

Analiza trošenja i korozije visokotlačnih brtvi

Petrlić, Leonard

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:806391>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-03**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Leonard Petrić

Zagreb, 2024. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Darko Landek, dipl. ing.

Student:

Leonard Petrić

Zagreb, 2024. godina.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svome mentoru prof. dr. sc. Darku Landeku, na uloženom vremenu, pomoći i savjetima tijekom izrade ovoga rada.

Također se zahvaljujem i firmi STSI - Integrirani tehnički servisi d.o.o. koja je omogućila materijal potreban za provedbu eksperimentalnog dijela.

Hvala i asistentu Josipu Cerovečkom te docentu Marinu Kurteli na pomoći s eksperimentalnim dijelom.

Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji na podršci tijekom studiranja.

Leonard Petrić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:

Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment, mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 24 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Leonard Petrić** JMBAG: 0035227915

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza trošenja i korozije visokotlačnih brtvi**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of wear and corrosion of high-pressure seals**

Opis zadatka:

U cjevovodima za dobavu sirove nafte i plina primjenjuju se brtve izrađene od kombinacije pocinčanog ugljičnog i nehrđajućeg čelika koje mogu izdržati protoke medija visokih tlakova i temperatura. U radu treba opisati radne uvjete, konstrukciju, materijale te mehanizme trošenja i korozije visokotlačnih brtvi.

U eksperimentalnom dijelu rada treba provesti analizu i sistematizaciju oštećenja visokotlačnih brtvi, ispitivanje tvrdoće i mikrostrukture materijala brtvi te ispitivanje otpornosti na elektrokemijsku koroziju. Na temelju rezultata provedenih ispitivanja predložiti mjere za održavanje cjevovoda i produženje uporabnog vijeka brtvi.

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

Zadatak zadan:

9. svibnja 2024.

Datum predaje rada:

11. srpnja 2024.

Predviđeni datumi obrane:

15. – 19. srpnja 2024.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Darko Landek

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD	1
2. PRIRUBNIČKI SPOJEVI	2
2.1. Brtve i brtvljenje	3
2.1.1. Ravne brtve	4
2.1.2. Metalni U- prstenovi	4
2.1.3. Metalne O-brtve	4
2.1.4. Metalne C-brtve	4
2.1.5. Metalne brtve s elastičnim prstenima	4
2.1.6. Spiralno-metalne brtve	4
2.2. Problemi u montaži prirubničkih spojeva	8
2.2.1. Nejednaka sila na vijcima	8
2.2.2. Oštećene i prljave površine vijaka i prirubnica	10
2.2.3. Nepravilna pozicija brtvenog elementa	10
2.2.4. Vanjska opterećenja	10
2.2.5. Nepravilno odabran materijal i veličina brtve	12
3. NEHRĐAJUĆI ČELICI	14
3.1. Povijest nehrđajućih čelika	14
3.2. Fazne transformacije nehrđajućih čelika	15
3.3. Legirni elementi u nehrđajućim čelicima	16
3.4. Austenitni nehrđajući čelici	19
4. GALVANIZACIJA	21
5. ELEKTROKEMIJSKA ISPITIVANJA KOROZIJE	24
5.1. Osnovne metode elektrokemijskih ispitivanja	24
5.2. Metoda Tafelove ekstrapolacije	25
5.3. Metoda linearne polarizacije	26
5.4. Određivanje korozijskog potencijala	27
6. EKSPERIMENTALNI DIO	29
6.1. Izbor ispitnih uzoraka spiralno-metalnih brtvi	29
6.2. Plan ispitivanja	31
6.3. Klasifikacija brtvi	32
6.4. Određivanje kemijskog sastava dijelova spiralno-metalne brtve	35
6.5. Mjerenje debljine prevlake	39
6.6. Analiza mikrostrukture prstena brtve	41
6.7. Ispitivanje tvrdoće	48

6.8. Ispitivanje hrapavosti površine.....	50
6.9. Ispitivanje korozijske postojanosti	54
6.9.1. Određivanje korozijskog potencijala E_{kor}	55
6.9.2. Određivanje polarizacijskog otpora	57
6.9.3. Određivanje brzine korozije	58
6.9.4. Korozijsko oštećenje površine brtvi.....	60
6.10. Analiza trošenja i korozije brtvi	61
7. ZAKLJUČAK.....	75
LITERATURA.....	77

POPIS SLIKA

Slika 1: Shematski prikaz prirubničkog spoja [1]	2
Slika 2: Model spiralno-metalne brtve [5].....	5
Slika 3: Različiti tipovi spiralno-metalnih brtvi [6]	6
Slika 4: Princip identifikacije materijala brtvi [6].....	6
Slika 5: Tumačenje oznaka na brtvi [7].....	7
Slika 6: Pritezanje prirubnice vijcima [9].....	9
Slika 7: a) mehaničko oštećenje duž unutarnjeg ruba brtvenog elementa, b) lokalizirano mehaničko oštećenje [10]	9
Slika 8: Shematski prikaz prirubničkog spoja opterećenog na savijanje [5]	10
Slika 9: Smanjenje pritiska na brtvu na unutarnjem dijelu brtvenog elementa uslijed savijanja [5]	11
Slika 10: Varijacija naprezanja u brtvi uslijed savojnog opterećenja od 3 kN [5].....	11
Slika 11: a) kritični prirubnički spoj, b) struktura oštećene spiralno-metalne brtve [12].....	12
Slika 12: Označena mjesta za fraktografiju [12].....	13
Slika 13: SEM analiza, a) mjesto 1, b) mjesto 2, c) mjesto 5, d) mjesto 6 [12]	13
Slika 14: Fe-Cr fazni dijagram [15]	15
Slika 15: Širenje austenitnog područja u Fe-C sustavu povećanjem udjela ugljika [15]	16
Slika 16: Schaefflerov dijagram [16]	18
Slika 17: Mikrostrukture austenitnih nehrđajućih čelika [17]	19
Slika 18: Galvanska zaštita čelika cinkovom prevlakom [21].....	22
Slika 19: Potenciostat i elektrokemijska ćelija [23]	24
Slika 20: Tafelova krivulja [24]	26
Slika 21: Određivanje polarizacijskog otpora [25]	27
Slika 22. Određivanje korozijskog potencijala [26].....	28
Slika 23. Ventili plinovoda pripremljeni za servis	29
Slika 24. Ventil sa spiralno-metalnom brtvom	30
Slika 25. Kavitacijska oštećenja na ventilu	31
Slika 26. Određivanje kemijskog sastava vanjskog prstena brtve C2	35
Slika 27. Mjerenje debljine prevlake brtve A3	39
Slika 28. Uzorci zaliveni u polimernu masu	41
Slika 29. 3 %-tna otopina NITAL-a	41
Slika 30. Metalografski mikroskop Olympus GX51	42
Slika 31. Mikrostruktura uzorka A4, povećanje 50x.....	43
Slika 32. Mikrostruktura uzorka A4, povećanje 200x.....	43
Slika 33. Mikrostruktura uzorka A4, povećanje 500x.....	44
Slika 34. Temperatura rekristalizacije [27].....	45
Slika 35. Izmjerene vrijednosti debljine sloja cinka, uzorak A4	45
Slika 36. Mikrostruktura uzorka C3, povećanje 200x	46
Slika 37. Mikrostruktura uzorka C3, povećanje 500x	46
Slika 38. Mikrostruktura uzorka C3, povećanje 1000x	47
Slika 39. Izmjerene vrijednosti debljine sloja cinka, uzorak C3.....	47
Slika 40. Tvrdomjer ZHV μ -S Micro Vickers	48
Slika 41. Otisak indentora u uzorku A4.....	49
Slika 42. Brtve za ispitivanje hrapavosti	50
Slika 43. Elektromehanički uređaj s ticalom TIME 3202	51
Slika 44. Profil hrapavosti površine na brtvi D.....	52
Slika 45. Profil hrapavosti površine na brtvi E	52
Slika 46. Profil hrapavosti površine na brtvi F	53

Slika 47. Pripremljeni uzorci za elektrokemijska ispitivanja istosmjernom strujom.....	54
Slika 48. Oprema za elektrokemijska ispitivanja	55
Slika 49. Dijagrami određivanja korozijskog potencijala, a) A3 – spiralni dio, b) A4 – vanjski prsten	56
Slika 50. Polarizacijska krivulja, A3 – spiralni dio.....	57
Slika 51. Polarizacijska krivulja, A4 – vanjski prsten.....	58
Slika 52. Krivulje Tafelove ekstrapolacije, a) A3 – spiralni dio, b) A4 – vanjski prsten.....	59
Slika 53. Kalibracija stereomikroskopa.....	60
Slika 54. Izgled površina uzoraka nakon elektrokemijskih ispitivanja	60

POPIS TABLICA

Tablica 1. Označavanje brtvi	32
Tablica 2. Rezultati XRF analize brtve A3	36
Tablica 3. Rezultati XRF analize brtve A14	37
Tablica 4. Rezultati XRF analize brtve C2	38
Tablica 5. Rezultati mjerenja debljine prevlake vrtložnim strujama brtvi A3, A4 i A5	40
Tablica 6. Rezultati mjerenja debljine prevlake vrtložnim strujama brtvi A10 i A13	40
Tablica 7. Rezultati ispitivanja tvrdoće Vickers metodom	49
Tablica 8. Vrijednosti dobivenih parametara hrapavosti	51
Tablica 9. Korozijski potencijal ispitnih uzoraka	55
Tablica 10. Izmjerene vrijednosti polarizacijskog otpora	57
Tablica 11. Rezultati ispitivanja metodom Tafelove ekstrapolacije	58
Tablica 12. Oštećenja brtve A1	61
Tablica 13. Oštećenja brtvi A2 i A3	62
Tablica 14. Oštećenja brtve A4	63
Tablica 15. Oštećenja brtve A5	64
Tablica 16. Oštećenja brtvi A6 i A7	65
Tablica 17. Oštećenja brtvi A8 i A9	66
Tablica 18. Oštećenja brtvi A10 i A11	67
Tablica 19. Oštećenja brtvi A12, A13 i A14	68
Tablica 20. Oštećenja brtvi B1 i B2	70
Tablica 21. Oštećenja brtvi B3 i B4	71
Tablica 22. Oštećenja brtve C1	72
Tablica 23. Oštećenja brtve C2	73
Tablica 24. Oštećenja brtve C3	74

