a potreba za povećanjem sigurnosti u proizvodnji i sigurnosti gotovih proizvoda povećala je njenu važnost. Osim primjene u cilju povećanja sigurnosti, važna je uloga kontrole i u ocjenjivanju kvalitete i pouzdanosti proizvoda [28, 29].

Radiografsko snimanje sa svojom širokom primjenom u zrakoplovnoj industriji, brodogradnji, ispitivanju posuda pod tlakom itd., jedno je od najvažnijih tehnologija kontrole bez razaranja [30].

Nakon zavarivanja ispitnih uzoraka napravljena je radiografija zavarenih sklopova u skladu sa normom BS EN ISO 17636-1, sa osjetljivošću klase B. Tumačenje nepravilnosti provodi se u skladu s BS EN ISO 6520-1. Iz priloženih rezultata radiografske kontrole vidljivo je da ispitni uzorci s premazom nisu zadovoljili postavljene zahtjeve, dok je referentni uzorak bez premaza zadovoljio postavljene zahtjeve. Radiografsko izvješće za referentni uzorak (P1) bez radioničkog temeljnog premaza prikazano je na slici 4.4, dok su rezultati radiografske analize svih uzoraka prikazani u tablici 4.8.

 <b>RADIOGRAFSKO IZVJEŠĆE</b> <i>RADIOGRAPHIC REPORT</i>		BROJ <i>Report No.</i> <b>RT-01/21</b>																
		STRANICA <i>Page</i> <b>1/1</b>																
NARUČITELJ <i>Purchaser</i> -		Narudžba <i>Contract</i> -																
OBJEKT <i>Component</i>		IZVOR ZRAČENJA <i>Source of radiation</i> <b>RÖNTGEN ANDREX 225</b>																
UZORAK ZAVARENOSG SPOJA ZA ATEST POSTUPKA ZAVARIVANJA <i>The sample weld metal for approval of welding procedure.</i> <b>P1, Položaj PF</b> pWPS br.: MAG 12mm/1.0425		FILMI FOLLIJA <i>Film and foil</i> <b>AGFA D5, Pb</b>																
Proizvodni broj <i>Production number</i> -		Ekspozicija <i>Exposure</i> <b>210 kV; 4,0 mA; 2'00''</b>																
CRTEŽ <i>Drawing No.</i> -	TVOR. BROJ: <i>Factori No.</i> -	FF-UDALJENOST <i>FF-Distance No.</i> <b>650</b>	ZACRNJENJE <i>Blackening</i> <b>2,80</b>															
POZICIJA <i>Position</i> <b>PF</b>	OPSEG ISPIT. VOLUMEN <i>Volume testing</i> <b>100%</b>	INDIKATOR <i>Indicator</i> <b>10FE EN</b>	KVALITETA SLIKE <i>Image quality</i> <b>W=15</b>															
MATERIJAL <i>Material</i>	DEBLJINA <i>Thickness</i> <b>t= 12,0 mm</b>	PROPIS/LISTA ZA RI BR. <i>RATE/REGULATION NO.</i> <b>EN ISO 10675-1: 2016.</b>																
ZAVARIVAČ <i>Welder</i> -	OBLIK ŽLJEBI <i>Form coultise</i>	POSTUPAK PREMA <i>Proceedings by</i> <b>EN ISO 15614-1:2017+A1:2019 PED 2014/68/EU EN ISO 17636-1:2013.</b>																
CIJEV BROJ <i>No.</i>	OZNAKA FILMA <i>Mark on film</i>	NALAZ ISPITIVANJA <i>Report of examination</i>										OCJENA <i>Evaluation</i>						
		KLASIFIKACIJA NEPRAVILNOSTI PREMA EN ISO 6520-1 <i>Classification of irregularities by EN ISO 6520-1</i>												PRIHVATLJIVO <i>Acceptable</i>	NEPRIHVATLJIVO <i>Not acceptable</i>			
P1		2011	2012	2016	301	3013	4012	1011	102	5011	5012	504	5J5			304I	2024	
		Aa	Aa	Ab	Ba	Ba	D	D	Ea	Eb	F	F	-	-	H	K	X	
UZORAK ZAVARENOSG SPOJA ZA ATEST POSTUPKA ZAVARIVANJA. <i>Welded joint sample for welding procedure certificate.</i>																		
REZULTAT RADIOGRAFSKOG ISPITIVANJA <i>Radiographic test result</i>		PRIHVATLJIVO prema EN ISO 10675-1: 2016. ACCEPTABLE ACCORDING TO EN ISO 10675-1: 2016.																

Slika 4.4 Radiografska snimka referentnog uzorka bez radioničkog temeljnog premaza i uzorka debljine suhog filma u skladu sa preporučenom vrijednosti

Tablica 4.8 Radiografska analiza uzoraka P1, P2 i P3

Broj uzorka	Prihvatljivo	Ne prihvatljivo	Tip greške
P1	X		-
P2		X	Neprovar korijena
P3		X	Neprovar korijena

#### 4.8 Mehanička ispitivanja gdje je zaštitni temeljni premaz utjecao na kvalitetu zavara

Kako bi se utvrdilo postoji li negativan utjecaj zaštitnog premaza na kvalitetu zavara provedena su tri testa mehaničkog ispitivanja svojstava zavarenih spojeva:

- 1.) ispitivanje strukturnih svojstava (makrografija)
- 2.) pokus savijanjem
- 3.) ispitivanje udarne radnje loma

Kako bi ispitivanja bilo moguće provesti potrebno je izraditi ispitne epruvete zadanih dimenzija. Iz svakog zavarenog spoja pripremljeno je 10 ispitnih epruveta, od toga 3 epruvete za žilavost (Charpy V), 4 epruvete za savijanje, te 3 uzorka za ispitivanje strukturnih svojstava.