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
m	kg	Masa prevlake izlučene galvanizacijom
M	kg/mol	Molarna masa atoma metala prevlake
I	A	Jakost električne struje
t	s	Katodno iskorištenje struje
z	-	Valencija metala u ionima otopljenim u elektrolitu
F	$C \cdot mol^{-1}$	Faradayeva konstanta
E_{kor}	mV	Korozijski potencijal
j_{kor}	$\mu A/cm^2$	Gustoća korozijske struje
v_{kor}	mm/god	Brzina korozije
EW	g	Ekvivalentna masa
ρ	g/cm^3	Gustoća
R_p	Ω	Polarizacijski otpor
S	cm^2	Površina radne elektrode izložena elektrolitu
b_a	V/dek	Nagib anodnog pravca
b_c	V/dek	Nagib katodnog pravca
ZKE	-	Zasićena kalomel elektroda

SAŽETAK

U naftno-plinskim postrojenjima cjevovodi i oprema su često izloženi visokim temperaturama i tlakovima. Brtvljenje je bitno za postizanje nepropusnih spojeva, a u takvim ekstremnim uvjetima se koriste spiralno-metalne brtve od austenitnog nehrđajućeg čelika s grafitnim punilom. U teorijskom dijelu rada opisani su prirubnički spojevi te objašnjeni problemi s kojima se prirubnički spojevi u praksi susreću. Prikazana su svojstva, konstrukcija i radni uvjeti spiralno-metalnih brtvi. Definirani su nehrđajući čelici, s posebnim naglaskom na austenitne nehrđajuće čelike. Opisan je postupak galvanskog prevlačenja kao i elektrokemijska ispitivanja korozije.

U eksperimentalnom dijelu rada provedena je analiza i sistematizacija oštećenja spiralno-metalnih brtvi. Nerazornim metodama određeni su kemijski sastav, hrapavost površine te debljina prevlake brtvi. Na metalografski pripremljenim uzorcima analizirana je mikrostruktura te je provedeno ispitivanje mikrotvrdoće. Ispitana su i elektrokemijska svojstva brtvi. Na temelju dobivenih rezultata donesen je zaključak i dan prijedlog za održavanje prirubničkih spojeva.

Ključne riječi: visoka temperatura, visoki tlak, prirubnički spojevi, brtvljenje, spiralno-metalne brtve, austenitni nehrđajući čelici, galvanizacija, elektrokemijska ispitivanja

SUMMARY

In oil and gas facilities, pipelines and equipment are often exposed to high temperatures and pressures. Sealing is crucial for achieving leak-proof joints, and in such extreme conditions, spiral wound gaskets made of austenitic stainless steel with graphite filler are used.

In the theoretical part of the paper, flange joints are described, and the problems encountered by flange joints in practice are explained. The properties, construction, and operating conditions of spiral wound gaskets are presented. Stainless steels are defined, with special emphasis on austenitic stainless steels. The process of electroplating and electrochemical corrosion testing is explained.

In the experimental part of the paper, an analysis and systematization of spiral wound gasket damage were carried out. The chemical composition, surface roughness, and coating thickness of the gaskets were determined by non-destructive methods. The microstructure was analyzed on metallographically prepared samples, and microhardness testing was performed. The electrochemical properties of the gaskets were also tested. Based on the obtained results, a conclusion was drawn and a maintenance proposal for flange joints was provided.

Key words: high temperature, high pressure, flange joints, sealing, spiral wound gaskets, austenitic stainless steels, galvanization, electrochemical testing

1. UVOD

Kroz povijest su zabilježene brojne nesreće vezane uz cjevovode, a većina ih se dogodila zbog propuštanja cjevovoda uslijed transporta tvari poput nafte, plina i opasnih kemikalija. Države kao što su Kanada i SAD-a na samom su vrhu po broju takvih nesreća, u kojima nerijetko bude i ljudskih žrtava. Stoga pravilno konstruirani cjevovodi i prirubnički spojevi igraju veliku ulogu u smanjenju ovih incidenata [1].

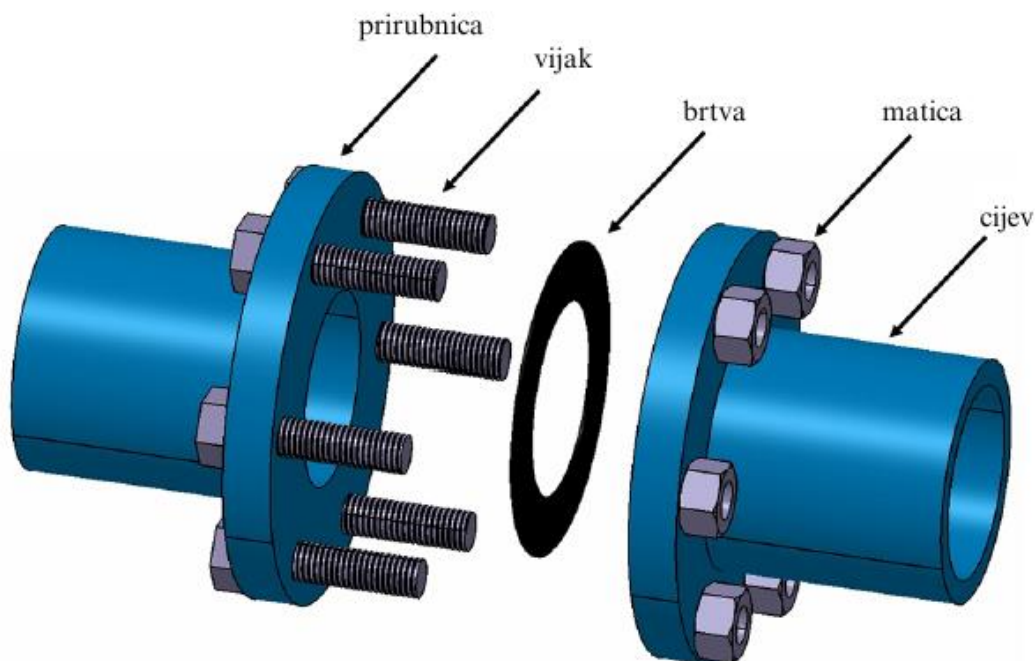
Prirubnički spoj je najviše korištena metoda za povezivanje: cjevovoda, ventila, posuda pod tlakom itd. Sastoji se od dvije prirubnice, vijaka i brtve. Odabir odgovarajuće brtve važan je za osiguravanje nepropusnog spoja.

Pri radu u teškim uvjetima kao što su visoka temperatura i kontakt s nagrizajućim (korozivnim) tekućinama, oprema u postrojenjima za preradu nafte i plina mora biti izrađena od materijala koji posjeduju izvrsna mehanička svojstva i otpornost na koroziju. Do sada su se najboljim pokazali austenitni nehrđajući čelici, zbog dobre otpornosti na koroziju, žilavosti te oblikovljivosti u hladnom stanju. Dodatak molibdena od oko 2% tim čelicima dodatno daje otpornost na naftenske kiseline [2].

Od austenitnih nehrđajućih čelika napravljene su i spiralno-metalne brtve koje se analiziraju i ispituju u radu.

2. PRIRUBNIČKI SPOJEVI

Zadatak velikog broja procesno-energetskih sustava je prijenos medija s jednog mjesta na drugo na siguran i pouzdan način. Cijevi takvih sustava ne mogu ići u beskonačnost te vrlo često mijenjaju svoj smjer i dimenzije. Dvije glavne grupe spajanja navedenih sustava su spajanje zavarivanjem i spajanje prirubničkim spojevima te kao i svaki drugi sustav imaju svoje prednosti i mane. Prirubnički spoj je kompleksna kombinacija koja uključuje brojne faktore i čimbenike (prirubnica, vijci, proces, temperatura, tlak, medij). Svaki od njih utječe na pouzdanost i sigurnost spoja, a njihova se međusobna povezanost mijenja te utječe na rezultat spoja. Glavni i osnovni zadatak prirubničkih spojeva je spojiti dvije neovisne strane (cijevi, posude pod tlakom, ventili...). Slika 1 prikazuje dijelove prirubničkog spoja. Izgled, materijal i konstrukcija prirubničkog spoja, razlikuju se od primjene do primjene te su propisani normama i preporukama.



Slika 1: Shematski prikaz prirubničkog spoja [1]

2.1. Brtve i brtvljenje

Općenito, u području strojarstva, pod pojmom brtvljenja podrazumijevaju se mjere koje se poduzimaju kako bi se spojevi učinili nepropusnima ili barem smanjila njihova propusnost. Ovo se može zahtijevati iz različitih razloga, kao što su potreba za odvajanjem prostora s različitim tlakovima ili medijima koji ne smiju biti u kontaktu, sprječavanje gubitka medija ili zaštita nekih uređaja od onečišćenja. U užem smislu, pojam brtvljenja odnosi se na spojeve koji ostaju rastavljivi nakon montaže. Ponekad se spojevi mogu brtviti eliminiranjem zračnosti između dosjednih površina njihovih dijelova putem precizne obrade i primjenom dovoljno velikih sila prilikom stezanja. Međutim, u većini slučajeva ovakav način brtvljenja nije ekonomičan ili nije izvediv. Zbog toga se brtvljenje često provodi korištenjem različitih materijala (brtvila) ili izrađenih elemenata (brtava) koji eliminiraju zračnost prilagođavajući se neravninama dosjednih površina tako što se deformiraju [3].

Osim osiguravanja nepropusnosti, na ove materijale se postavljaju i drugi zahtjevi koji ovise o uvjetima uporabe. Potrebno je da budu pouzdani u radu te imaju dugi vijek trajanja. Također da ne štete mediju s kojim dolaze u kontakt, da budu otporni na kemijsko djelovanje, da imaju prikladne koeficijente toplinskog širenja, da su stabilni na radnim temperaturama, da budu otporni na eroziju, a ponekad su potrebna i antifriksijska svojstva.

Brtva je materijal koji može biti meki ili tvrdi, a ulaže se između dva dijela kako bi se spriječilo propuštanje na njihovom spoju. Pritisak na brtvu postiže se njihovim spajanjem vijcima i oni tada drže brtvu čvrsto na mjestu. Potreban moment pritezanja vijaka uglavnom propisuje proizvođač. U slučaju prevelikog momenta pritezanja, moglo bi doći do oštećenja brtve i propuštanja spoja. Važno je da brtva bude od mekšeg materijala nego dva spojna dijela kako ne bi došlo do njihovog oštećenja. Izbor materijala brtve ovisi o temperaturi, tlaku, svojstvima fluida u cjevovodu. Njezina funkcionalnost ovisi o ispravnom postavljanju opterećenja, veličini, debljini, materijalu i dubini utora u kojem se nalazi. Brtve dolaze u različitim oblicima i veličinama, a najčešće su ravne, spiralne, metalne O-brtve, metalne C-brtve, metalne spiralne brtve i metalni U-prsteni. Neke brtve mogu se prevlačiti slojem gume ili plastike kako bi im se poboljšala korozijska postojanost. Da bi brtvljenje bilo dobro potrebno je da srednja hrapavost nakon završne obrada ravnog dijela na koji brtva priliježe bude između $Ra = 3,2 - 12,5 \mu\text{m}$ [4].

2.1.1. Ravne brtve

Ravne brtve su jednostavne brtve koje se izrađuju strojnom obradom i često se koriste u cjevovodima s niskim temperaturama i tlakovima. Mogu se prilagoditi nepravilnim dosjednim površinama elastičnom deformacijom.

2.1.2. Metalni U- prstenovi

Metalni U-prstenovi se konstruiraju za visoke tlakove i temperature. Glavni zahtjev u njihovoj konstrukciji je dobra pouzdanost u uporabi. U-prsteni moraju biti postavljeni u praktički idealnom paralelnom položaju s dosjednim površinama prirubnice.

2.1.3. Metalne O-brtve

Metalne O-brtve su prilagodljive i često se koriste u različitim primjenama. Deformiraju se pod pritiskom vijaka na spoju i dobro funkcioniraju u promjenjivim uvjetima tlaka i temperature.

2.1.4. Metalne C-brtve

Metalne C-brtve imaju jedinstveni oblik slova C s utorom okrenutim prema unutrašnjem promjeru. Iako su među najskupljima, idealne su za primjenu gdje je potrebna mala sila pritezanja i postoji velika reakcijska sila. Koriste se u primjenama niskog vakuuma i niskog tlaka.

2.1.5. Metalne brtve s elastičnim prstenima

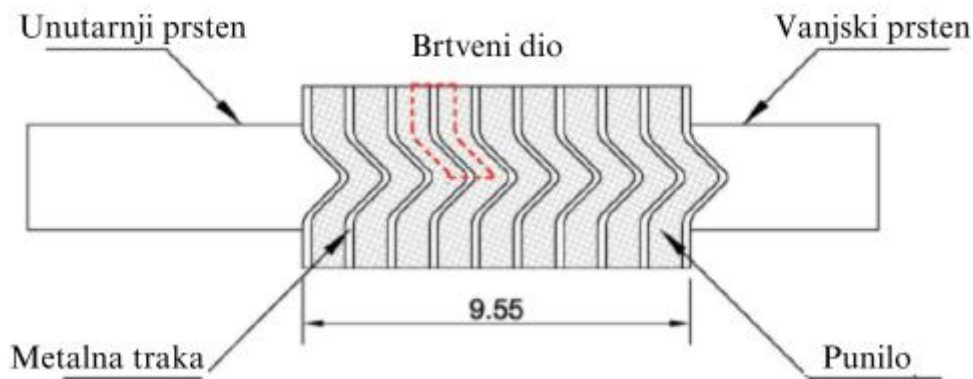
Slične su C-brtvama, ali uključuju metalnu oprugu unutar brtve. Zahtijevaju veliki pritisak prilikom ugradnje i često se koriste u uvjetima gdje temperatura i tlak variraju.

2.1.6. Spiralno-metalne brtve

Spiralno namotane brtve postoje od 1912. godine, ali se nisu koristile u cjevovodnim sustavima sve do 90-ih godina 20. stoljeća. U srpnju 1989. godine, EPA (*Environmental Protection Agency*) je donijela zakon kojim se zabranjuju proizvodi s azbestom, a do tada je azbest bio korišten za izradu visokotlačnih brtvi. Kako je petrokemijska industrija tražila novu jednako kvalitetnu konstrukciju brtve, spiralno-metalne brtve su se pokazale najboljom opcijom. Ove brtve su polu-metalne brtve koje se sastoje od spiralno namotanih metalnih traka i punila. Takva

brtva je fleksibilna za ugradnju i nakon ugradnje pritisno djeluje na brtveni spoj, čime se omogućuje sigurno brtvljenje. Također ima i dobru otpornost na puzanje te neće doći do smanjenja priteznog momenta vijaka tijekom uporabe.

Spiralno namotane metalne trake uobičajeno su oblikovane u obliku slova V (slika 2).



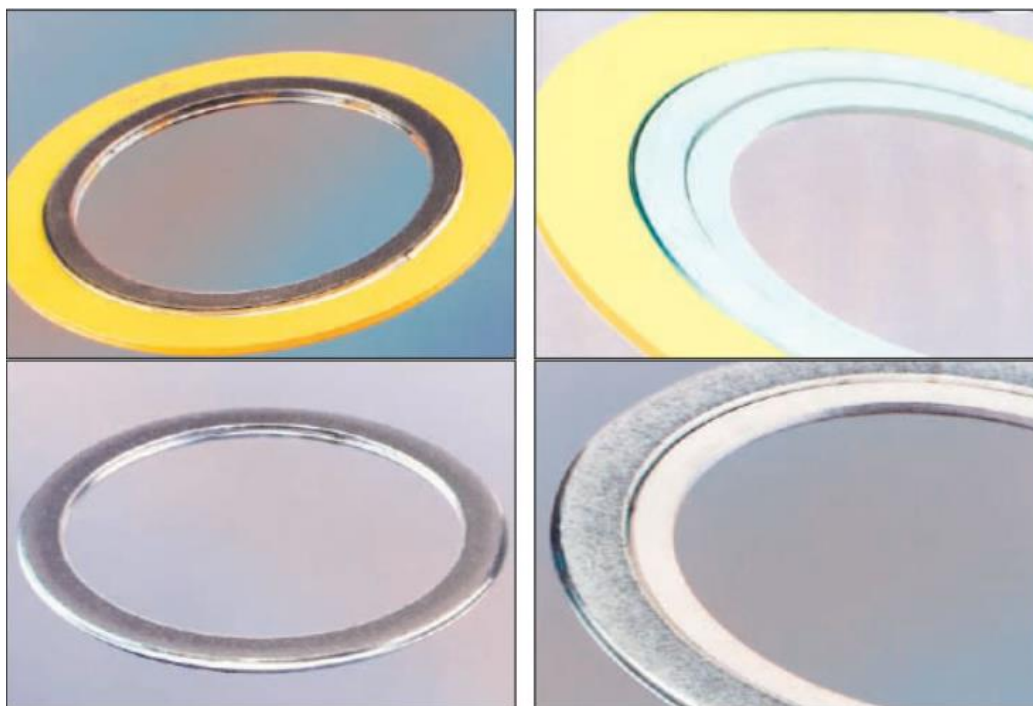
Slika 2: Model spiralno-metalne brtve [5]

Vanjski prsten služi za centriranje brtve na priрубnicu i osiguravanje pravilne raspodjele tlakova na površini brtve. Najčešće je izrađen od konstrukcijskog čelika.

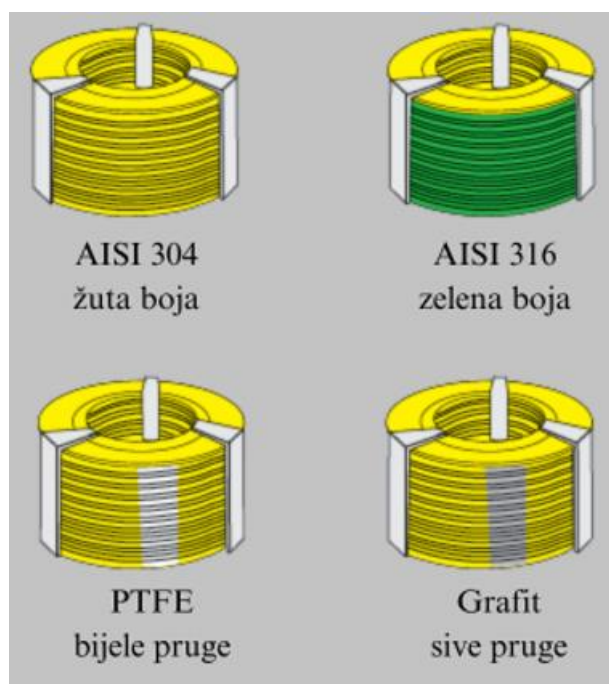
Neke brtve osim brtvenog elementa i vanjskog prstena, imaju i unutarnji prsten. Unutarnji prsten sprječava izvijanje spiralno namotanih metalnih traka i većinom je od istog materijala kao i brtveni dio. Kada dođe do izvijanja brtvenog dijela, komadići metala utisnu se u cijev i zaglave što kasnije dovodi do problema s radom rotirajućih zaklopki ventila.