##### 4.8.1 Ispitivanje strukturnih svojstava(makrografije)

Ispitivanje strukturnih svojstava, odnosno makrografsko ispitivanje materijala izvodi se pod povećanjem od 5 do 20 puta, a u svrhu otkrivanja šupljina, plinskih mjehurića, nemetalnih uključaka i slično.

Provedena testiranja na svim ispitnim uzrocima pokazala su da nema negativnih primjesa niti prisutnih grešaka na ispitnim uzrocima te da je makrostruktura ispitnih uzoraka koji su šticeeni zaštitnim temeljnim premazom jednaka strukturi referentnih ispitnih uzoraka, tj. uzoraka koji nisu zavarivani preko sloja zaštitnog premaza.

Ispitivanje makrostrukture, tvrdoće i mikrostrukture uzorka za atest postupka zavarivanja (uzorci oznake P1, P2 i P3) – postupak zavarivanja MAG (135-D i 135-P), položaj zavarivanja PF, zavarivač: Damir Gačić, žig zavarivača: Z12

osnovni materijali: P265GH (W. Nr. 1.0425), t=12 mm

dodatni materijal: MG-2/Oerlikon,  $\phi$  1,0 mm,  $\phi$  1,2 mm

pWPS br.: WPS-PE-131

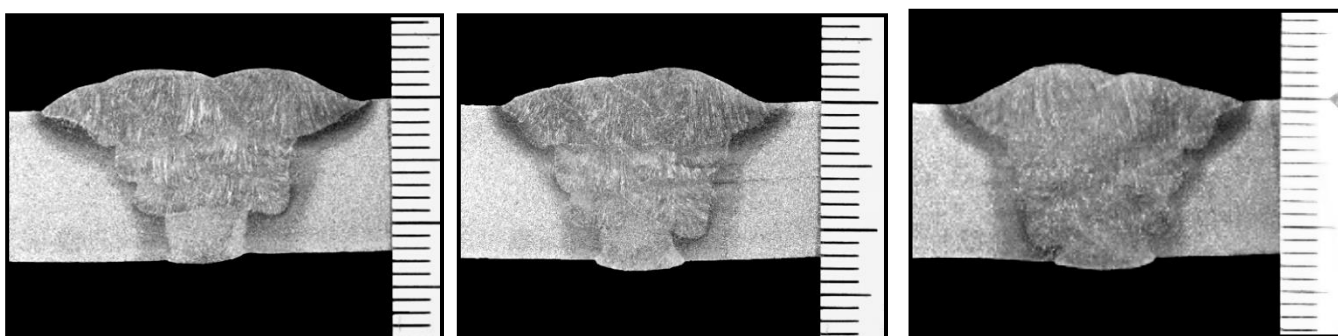
Norme: EN ISO 15614-1: 2017. + A1: 2019.; PED 2014/68/EU;

EN ISO 17639: 2013.; EN ISO 9015-1: 2011.; EN 10247: 2017.;  
EN ISO 643: 2020.

Na dostavljenim uzorcima P1, P2 i P3 načinjeno je ispitivanje makrostrukture zavarenog spoja.

Uzorcima su bez anomalija prema EN ISO 6520-1: 2007.

Na slici 4.5 a), 4.5 b) i 4.5 c) je prikaz makrostrukture zavarenog spoja.



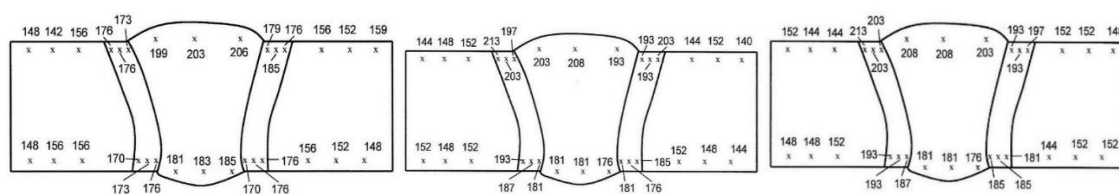
a)

b)

c)

Slika 4.5 Ispitivanje strukturnih svojstava (makrostrukture) referentnih ispitnih uzoraka P1, P2 i P3

Na istim uzorcima izmjerena je i tvrdoća HV 10, što je prikazano na slici 4.6 a), 4.6 b) i 4.6 c). Tvrdoća je u dozvoljenim granicama te nema značajnijih odstupanja.



a)

b)

c)

Slika 4.10 Ispitivanje tvrdoće HV10 na uzorcima a) P1, b) P2 i c) P3

## 4.8.2 Pokus savijanjem

Pokus savijanjem izveden je prema normi EN ISO 5173, odnosno ispitivanje savojne čvrstoće provedeno je opterećenjem u tri točke prema strožem kriteriju savijanja na bok. Žilav materijal poput čelika podvrgava se ovom testu kako bi se odredila naprezanja kod kojih će



nastati trajne deformacije, tj. u svrhu utvrđivanja sposobnosti deformiranja ispitnog materijala [30].

Pokus savijanjem u ovom slučaju je pokazao kako ima negativnog utjecaja zaštitnog temeljnog premaza na vrijednost naprezanja, odnosno pojavu deformacija kod ispitnih uzoraka. Slike pokazuju različitu kvalitetu lica i korijena zavara ispitnih uzoraka podvrgnutih savijanju u tri točke. Budući da su površine ispitnih uzoraka sa nanešenim slojem zaštitnog premaza različitog izgleda u odnosu na površine referentnih uzoraka (došlo je do vidljivih pukotina na uzorku P2 s debljinom premaza od 15  $\mu\text{m}$ , zaključuje se kako je zaštitni premaz u ovom slučaju imao negativan utjecaj na zavareni spoj. Označavanje ispitnih uzoraka za pokus savijanja prikazano je u tablici 4.9. Ispitni uzorci nakon pokusa savijanja zavara na bok prikazani su na slikama 4.11 a) i 4.11 c) te uzorak savijen na korijen prikazan je na slici 4.11 b)

*Tablica 4.9 Označavanje ispitnih uzoraka za pokus savijanjem*

	Oznaka ispitnog uzorka		
	P1(Savijanje na bok)	P2 (Savijanje na korijen)	P3(Savijanje na bok)
Zavarena ploča bez zaštitnog premaza	1-1	1-2	1-3
Zavarena ploča sa 15 $\mu\text{m}$ zaštitnog premaza	2-1	2-2	2-3
Zavarena ploča sa 30 $\mu\text{m}$ zaštitnog premaza	3-1	3-2	3-3



*a) Uzorak P1*

*b) Uzorak P2*

*c) Uzorak P3*

*Slika 4.11 Ispitni uzorci nakon pokusa savijanja na bok korijena zavara: a) Uzorak P1, b) Uzorak P2, c) Uzorak P3*

### 4.8.3 Ispitivanje udarne radnje loma

Ispitivanje udarne radnje loma provedeno je po Charpyu prema normi EN ISO 9016 pri temperaturi  $-20^{\circ}\text{C}$ . Ovakva vrsta ispitivanja služi za ispitivanje otpornosti prema krhkom lomu. Karakteristike postupka dane su parametrima kao što su brzina udarnog bata od 5 do 5,5 m/s te ispitni uzorak sa U ili V zarezom ( u ovom slučaju korišten je V), a utrošena energija potrebna za lom ispitnog uzorka prikazuje vrijednost žilavosti materijala [30].

Ispitivanje udarne radnje loma pokazalo je da su vrijednosti utrošene energije za lom ispitnih uzoraka u sva tri slučaja zadovoljavajuće, odnosno veće su od zahtijevane granične vrijednosti za testirani materijal, koja u ovom slučaju iznosi 27 J. Odstupanja kod srednjih vrijednosti mjerenja udarne radnje loma za referentne uzorke i uzorke štíčene slojem zaštitnog temeljnog premaza nisu velike pa se da zaključiti kako navedeni sloj nema negativan utjecaj na zavareni spoj, tj. ne utječena promjenu njegovih mehaničkih svojstava u negativnom smjeru. Vrijednosti udarne radnje loma kod uzoraka P1 prikazane su u tablici 4.10, kod uzorka P2 prikazane su tablici 4.11 i kod uzorka P3 prikazane su u tablici 4.12.

Tablica 4.10 Vrijednosti udarne radnje loma kod uzoraka bez premaza (P1)

Položaj žljeba	Dimenzije [mm x mm]	Temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Radnja loma [J]			$\Sigma n/n$ [J]
			1-1	1-2	1-3	
Čisti zavar	10 x 10	-20	134	116	114	121,3

Tablica 4.11 Vrijednosti udarne radnje loma kod uzoraka s premazom (P2)

Položaj žljeba	Dimenzije [mm x mm]	Temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Radnja loma [J]			$\Sigma n/n$ [J]
			2-1	2-2	2-3	
Čisti zavar	10 x 10	-20	121	90	108	106,3

Tablica 4.12 Vrijednosti udarne radnje loma kod uzoraka s premazom (P3)

Položaj žljeba	Dimenzije [mm x mm]	Temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Radnja loma [J]			$\Sigma n/n$ [J]
			3-1	3-2	3-3	
Čisti zavar	10 x 10	20	103	96	102	100,3

## 4.9 Temeljni radionički premaz 2

Kako rezultati zavarenih spojeva nisu bili zadovoljavajući za temeljni radionički premaz 1 bilo je potrebno izraditi nove uzorke s primjenom temeljnog premaza druge recepture (temeljni radionički premaz 2). Sva ispitivanja su provedena kao i za temeljni radionički premaz 1. Priprema uzoraka i tehnologija nanošenja su isti, te je osnovni materijal iz iste grupe materijala sa sličnim mehaničkim svojstvima, pa su i ispitivanja provedena prema normi EN ISO 15614-1 čija je primarna svrha definiranje uvjeta kod atestiranja postupaka zavarivanja.

## 4.10 Tehnički podaci o materijalu

Ispitni uzorci izrađeni su od opće konstrukcijskog čelika S235JRG.

Opći konstrukcijski čelici zauzimaju prvo mjesto u ukupnoj masi svih proizvedenih čelika, njihov je udjel 65 do 70% te mase. Karakteristike čelika iz te skupine su slijedeće: [30]

- općim konstrukcijskim čelicima ne jamči se ukupni kemijski sastav, nego se samo sadržaj nekih legirajućih elemenata, primjesa i nečistoća ograničavaju "prema gore" (kemijski sastav materijala prikazan je u tablici 4.13)

- jamče im se neka mehanička svojstva ( $R_m$ ,  $R_{p0,2}$ ,  $A_5$  i  $KV$ ) (ovo posljednje pri nekoj zadanoj temperaturi), jamčena mehanička svojstva materijala prikazana su u tablici 4.14