Postoje brtve koje imaju samo brtveni dio, a različiti tipovi spiralno-metalnih brtvi prikazani su na slici 3.

Najčešći materijali metalnih traka su austenitni nehrđajući čelici X5CrNiMo17-12-2 (AISI 316) i X5CrNi18-10 (AISI 304), a punila su grafit i politetrafluoretilen (PTFE). Brtve su označene bojama da bi se ubrzao odabir i identifikacija potrebnih brtvi. Boja na rubu vanjskog prstena označava i materijal namotane metalne trake i materijal punila. Dok je materijal namotane metalne trake označen jednobojno, materijal punila je označen prugama u boji koje se nalaze na jednakim razmacima (slika 4). Konstrukcija i označavanje brtvi propisani su normom u ASME (*American Society of Mechanical Engineers*) B16.20.

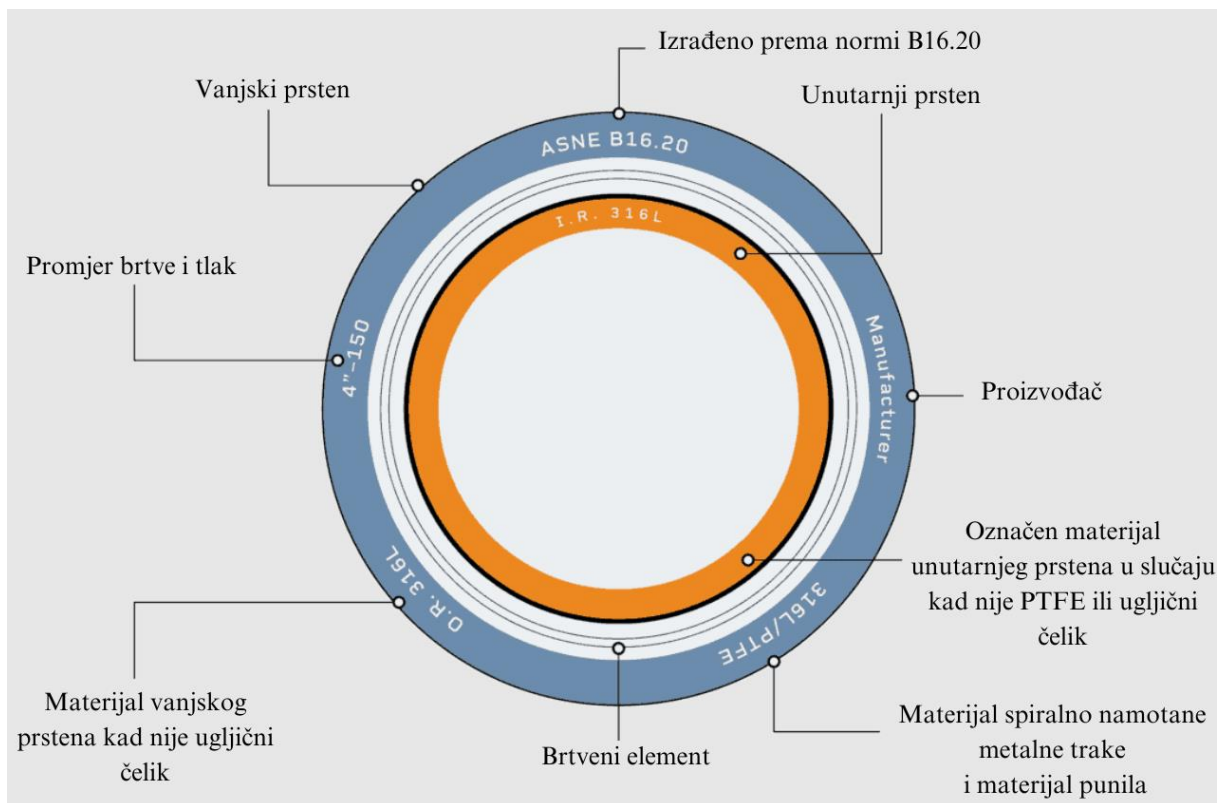


Slika 3: Različiti tipovi spiralno-metalnih brtvi [6]



Slika 4: Princip identifikacije materijala brtvi [6]

Također se iz oznaka koje se nalaze na brtvi može dosta toga saznati o samoj brtvi, od proizvođača i korištenih materijala, do veličine brtve (promjera) i tlaka koji brtva može podnijeti. Oznake su detaljnije objašnjene na slici 5.



Slika 5: Tumačenje oznaka na brtvi [7]

Bitne karakteristike spiralno-metalnih brtvi jesu sljedeće [8]:

- 1) **Elastičnost** – nakon što je brtva bila pritisnuta između prirubnica, tj. poslije rasterećenja, vraća se u prvobitno stanje i osigurava brtvljenje.
- 2) **Kompatibilnost** – spiralno-metalne brtve su kompatibilne s raznim plinovima, kiselinama, lužinama, uljima i drugim otapalima, odnosno u kontaktu s fluidima neće doći do degradacije svojstava.
- 3) **Rad u različitim uvjetima** – pogodne su za rad u širokom rasponu temperatura (od -250 °C do 1050 °C) te podnose visoke tlakove do 450 bar.
- 4) **Dobro podnošenje naprezanja** – zahvaljujući materijalima poput grafita i PTFE koji se koriste u spiralno-metalnim brtvama, brtve će dobro podnositi tlačna naprezanja i vibracije, ali i toplinska naprezanja prilikom kojih dolazi do kontrakcije i produljenja brtvi.

- 5) Prilagodba deformacijama prirubnice – prirubnice će se deformirati pod utjecajem opterećenja vijaka, no brtve će se zbog svoje fleksibilnosti prilagoditi tim nepravilnostima i osigurati nepropusni spoj.
- 6) Brtvljenje na nepravilnim površinama – moguće je brtvljenje i na lagano zakrivljenim i korodiranim površinama.
- 7) Raznolika primjena – spiralno-metalne brtve su pogodne kod brtvljenja prirubnica, kompresora, tlačnih spremnika, ventila, akumulacijskih spremnika itd.

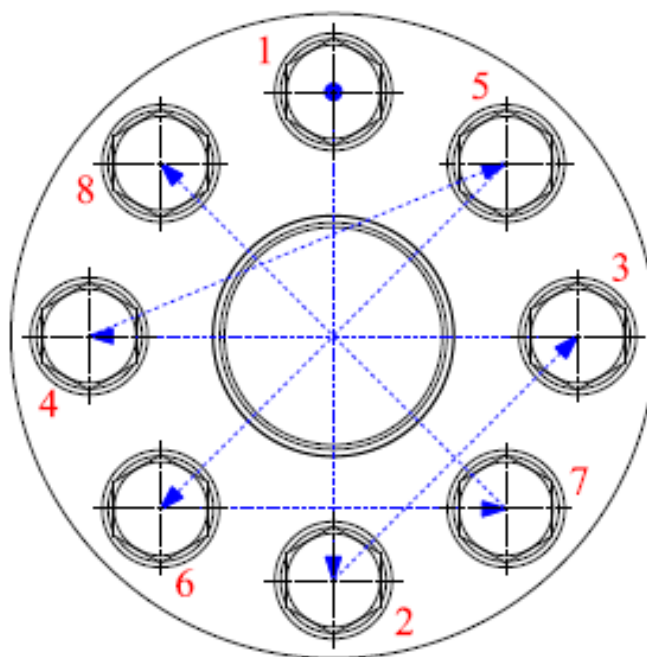
Nedostaci spiralno-metalnih brtvi jesu sljedeći [8]:

- 1) Kompleksnost montaže – montaža spiralno-metalnih brtvi je složenija u odnosu na druge vrste te zahtijeva pažljivo rukovanje i preciznost kod centriranja brtve.
- 2) Odabir materijala – s obzirom na korišteni medij u cijevima, ponekad je teško odabrati optimalan materijal brtve.
- 3) Osjetljivost na kvalitetu površine – za optimalno brtvljenje zahtijevaju se glatke i ravne površine prirubnica ($R_a = 3.2 - 6.3 \mu\text{m}$)
- 4) Ograničenost u dostupnim veličinama brtvi – normom su točno propisane veličine brtvi za određene veličine prirubnica, što može predstavljati problem kada je potrebna specifična veličina brtve.
- 5) Jednokratna upotreba – spiralno-metalne brtve ne mogu se ponovo koristiti te u eksploataciji zahtijevaju redovitu zamjenu nakon rastavljanja prirubničkog spoja.

2.2. Problemi u montaži prirubničkih spojeva

2.2.1. Nejednaka sila na vijcima

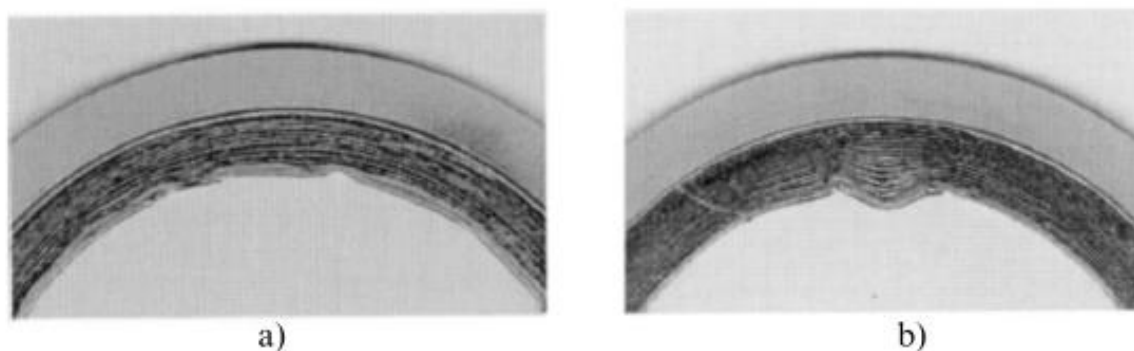
Svaki prirubnički sklop, ovisno o broju vijaka, metodi stezanja (ručno, momentnim ključem, hidrauličkim uređajem za stezanje), mora biti stegnut prema posebnim pravilima i procedurama. Rezultat lošeg pritezanja može biti da određeni vijci nisu dovoljno pritegnuti, dok su ostali previše stegnuti (što može uzrokovati gnječenje brtve). Ovaj problem može rezultirati propuštanjem prirubničkog spoja prilikom rada, posebno pri visokim temperaturama i tlakovima, gdje dolazi do rasterećenja vijčanog spoja i propuštanja medija. Primjer križnog redoslijeda pritezanja prirubnice s 8 vijaka prikazan je na slici 6.