- čelici se prema spomenutim mehaničkim svojstvima dijele u sedam grupa

- čelici iz grupe "37" isporučuju se, prema želji i propisima korisnika čelika, u nesmirenom, smirenom ili posebno smirenom stanju, a čelici ove grupe i svih ostalih grupa još i u stanju ohlađenom na zraku sa završne temperature tople obrade deformiranjem ("prirodno stanje") ili u normaliziranom stanju

- samo se posebno smirenim i normaliziranim čelicima jamči zadan udarna radnja loma 27 J pri temperaturi ispitivanja  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , dok se svim ostalim čelicima jamči takva radnja ili pri  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  ili pri  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (osim čelika St 33, St 50-2, St 60-2, St 70-2)

Tablica 4.13 Kemijski sastav materijala [30]

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%N	%Al
$\leq 0,17$	$\leq 0,35$	$\leq 1,40$	$\leq 0,035$	$\leq 0,035$	$\leq 0,012$	-

Tablica 4.14 Jamčena mehanička svojstva materijala [30]

$R_m$	$R_{p0,2}$	$A_5$	Rad loma KV	
MPa (3...100 mm)	MPa min. (16...40 mm)	% min. (3...40 mm)	J min.	Pri θ, °C
340...470	225	26	27	+20

#### 4.11 Zavarivanje uzoraka

Ispitni uzorci zavareni su MAG postupkom zavarivanja, tj. elektrolučnim postupkom zavarivanja taljivom žicom u zaštiti aktivnog plina, CO<sub>2</sub> i plinskih mješavina (npr. 82% Ar i 18% CO<sub>2</sub>). Kod MAG postupka zavarivanja uspostavlja se električni luk kratkim spojem između taljive, ne prekinute, elektrode u obliku žice i radnog komada, odnosno priključaka na polove istosmjerne električne struje. Nakon ostvarenog električnog luka, dodaje se žica za zavarivanje i formira se zavareni spoj [30].

Parametri MAG postupka zavarivanja dani su u tablici 4.15.

Tablica 4.15 Parametri MAG postupka zavarivanja

Postupak	135
Položaj zavarivanja	PA, PB, PF
Dodatni materijal	EN ISO 14341-A: G 3 Si 1
	EZ-SG2
	Elektroda Zagreb
Promjer	2 mm
Struja	130-280 A
Napon	21,0-26,0 V
Brzina zavarivanja	18,0-40,0 cm/min
Unos topline	0,61-1,98 kJ/mm

#### 4.12 Mehanička ispitivanja gdje zaštitni premaz nije utjecao na zavar

Kako bi se utvrdilo postoji li negativan utjecaj zaštitnog premaza na kvalitetu zavara provedena su tri testa mehaničkog ispitivanja svojstava zavarenih sklopova:

- 1.) ispitivanje strukturnih svojstava (makrografija)
- 2.) pokus savijanjem
- 3.) ispitivanje udarne radnje loma

Kako bi ispitivanja bilo moguće provesti potrebno je izraditi ispitne epruvete zadanih dimenzija. Iz svakog zavarenog sklopa pripremljeno je 8 ispitnih epruveta, od toga 3 epruvete za žilavost (Charpy V), 2 epruvete za savijanje te 3 uzorka za ispitivanje strukturnih svojstava.

#### 4.13 Označavanje ispitnih uzoraka

Označavanje ispitnih uzoraka za ispitivanje strukturnih svojstava i udarne radnje loma prikazano je u tablici 4.16.

*Tablica 4.16 Označavanje ispitnih uzoraka za ispitivanje strukturnih svojstava i udarne radnje loma*

	Oznaka ispitnog uzorka		
	Zavarena ploča bez zaštitnog premaza	1-1	1-2
Zavarena ploča sa 15 µm zaštitnog premaza	2-1	2-2	2-3
Zavarena ploča sa 30 µm zaštitnog premaza	3-1	3-2	3-3

#### 4.14 Ispitni uzorci za pokus savijanjem

Označavanje ispitnih uzoraka za pokus savijanja prikazano je u tablici 4.17.

*Tablica 4.16 Označavanje ispitnih uzoraka za pokus savijanjem*

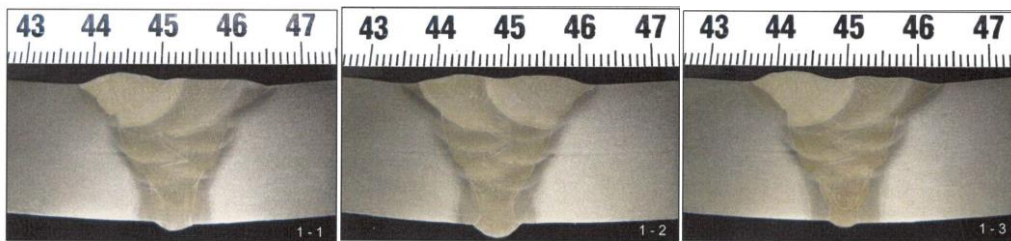
	Oznaka ispitnog uzorka	
	Lice zavara	Korijen zavara
Zavarena ploča bez zaštitnog premaza	1-1	1-2
Zavarena ploča sa 15 µm zaštitnog premaza	2-1	2-2
Zavarena ploča sa 30 µm zaštitnog premaza	3-1	3-2

#### 4.15 Ispitivanje strukturnih svojstava (makrografija)

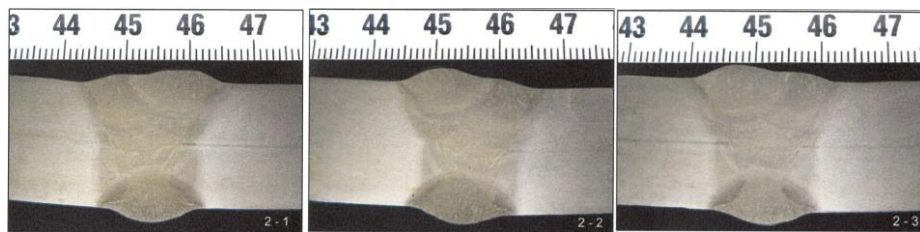
Ispitivanje strukturnih svojstava, odnosno makrografsko ispitivanje materijala izvodi se pod povećanjem od 5 do 20 puta, a u svrhu otkrivanja šupljina, plinskih mjehurića, nemetalnih uključaka i slično.