Slika 6: Pritezanje prirubnice vijcima [9]

Za velike i složene spojeve obično se koriste hidraulički uređaji za stezanje, čime se izbjegavaju nejednakosti u iznosu sila na vijcima. Ovim uređajima istovremeno se zateže veći broj vijaka, za razliku od ručnih metoda gdje se zateže vijak po vijak.

Veće sile na vijcima od propisanih uzrokovat će izvijanje brtvenog elementa (slika 7).



Slika 7: a) mehaničko oštećenje duž unutarnjeg ruba brtvenog elementa, b) lokalizirano mehaničko oštećenje [10]

2.2.2. Oštećene i prljave površine vijaka i prirubnica

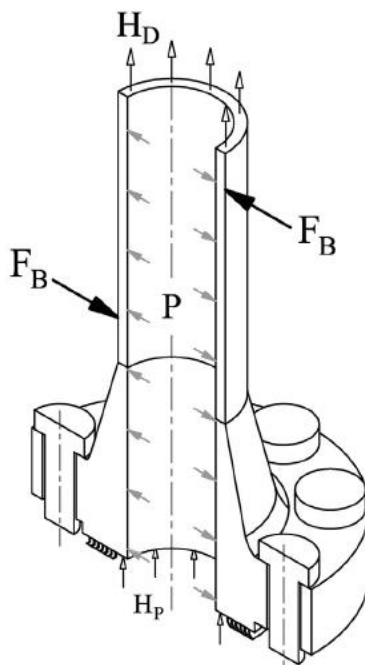
Ogrebotine, naslage od korozije, slojevi boje na vijcima te ostaci zavarivanja na prirubnicama utječu na koeficijent trenja spoja i otežavaju brtvljenje.

2.2.3. Nepravilna pozicija brtvenog elementa

Kada brtveni element nije centriran u odnosu na prirubnice, tada pritisak na brtveni element neće biti ravnomjerno raspoređen, što može završiti popuštanjem spoja. Neki brtveni elementi imaju vanjski centrirajući prsten, dok su neke prirubnice konstruirane s utorom za brtveni prsten radi lakšeg pozicioniranja brtvenog elementa.

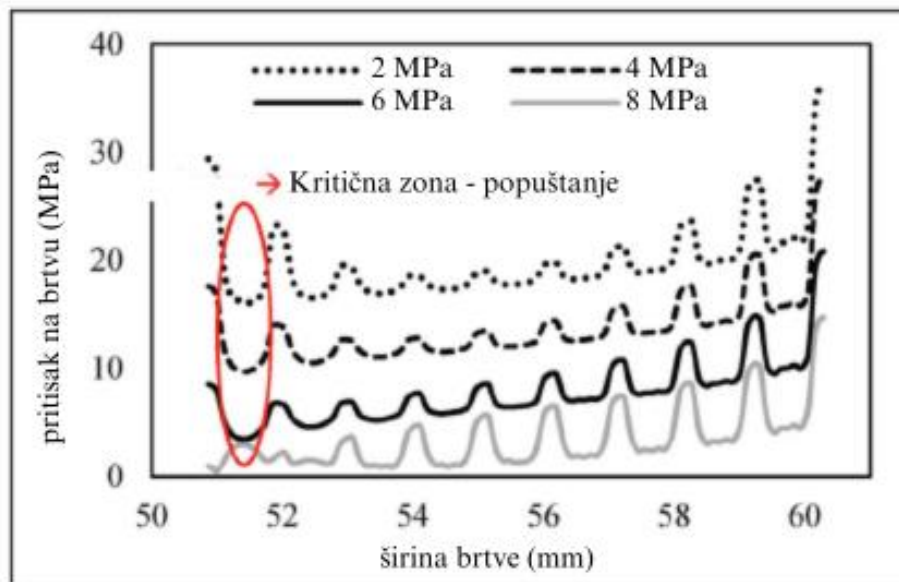
2.2.4. Vanjska opterećenja

Prekomjerno unošenje dodatnih vanjskih sila i momenata dovest će do popuštanja spoja. Cjevovodi su često opterećeni na savijanje zbog udara vjetra, ali i zbog vibracija nastalih izvan cjevovodnog sustava (slika 8).



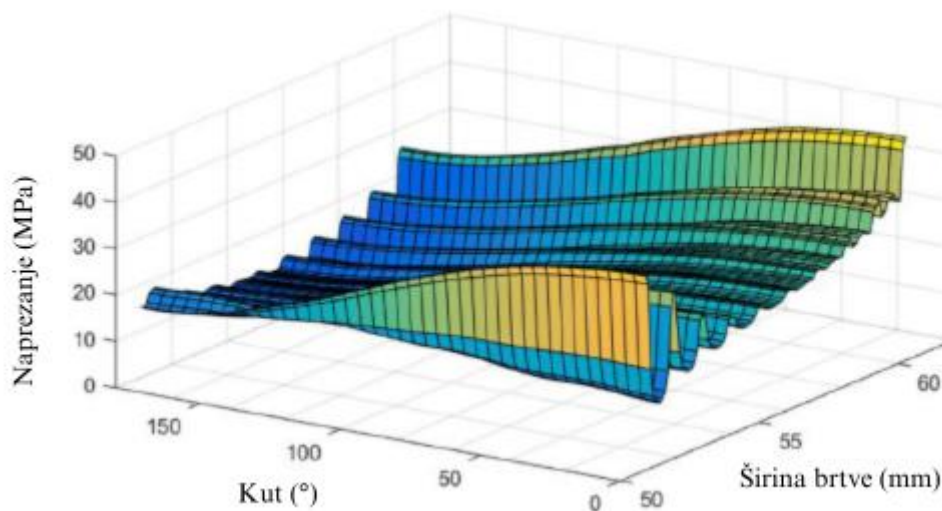
Slika 8: Shematski prikaz prirubničkog spoja opterećenog na savijanje [5]

Zbog vanjskog savojnog momenta, jedna strana prirubničkog spoja bit će opterećena na tlak, a druga na vlak te će ta vlačno opterećena strana popustiti, tj. smanjit će se kontaktni pritisak koji je do tada omogućavao čvrsti spoj. Kod brtvi je to unutarnja površina brtvenog elementa (slika 9).



Slika 9: Smanjenje pritiska na brtvu na unutarnjem dijelu brtvenog elementa uslijed savijanja [5]

Na slici 10 prikazana je raspodjela naprezanja brtve, od tlačnih naprezanja s jedne strane (0°) do vlačnih s druge (180°).

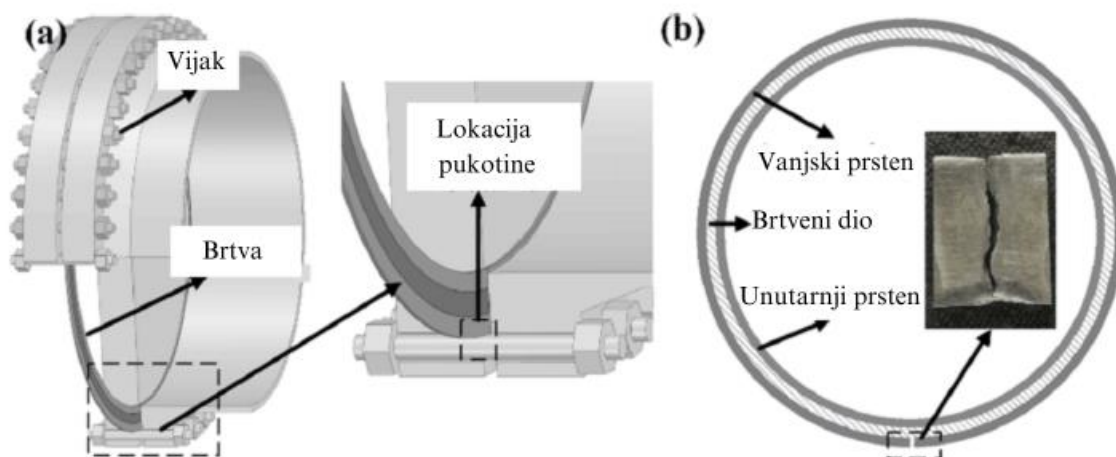


Slika 10: Varijacija naprezanja u brtvi uslijed savojnog opterećenja od 3 kN [5]

2.2.5. Nepravilno odabran materijal i veličina brtve

Prilikom odabira materijala dijelova koji će biti izloženi visokim temperaturama, treba voditi brigu o koeficijentu toplinskog rastezanja pojedinog materijala. Koeficijent toplinskog rastezanja nehrđajućeg čelika veći je od koeficijenta toplinskog rastezanja ugljičnog, stoga su deformacije uzrokovane toplinskim rastezanjem različite na pojedinim komponentama prirubničkog spoja.