Provedena testiranja na svim ispitnim uzorcima pokazala su da nema negativnih primjesa niti prisutnih grešaka na ispitnim uzorcima te da je makrostruktura ispitnih uzoraka koji su

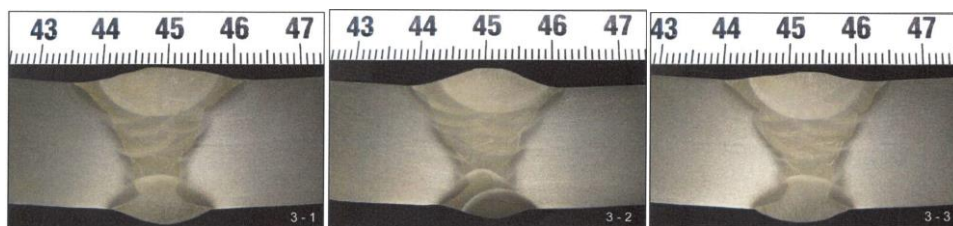
štićeni zaštitnim temeljnim premazom jednaka strukturi referentnih ispitnih uzoraka, tj. uzoraka koji nisu zavarivani preko sloja zaštitnog premaza. Ispitivanje strukturnih svojstava (makrografije) referentnih ispitnih uzoraka prikazano je na slici 4.12. Ispitivanje strukturnih svojstava (makrografije) ispitnih uzoraka preporučene vrijednosti debljine nanešenog suhog filma zaštitnog premaza prikazano je na slici 4.13. Ispitivanje strukturnih svojstava (makrografije) ispitnih uzoraka sa nanešenim slojem suhog filma debljine duplo veće prikazano je na slici 4.14.



*Slika 4.12 Ispitivanje strukturnih svojstava (makrografije) referentnih ispitnih uzoraka*



*Slika 4.13 Ispitivanje strukturnih svojstava (makrografije) ispitnih uzoraka preporučene vrijednosti debljine nanešenog suhog filma zaštitnog premaza*

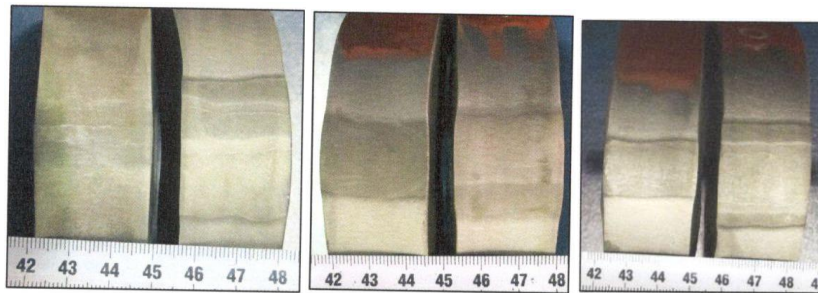


*Slika 4.14 Ispitivanje strukturnih svojstava (makrografije) ispitnih uzoraka sa nanešenim slojem suhog filma debljine duplo veće*

#### 4.16 Pokus savijanjem

Pokus savijanjem, odnosno ispitivanje savojne čvrstoće provedeno je opterećenjem u tri točke. Žilav materijal poput čelika podvrgava se ovom testu kako bi se odredila napreznja kod kojih će nastati trajne deformacije, tj. u svrhu utvrđivanja sposobnosti deformiranja ispitnog materijala [30].

Pokus savijanjem u ovom slučaju je pokazao da nema negativnog utjecaja zaštitnog temeljnog premaza na vrijednost napreznja, odnosno pojavu deformacija kod ispitnih uzoraka. Slike pokazuju jednaku kvalitetu lica i korijena zavora ispitnih uzoraka podvrgnutih savijanju u tri točke. Budući da su površine ispitnih uzoraka sa nanešenim slojem zaštitnog premaza jednakog izgleda kao i površine referentnih uzoraka zaključuje se da zaštitni premaz nema negativan utjecaj. Ispitni uzorci nakon pokusa savijanja lica i korijena zavora prikazani su na slici 4.15.



*Slika 4.15 Ispitni uzorci nakon pokusa savijanja lica i korijena zavora*

#### 4.17 Ispitivanje udarne radnje loma

Ispitivanje udarne radnje loma provedeno je po Charpyu. Takva vrsta ispitivanja služi za ispitivanje otpornosti prema krhkom lomu. Karakteristike postupka dane su parametrima kao što su brzina udarnog bata od 5 do 5,5 m/s te ispitni uzorak sa U ili V zarezom ( u ovom slučaju korišten je V), a utrošena energija potrebna za lom ispitnog uzorka prikazuje vrijednost žilavosti materijala [30]. Ispitivanje udarne radnje loma pokazalo je da su vrijednosti utrošene energije za lom ispitnih uzoraka u sva tri slučaja zadovoljavajuće, odnosno veće su od zahtijevane granične vrijednosti za testirani materijal, koja u ovom slučaju iznosi 27 J. Odstupanja kod srednjih vrijednosti mjerenja udarne radnje loma za referentne uzorke i uzorke štícene slojem zaštitnog temeljnog premaza nisu velike pa se da zaključiti kako navedeni sloj nema negativan utjecaj na zavareni spoj, tj. ne utječna promjenu njegovih mehaničkih svojstava u negativnom

smjeru. Vrijednosti udarne radnje loma referentnih ispitnih uzoraka prikazane su u tablici 4.18. Vrijednosti udarne radnje loma uzoraka sa debljinom nanešenog suhog filma preporučene vrijednosti prikazane su u tablici 4.19. Vrijednosti udarne radnje loma uzoraka sa nanešenom debljinom suhog filma duplo veće vrijednosti od preporučene prikazane su u tablici 4.20.

*Tablica 4.18. Vrijednosti udarne radnje loma referentnih ispitnih uzoraka*

Položaj žljeba	Dimenzije [mm x mm]	Temperatura [°C]	Radnja loma [J]			Σn/n [J]
			1-1	1-2	1-3	
Čisti zavar	10 x 10	20	130	120	135	128,3

*Tablica 4.19 Vrijednosti udarne radnje loma uzoraka sa debljinom nanešenog suhog filma preporučene vrijednosti*

Položaj žljeba	Dimenzije [mm x mm]	Temperatura [°C]	Radnja loma [J]			Σn/n [J]
			2-1	2-2	2-3	
Čisti zavar	10 x 10	20	165	135	150	150

*Tablica 4.20 Vrijednosti udarne radnje loma uzoraka sa nanešenom debljinom suhog filma duplo veće vrijednosti od preporučene*

Položaj žljeba	Dimenzije [mm x mm]	Temperatura [°C]	Radnja loma [J]			Σn/n [J]
			3-1	3-2	3-3	
Čisti zavar	10 x 10	20	130	125	145	133,3

#### **4.18 Analiza rezultata ispitivanja**

Nakon obavljenih laboratorijskih ispitivanja mehaničkih svojstava ispitnih uzoraka te utvrđivanja postoji li utjecaj zaštitnog premaza na kvalitetu zavarenog spoja, ustanovljeno je da isti nema nikakav negativni učinak. Ispitivanje strukturnih svojstava pokazalo je da u zoni zavora nema nikakvih vidljivih grešaka niti odstupanja u makrografskim snimkama ispitnih uzoraka koji su štice, od referentnog uzorka. Rezultati pokusa ispitivanja ocjenjeni su kao dobri, što znači da niti na licu zavora niti u korijenu nakon podvrgavanja testu nije došlo do vidljivih mehaničkih oštećenja. Ispitivanjem udarne radnje loma vidljivo je da zaštitni premaz nije negativno utjecao na vrijednost radnje loma, odnosno da rezultati mjerenja nisu bili ispod dozvoljene vrijednosti niti je došlo do prevelikih odstupanja u vrijednostima između dvaju ispitnih uzoraka koji su zaštićeni i referentnog uzorka.



## 4.19 Radiografska kontrola zavarenih sklopova

Ispitni uzorci podvrgnuti su kontroli bez razaranja, koju moraju zadovoljiti prije nego bi se prešlo na ispitivanje mehaničkih svojstava zavarenog spoja. Kontrola bez razaranja neizostavni je dio proizvodnog procesa, a potreba za povećanjem sigurnosti u proizvodnji i sigurnosti gotovih proizvoda povećala je njenu važnost. Osim primjene u cilju povećanja sigurnosti, važna je uloga kontrole i u ocjenjivanju kvalitete i pouzdanosti proizvoda [29, 30].

Radiografsko snimanje sa svojom širokom primjenom u zrakoplovnoj industriji, brodogradnji, ispitivanju posuda pod tlakom itd., jedno je od najvažnijih tehnologija kontrole bez razaranja [30].

Nakon zavarivanja ispitnih uzoraka napravljena je radiografija zavarenih sklopova u skladu sa normom BS EN ISO 17636-1, sa osjetljivošću klase B. Tumačenje nepravilnosti provodi se u skladu s BS EN ISO 6520-1. Iz priloženih rezultata radiografske kontrole vidljivo je da su sva tri ispitna uzorka zadovoljila postavljene zahtjeve. Radiografska snimka referentnog uzorka i uzorka debljine suhog filma u skladu sa preporučenom vrijednosti prikazana je na slici 4.16 a), dok je radiografska snimka uzorka debljine suhog filma duplo veće vrijednosti od preporučene prikazana je na slici 4.16 b). Rezultati radiografske analize za sva tri uzorka prikazani su u tablici 4.21, gdje je vidljivo kako temeljni premaz nije imao utjecaja na rezultate radiografske analize.