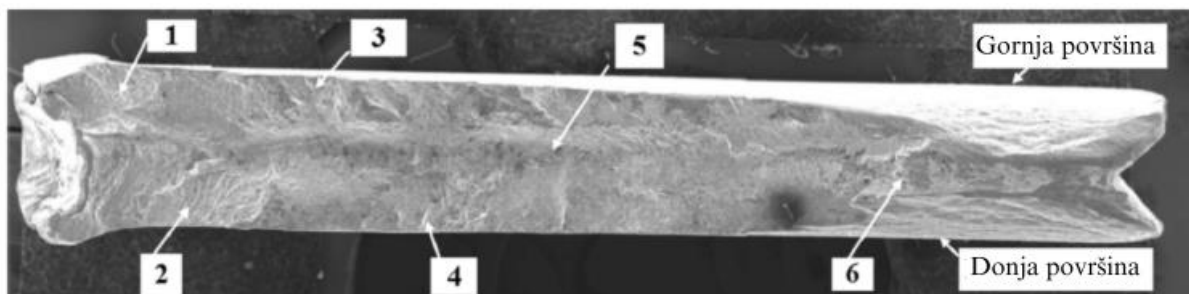
Na slici 11 uočava se da je pod utjecajem visoke temperature došlo do promjene dimenzija vijaka i stvaranja dodirne površine (s povećanjem trenja) između vijaka i vanjskog prstena brtve. To je uzrokovalo velika tangencijalna naprezanja na vanjski prsten brtve i pojavu umora materijala, koji je uzrokovao pojavu žilavog loma. Kod žilavog loma prisutne su na prijelomnoj površini udubine (jamice) nastale plastičnom deformacijom metalne matrice oko čestica (uključci, izlučevine) koje u pravilu imaju veću tvrdoću (i čvrstoću) od same matrice [11]. Istraživanja su pokazala da je u opisanom slučaju korištena i pogrešna veličina brtve. Umjesto primjene spiralno namotanog metala debljine 4,5 mm, koja je propisana prema normi B16.20, debljina spiralnog namota bila je 5,5 mm. U ovom slučaju je tlačenje brtvenog elementa bilo veće od uobičajenog što je stvorilo velike radijalne sile na vanjski prsten [12].



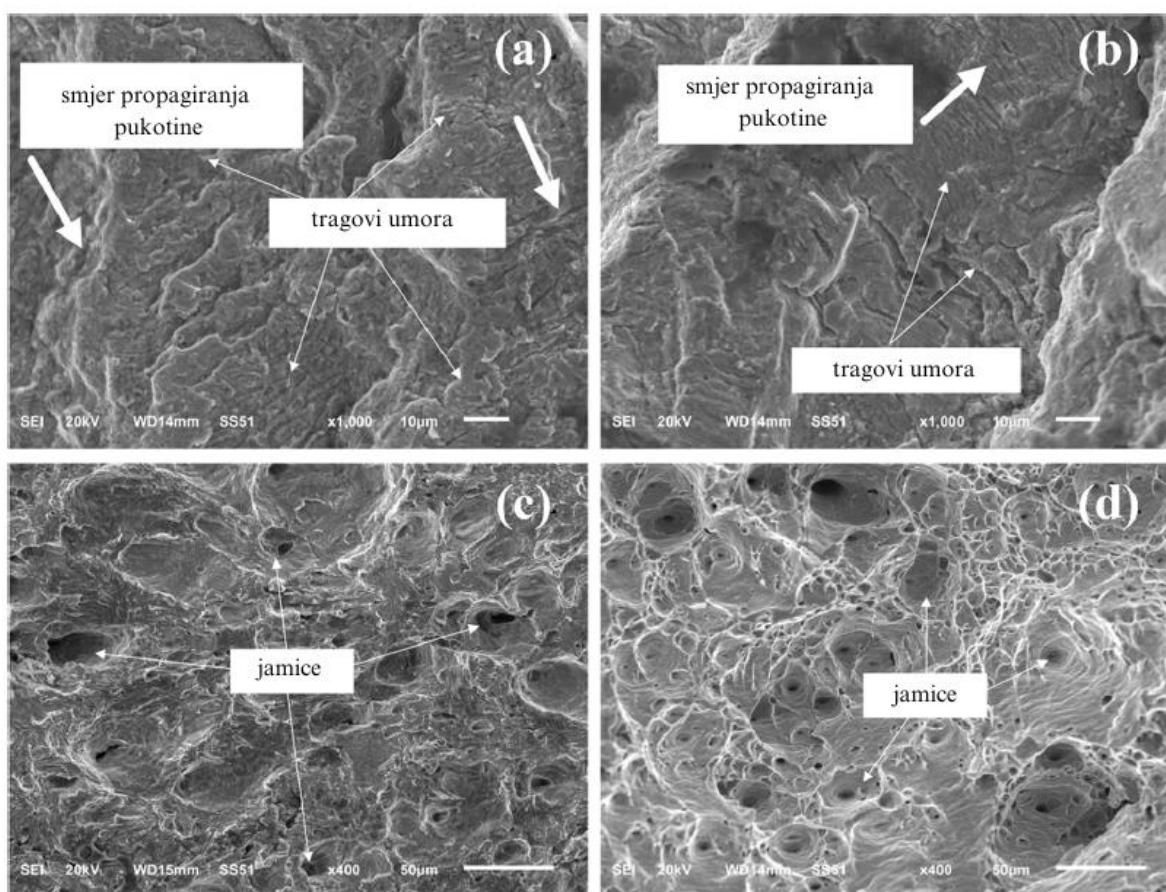
Slika 11: a) kritični prirubnički spoj, b) struktura oštećene spiralno-metalne brtve [12]

Da je zaista došlo do umora, potvrdila je analiza skenirajućom elektronskom mikroskopijom (SEM), koja je jasno pokazala mikroskopski male tragove umora materijala (linije i jamice).

Također vidljiv je i smjer propagiranja pukotine. U ispitivanju je analizirano šest područja oštećenog vanjskog prstena brtve (slika 12), a rezultati SEM analize su prikazani na slici 13.



Slika 12: Označena mjesta za fraktografiju [12]



Slika 13: SEM analiza, a) mjesto 1, b) mjesto 2, c) mjesto 5, d) mjesto 6 [12]

3. NEHRĐAJUĆI ČELICI

Prema EN 10020:2000 da bi legura pripadala nehrđajućim čelicima, mora zadovoljavati sljedeće uvjete [13]:

- 1) Željezo kao glavni element (otud naziv „čelik“)
- 2) Sadržaj kroma - legura mora sadržavati najmanje 10,5 % Cr
- 3) Sadržaj ugljika u leguri ograničen na 1,2 % C

Mikrostruktura značajno utječe na svojstva čelika, stoga se nehrđajući čelici uobičajeno klasificiraju prema mikrostrukturi na sobnoj temperaturi [14]:

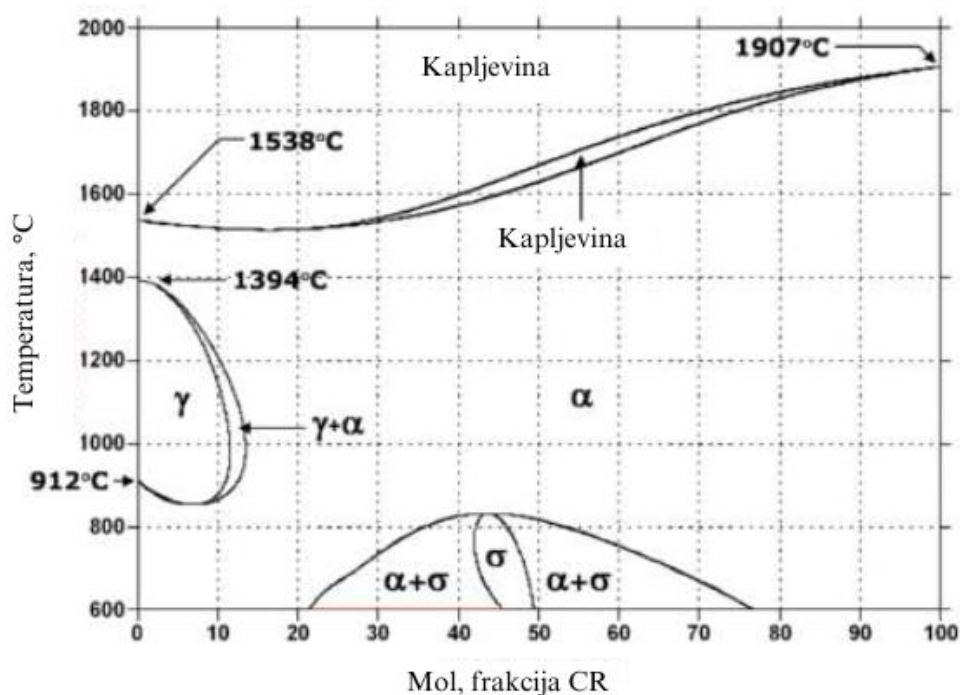
- feritni nehrđajući čelici
- austenitni nehrđajući čelici
- martenzitni nehrđajući čelici
- dupleks nehrđajući čelik
- precipitacijsko očvrnuti nehrđajući čelici (PH)

3.1. Povijest nehrđajućih čelika

Mnogi znanstvenici su pridonijeli razvoju nehrđajućih čelika. Francuski mineralog Belthier je 1821. godine prvi opazio otpornost Cr-čelika na kiseline. Njemačka tvrtka Krupp je 1912. godine podnijela prvi patentni zahtjev za nehrđajući čelik dok je razvijala odgovarajući materijal za termoelementne cijevi. Istovremeno je u Engleskoj metalurg Harry Brearley ispitivao čelike s 12 do 14% Cr te je on zaslužan za naziv nehrđajući čelici. Proizvodnja nehrđajućih čelika je naglo porasla poslije Kruppovog izlaganja istraživanja u Malmöu 1914, a prva komercijalna proizvodnja nehrđajućih čelika je započela 1924. u tvrtki Ferrolegeringar u Švedskoj. Ipak, tek nakon Drugog svjetskog rata uz napredak metalurgije omogućena je i šira primjena nehrđajućih čelika. 1970-ih razvojem postupka razugljičenja taline kisikom i argonom, omogućena je precizna kontrola ugljika i dušika. Uvođenjem legirnog elementa dušika u proizvodnju nehrđajućih čelika omogućeno je dodavanje većeg sadržaja molibdena i kroma. Baza podataka Thermo-Calc postala je glavni alat za razvoj legura u području nehrđajućeg čelika čime se eksperimentalno određivanje kemijskog sastava moglo zamijeniti simulacijama dijagrama stanja [13].