OBJEKT		SUČEONO ZAVARENI SPOJ LIMA				FILM I FOLJA		AGFA D5, P9										
Objekt		BUTT WELDING PLATE				Film and foil												
PROIZVODNI BROJ	ESPOZICIJIA		180 kV, 4,0 mA, 5,5'															
Production number	Exposure																	
CRTEŽ	TVOR. BROJ:	FF-UDALJENOST	700 mm	ZACKRSNJE	min. 2,3													
Drawing No.	Factor No.	FF-Distance		Blackening														
POZICIA	OPSEG ISPITJ:	100%	INDIKATOR	10 FE EN	KVALITETA SLEKE	W= 14												
Position	Exposure setting		Indicator		Image quality													
MATERIJAL	DEBLJINA:	20 mm	PROPSI LISTA ZA RI BE:	BS EN ISO 5817, B														
Material	Thickness		Reference list No.															
ZAVARIVAČ	OBLIK ZLJEBIA:	V	POSTUPAK PREMA:	BS EN ISO 17636-1														
Welder	Groove shape		Proceeding by															
NALAZ ISPITIVANJA																		
Report of examination																		
BROJ	OZNAKA FILMA	KLASIFIKACIJA NEPRAVILNOSTI PREMA BS EN ISO 6520-1								OCJENA								
		Classification of irregularities by BS EN ISO 6520-1																
		201	2011	2016	301	3011	4011	4012	101	102	5011	5013	504	513	504	2024	PRIHVATLJIVO	NEPRIHVATLJIVO
		Aa	Aa	Ab	Ba	Ba	D	D	Ea	Eb	F	F	-	-	H	K		
1	0			X							X						X	
2	15			X													X	
SKICA																		
Sketch																		
REZULTAT RADIOGRAFSKOG ISPITIVANJA RADIOGRAPHIC TEST RESULT																		
PRIHVATLJIVO prema BS EN ISO 5817, kl. B. ACCEPTABLE ACCORDING TO BS EN ISO 5817, cl. B.																		

OBJEKT		SUČEONO ZAVARENI SPOJ LIMA				FILM I FOLJA		AGFA D5, P9										
Objekt		BUTT WELDING PLATE				Film and foil												
PROIZVODNI BROJ	ESPOZICIJIA		180 kV, 4,0 mA, 5,5'															
Production number	Exposure																	
CRTEŽ	TVOR. BROJ:	FF-UDALJENOST	700 mm	ZACKRSNJE	min. 2,3													
Drawing No.	Factor No.	FF-Distance		Blackening														
POZICIA	OPSEG ISPITJ:	100%	INDIKATOR	10 FE EN	KVALITETA SLEKE	W= 14												
Position	Exposure setting		Indicator		Image quality													
MATERIJAL	DEBLJINA:	20 mm	PROPSI LISTA ZA RI BE:	BS EN ISO 5817, B														
Material	Thickness		Reference list No.															
ZAVARIVAČ	OBLIK ZLJEBIA:	V	POSTUPAK PREMA:	BS EN ISO 17636-1														
Welder	Groove shape		Proceeding by															
NALAZ ISPITIVANJA																		
Report of examination																		
BROJ	OZNAKA FILMA	KLASIFIKACIJA NEPRAVILNOSTI PREMA EN ISO 6520-1								OCJENA								
		Classification of irregularities by EN ISO 6520-1																
		201	2014	2016	301	3011	4011	4013	101	102	5011	5013	504	513	504	2024	PRIHVATLJIVO	NEPRIHVATLJIVO
		Aa	Aa	Ab	Ba	Ba	D	D	Ea	Eb	F	F	-	-	H	K		
1	30-1			X													X	
SKICA																		
Sketch																		
REZULTAT RADIOGRAFSKOG ISPITIVANJA RADIOGRAPHIC TEST RESULT																		
PRIHVATLJIVO prema BS EN ISO 5817, kl. B. ACCEPTABLE ACCORDING TO BS EN ISO 5817, cl. B.																		

a)

b)

Slika 4.16 Radiografska snimka a) referentnog uzorka, b) uzorka debljine suhog filma u skladu sa preporučenom vrijednosti

*Tablica 4.21 Radiografska analiza uzoraka P1, P2 i P3*

Broj uzorka	Prihvatljivo	Ne prihvatljivo	Tip greške
P1	X		-
P2	X		-
P3	X		-

## 5 ZAKLJUČAK

Propadanje konstrukcijskih materijala uzrokovanih različitim vrstama i mehanizmima nastajanja korozijskih procesa te povećanje financijskih troškova u sprječavanju istih i sanaciji nastale štete, razlog su pristupanju nekoj od metoda površinske zaštite materijala. Velik je broj raspoloživih metoda zaštite konstrukcijskih materijala koje se primjenjuju u tijeku eksploatacije materijala, odnosno konstrukcije, ali isto tako jednako je važna uloga primjene zaštite materijala prije nego se isti pusti u proizvodni proces.

Zaštita materijala prije njegova puštanja u proizvodni proces od velike je važnosti zbog negativnih atmosferskih utjecaja kojima su materijali podvrgnuti prije nego se uklope u gotovu konstrukciju. Takvi negativni utjecaji mogu izazvati veliku štetu, prvo zbog propadanja materijala i narušavanja njegovih zahtijevanih mehaničkih svojstava, a zatim mogu prouzročiti velike troškove u saniranju nastale štete, ukoliko ona nije uznapredovala do te granice gdje materijal postaje tehnološki neiskoristiv.

Jedna od metoda površinske zaštite konstrukcijskih materijala u fazi prije ulaska u proizvodni proces je nanošenje privremene zaštite u vidu temeljnih zaštitnih premaza, poznatijih kao radioničkih temeljnih premaza, tj. shopprimera. Velika prednost ovih premaza je što nakon nanošenja na štice materijal, a prilikom podvrgavanja materijalatehnološkim operacijama proizvodnog procesa, u ovom slučaju zavarivanja, nije potrebno njihovo uklanjanje sa površine jer njihovim miješanjem sa plinovima pri postupku zavarivanja ne dolazi do nastanka štetnih utjecaja, odnosno ne dolazi do smanjivanja mehaničkih svojstava konstrukcijskih materijala.