3.2. Fazne transformacije nehrđajućih čelika

Nehrđajući čelici ovisno o sastavu imaju različite strukture kristalnih rešetki. Na primjer, feritni čelici imaju prostorno centriranu kubičnu rešetku (engl. *Body-Centered Cubic*, BCC), austenitni čelici plošno centriranu kubičnu rešetku (engl. *Face-Centered Cubic*, FCC), martenzitni čelici volumno centriranu tetragonalnu rešetku (engl. *Body-Centered Tetragonal*), a dupleks nehrđajući čelici imaju kombinaciju FCC i BCC rešetke. Ravnotežnim faznim dijagramima se opisuje formiranje strukture nehrđajućih čelika [15]. Fazni dijagram Fe-Cr prikazan je na slici 14.



Slika 14: Fe-Cr fazni dijagram [15]

Fazni Fe-Cr dijagram pokazuje da sve Fe-Cr legure inicijalno kristaliziraju u ferit. Legure s manje od 12,7 % Cr prekriziraju u austenit u temperaturnom rasponu od 1294 do 913 °C, a zatim se pri daljnjem hlađenju ponovo transformiraju u ferit. Austenit se može pretvoriti u martenzit ako se te legure naglo ohlade [15].

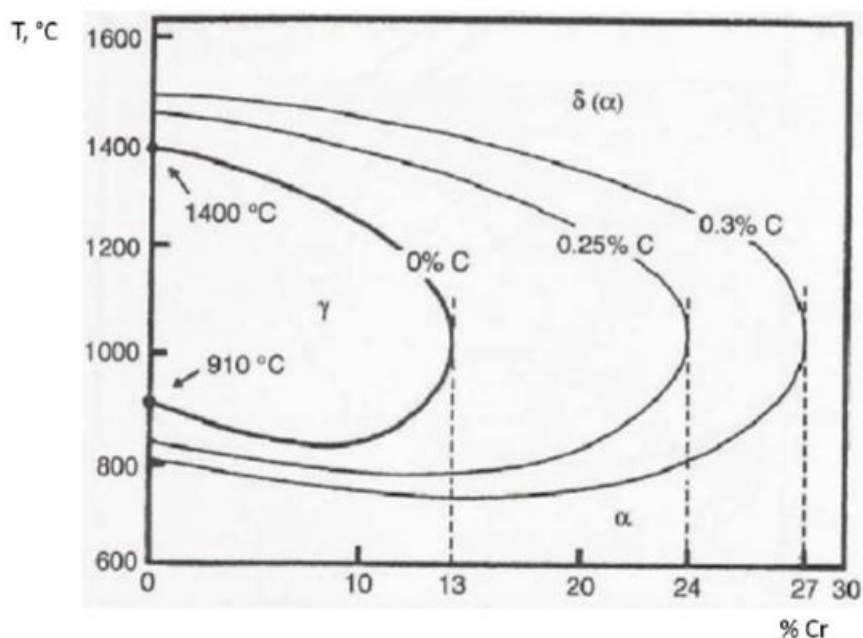
Međutim, u određenim temperaturnim rasponima mogu se formirati intermetalne faze koje degradiraju svojstva nehrđajućeg čelika. U temperaturnom rasponu od 600 do 1000 °C, nehrđajući čelici mogu formirati σ -fazu, za koju je karakterističan visoki sadržaja kroma i

krhkost. Velika količina istaložene faze uzrokuje pad žilavosti i smanjenje otpornosti na određene vrste korozije. Još jedna pojava intermetalne faze, tzv. “alfa-prim faze” naziva se “krhkost 475 °C”. Do fenomena dolazi pri toplinskoj obradi pri temperaturama 300 do 500 °C, a posljedica njegove pojave je smanjenje žilavosti [13].

3.3. Legirni elementi u nehrđajućim čelicima

Poznato je da su čelici materijali čija se svojstva u odnosu na druge materijale znatno više mijenjaju legiranjem. Određeni elementi se dodaju čeliku kako bi se postigla željena svojstva ili kombinacija istih [15].

Nehrđajući čelici najčešće sadrže nikal (Ni) i mangan (Mn), dok najotporniji na koroziju sadrže i molibden (Mo). Drugi važni legirni elementi su titanij (Ti) i niobij (Ni), dok se od nemetalnih elemenata legira s dušikom (N), silicijem (Si), sumporom (S) i fosforom (P). Svaki od tih kemijskih elemenata utječe na mikrostrukturu nehrđajućeg čelika. Na primjer, ugljik, kao gamageni element čak i u malim količinama proširuje austenitno područje (slika 15), dok se feritno područje dijagrama stanja Fe-C-Cr proširuje kada se udio kroma povisi na 17 % [15].



Slika 15: Širenje austenitnog područja u Fe-C sustavu povećanjem udjela ugljika [15]

Legirni elementi mogu se podijeliti na alfacene koji promiču i stabiliziraju ferit te na gamagene koji promiču i stabiliziraju austenit. Alfageni elementi i njihove glavne

karakteristike jesu sljedeće [15]:

- Krom (Cr) je legirni element koji nehrđajućim čelicima daje osnovnu otpornost na koroziju formiranjem pasivnog sloja, a otpornost na koroziju raste povećanjem udjela kroma
- Molibden (Mo) poboljšava otpornost na opću koroziju, posebno u kiselim medijima
- Titanij (Ti) se dodaje za stabilizaciju karbida i sprječavanje interkristalne korozije
- Niobij (Nb) ima sličan učinak kao titanij, koristi se za stabilizaciju karbida
- Aluminiij (Al) povećava otpornost na oksidaciju, formira stabilni oksidni sloj
- Vanadij (V) u čeliku tvori karbide (VC ili V_4C_3) koji povećavaju čvrstoću i tvrdoću, a u kombinaciji s elementima poput nikla i molibdena poboljšava žilavost

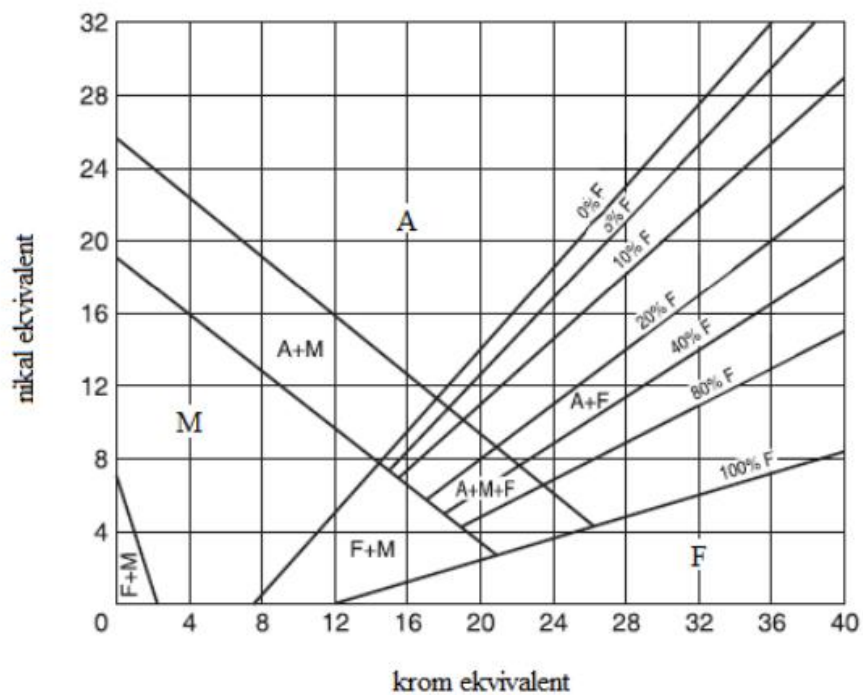
Gamageni elementi i njihove glavne karakteristike jesu sljedeće [15]:

- Nikal (Ni) poboljšava žilavost čelika na niskim temperaturama te povećava otpornost na visokotemperaturnu oksidaciju
- Mangan (Mn) djeluje kao antioksidans čime se smanjuje količina neželjenih oksida u čeliku, a poboljšava i duktilnost
- Ugljik (C) značajno povećava čvrstoću i tvrdoću čelika, ali smanjuje otpornost na koroziju formirajući karbide kroma na granicama zrna
- Dušik (N) povećava čvrstoću uz minimalno smanjenje žilavosti i povećava otpornost na rupičastu koroziju
- Bakar (Cu) povećava otpornost na koroziju u određenim kiselinama i poboljšava obradivost i deformabilnost

Dobar uvid u postizivu mikrostrukturu na osnovi poznatog kemijskog sastava daju tzv. strukturni dijagrami, od kojih je najviše korišten Schaefflerov dijagram (slika 16). On se koristi u definiranju strukturnog stanja nehrđajućih čelika na temelju Cr-ekvivalenta (Cr_e) i Ni-ekvivalenta (Ni_e) [16]. Izraz za računanje Cr-ekvivalenta dan je u jednadžbi (1), a Ni-ekvivalenta u jednadžbi (2).