U radu su provedena mehanička ispitivanja kako bi se potvrdilo da uistinu nema nikakvog negativnog utjecaja na mehanička svojstva zavarenog spoja koji je nastao zavarivanjem dviju ploča zaštićenih temeljnim zaštitnim premazom. Nakon pozitivno ocjenjenih nalaza kontrole bez razaranja, odnosno provedene radiografije, ispitni uzorci su podvrgnuti ispitivanju strukturnih svojstava (makrografije), pokusu savijanja te ispitivanju udarne radnje loma. Kako su sva navedena mehanička ispitivanja potvrdila da nema negativnog utjecaja pri izgaranju zaštitnog premaza i njegovog miješanja za zaštitnim plinovima korištenih u postupku zavarivanja, zaključuje se da je takav temeljni zaštitni premaz siguran za korištenje u privremenoj zaštiti konstrukcijskog materijala.

## 6 LITERATURA

- [1] Kralj, Slobodan; Kožuh, Zoran; Andrić, Šimun: *Zavarivački i srodni postupci*, Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja i Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [2] Esih, Ivan; Dugi, Zvonimir: *Tehnologija zaštite od korozije*, Školska knjiga, Zagreb, 1990.
- [3] Esih, Ivan: *Osnove površinske zaštite*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2007.
- [4] *Površinska zaštita čeličnih konstrukcija*, SN 555 011, Službena norma Švicarskog udruženja za normizaciju (SNV), 1990.
- [5] *Hempel's shopprimers*, Hempel Umag, Umag, 1996.
- [6] Juraga, Ivan; Stojanović, Ivan; Šimunović, Vinko; Nikolić, Miljenko: *Radionički temeljni premazi i njihov utjecaj na zavarivanje – osvrt na brodogradnju*, Zbornik međunarodnog savjetovanja "Primjena postupaka zavarivanja i zavarivanju srodnih tehnika u izradi konstrukcija i proizvoda", 107-115, Slavonski Brod, 2007.
- [7] Malfanti, Roberto: *Coating Inspection Procedures During Shop-Priming Operations, Inspect This!*, The Newsletter for Nace inspectors and students, 10 (7), 2005.
- [8] Juraga, Ivan; Alar, Vesna; Stojanović, Ivan: *Korozija i zaštita premazima*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [9] Vesna Alar: *KEMIJSKA POSTOJANOST METALA*, Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015
- [10] Antonio Pappo: *Elektrokemijska svojstva nehrđajućih čelika*, Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2018
- [11] <https://mycourses.aalto.fi/mod/book/view.php?id=669801&chapterid=4960> 10.04.2021.
- [12] Koričan, Marija: *L-triptofan kao inhibitor korozije ugljičnog čelika u emulzijama za hlađenje*, Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016
- [13] <https://hr.routestofinance.com/1630-types-of-corrosion-2340005-182318> 16.04.2021.
- [14] <https://provenproductivity.com/fr/category/corrosion-fr/> 07.05.2021.
- [15] <https://docplayer.gr/44580255-Izbor-materijala-3-3-izbor-materijala-s-obzirom-na-otpornost-koroziji.html> 07.05.2021.
- [16] Poljak, Ivan: *Utjecaj mehaničke obrade Cr-Ni čelika na korozijsku otpornost*, Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2021

- [17] Vladimir Čabraja: *Diplomski rad*, Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2021
- [18] prof.dr.sc. Ivan Juraga dr.sc. Vesna Alar Vinko Šimunović, dipl.ing. Ivan Stojanović, dipl.ing., *KOROZIJA I METODE ZAŠTITE OD KOROZIJE*, Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2021
- [19]<https://docplayer.rs/195840883-Sveu%C4%8Dili%C5%A1te-u-zagrebu-fakultet-strojarstva-i-brodogradnje-zavr%C5%A1ni-rad-matija-ba%C5%A1nec-zagreb-2016.html>  
07.05.2021.
- [20] Horvat,Samardzic,Kondic:*Napetosna korozija*.ISSN 1864-6168.
- [21] Juraga, Ivan; Linardon, Lorena; Šimunović, Vinko; Stojanović, Ivan: *Zaštita od korozije u brodogradnji*, Zbornik međunarodnog savjetovanja "Zavarivanje u pomorstvu", 183-198, Hvar, 2004.
- [22] Rački-Weihnacht Nada: *Boje i lakovi – jučer danas sutra*, Chromos boje i lakovi, Zagreb, 2004.
- [23] [https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/kbr\\_met.html](https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/kbr_met.html) 23.05.2021.
- [24] Horvat, Marko; Kondić, Veljko; Brezovački, Dražen: *Opravdanost primjene MAG forceArc postupka zavarivanja u izradi čeličnih konstrukcija*, Tehnički glasnik, 8 (3), 288-294, 2014.
- [25] Tampus, Peter: *Non-Destructive Evaluation as a Foundation of Structural Integrity Assessment*, HDKBR INFO Magazin, 4 (2), 3-8, 2014.
- [26] Krešák, J.; Kropuch, S.; Peterka, P.: *The anchors of steel wire ropes, testing methods and their results*,Metalurgija, 51(4), 485-488, 2012.
- [27] Vitez, Ivan: *Ispitivanje mehaničkih svojstava metalnih materijala*, Strojarski fakultet u Slavanskom Brodu, Slavonski Brod, 2006.
- [28] Dang, Changying;Gao, Jianmin;Wang, Zhao;Chen, Fumin;Xiao, Yulin;*Multi-step radiographic image enhancement conforming to weld defect segmentation*, IET image processing, 9 (11), 943-950, 2015.
- [29] Gojić, Mirko: *Površinska obradba materijala*, Metalurški fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2010
- [30] Novosel, Mladen; Krumes, Dragomir; Kladarić, Ivica: *Željezni materijali, Konstrukcijski čelici (II. dopunjeno izdanje)*, Strojarski fakultet u Slavanskom Brodu, Slavonski Brod, 2013.