$$Cr_e = \%Cr + 2 * (\%Si) + 1,5 * (\%Mo) + 0,5 * (\%V + \%Nb + \%Ti) + 1 * (\%Al) \quad (1)$$

$$Ni_e = \%Ni + 30 * (\%C) + 0,5 * (\%Mn) + 0,6 * (\%Cu) + 20 * (\%N) + 0,5 * (\%Co) \quad (2)$$



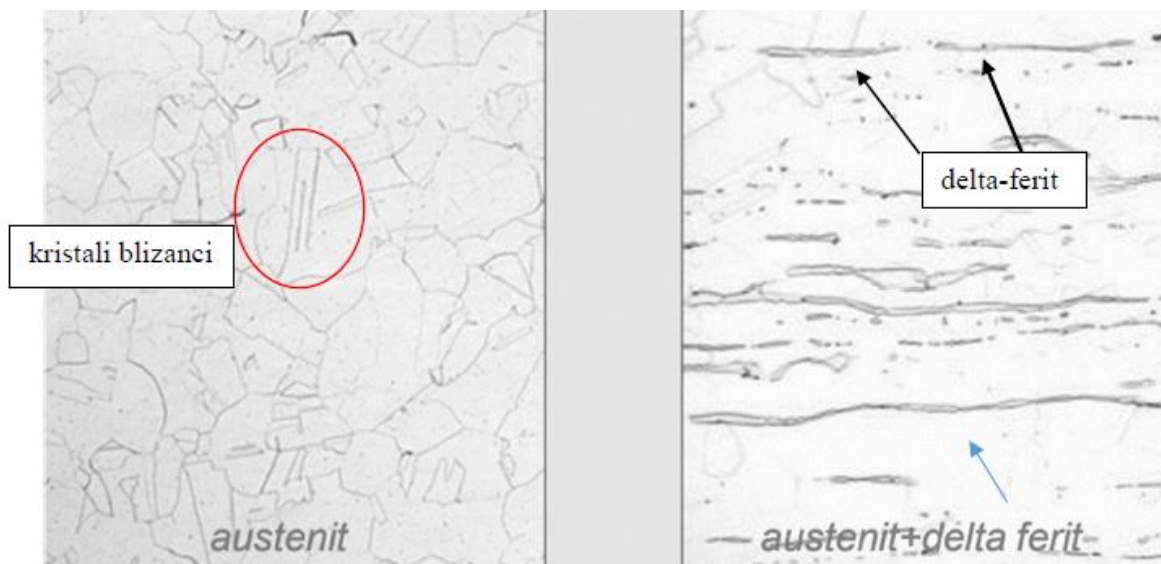
Slika 16: Schaefflerov dijagram [16]

3.4. Austenitni nehrđajući čelici

Austenitni čelici se legiraju s Cr i Ni koji proširuju austenitno područje sve do sobne temperature. Karakteristike kemijskog sastava austenitnih nehrđajućih čelika jesu sljedeće [16]:

- Maseni udio ugljika treba biti što manji ($<0,15\%C$), kako bi se smanjila mogućnost nastanka karbida tipa ($Cr_{23}C_6$)
- Maseni udio kroma treba biti visok ($>18\%$), zbog uvjeta antikorozivnosti
- Maseni udio nikla također treba biti što viši ($>8\%$) jer Ni kao gamageni element mora nadvladati alfa-geno djelovanje Cr, čime se osigurava austenitna mikrostruktura
- Dodatno legiranje s Mo, Ti, Nb, Ta pospješuje pojavu 5-10 % ferita u mikrostrukturi i poboljšava otpornost na interkristalnu koroziju
- Povišen maseni udio dušika (0,2-0,4 %) doprinosi povećanju čvrstoće i otpornosti na jamičastu i napetosnu koroziju

Mikrostruktura austenitnih nehrđajućih čelika može biti monofazno austenitna ili austenitno-feritna (s 5 do 10 % δ -ferita) kako je prikazana na slici 17.



Slika 17: Mikrostrukture austenitnih nehrđajućih čelika [17]

Mikrostruktura sastavljena samo od austenita osigurava dobru otpornost na koroziju i visoku žilavost, ali povećava vjerojatnost nastanka toplih pukotina.

Brzo hlađenje s visokih temperatura potiče transformaciju dijela austenita u delta-ferit, koji se zadržava sve do sobne temperature. Delta-ferit smanjuje otpornost na rupičastu i koroziju u procijepu, smanjuje žilavost i istežljivost, otežava toplu preradu te povećava opasnost od nastanka sigma faze na povišenim temperaturama [18].

Karakteristike austenitnih čelika jesu sljedeće[16]:

- Nemagnetičnost zbog austenitne strukture
- Mogućnost oblikovanja u hladnom stanju
- Dodatno legiranje s molibdenom (Mo), volframom (W) i vanadijem (V) pruža otpornost na puzanje pri temperaturama iznad 600 °C
- Zadovoljavajuća žilavost pri niskim temperaturama
- Otpornost na kiseline, lužine i soli
- Podložnost interkristalnoj koroziji u određenim uvjetima

Austenitni nehrđajući čelici se koriste u mnogim industrijama zbog njihove odlične korozijske postojanosti. Unatoč korozijskoj otpornosti, austenitni nehrđajući čelici mogu biti osjetljivi na specifične oblike korozije poput rupičaste korozije i korozije u procijepu, posebno u agresivnim medijima kao što je morska voda. Zbog niske tvrdoće i relativno niske otpornost na trošenje, ograničena je njihova primjena u područjima s intenzivnim mehaničkim opterećenjem [19].

Sa svrhom poboljšanja otpornosti na trošenje austenitnih nehrđajućih čelika, često se primjenjuju metode inženjerstva površine koje mijenjaju svojstva površinskih slojeva s pomoću postupaka prevlačenja. Tu pripadaju metode kao što su kemijsko prevlačenje iz parne faze (CVD) i fizikalno prevlačenje iz parne faze (PVD). Također se primjenjuju i difuzijski postupci poput nitriranja i pougljičavanja [19].

4. GALVANIZACIJA

Galvanizacija je postupak nanošenja prevlake metala iz elektrolita ili taline koristeći električnu struju s ciljem dobivanja željenih svojstava ili dimenzija površine materijala na koji se prevlaka nanosi [20].

Galvanske prevlake nanose se da bi površina osnovnog materijala dobila neka od sljedećih svojstava: otpornost prema koroziji, kemijsku inertnost, otpornost na trošenje, veće dimenzije, veću ili manju električnu vodljivost, bolju lemljivost, intenzivniji sjaj, veću ili manju magnetičnost, manji koeficijent trenja ili bolji estetski dojam.

Elektroliti korišteni za galvanizaciju su uglavnom vodene otopine, iako se ponekad koriste nevodene otopine ili taline. Vodljivi materijali mogu se izravno galvanski prevlačiti, dok se na nevodljive podloge mora prvo nanijeti vodljivi međusloj nekim drugim postupkom. Metali su najkorišteniji materijali za međusloj.

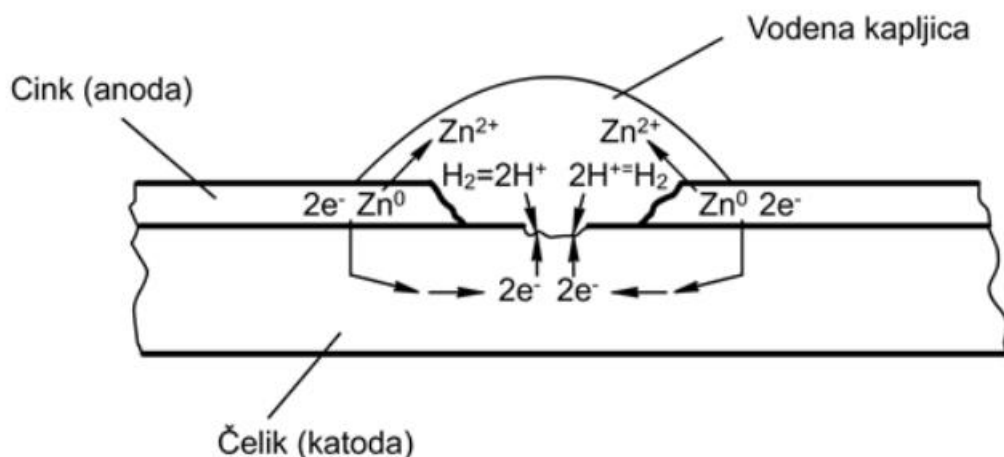
Galvanizacija se uobičajeno provodi tako da se obratci urone u elektrolit i spoje s negativnim polom (katoda) izvora istosmjerne struje niskog napona. Da bi se strujni krug zatvorio, u elektrolit se uranja i vodljivi materijal spojen s pozitivnim polom (anoda). Anode mogu biti netopive i topive. Netopive anode služe samo kao kontakt izvora s elektrolitom. Topive anode, uz ostvarivanje kontakta s elektrolitom, otapanjem nadoknađuju metal koji se izlučuje iz elektrolita na obradak u obliku prevlake. U ovom slučaju materijal anode mora biti istovjetan materijalu prevlake.

Masa m prevlake izlučene galvanizacijom, prema Faradayevom zakonu, određena je izrazom (3):

$$m = \frac{\eta_k * M * I * t}{z * F} \quad (3)$$

Gdje je η_k katodno iskorištenje struje, M molarna masa atoma metala prevlake, I jakost električne struje, t vrijeme obrade, z valencija metala u ionima otopljenim u elektrolitu i F Faradayeva konstanta.

Galvanizacijom se često nanose prevlake cinka na čelike gdje se traži dodatna zaštita od korozije. Cinkova prevlaka štiti osnovni metal na dva načina, kao barijera između osnovnog metala i okoliša te kao galvanski protektor (slika 18).



Slika 18: Galvanska zaštita čelika cinkovom prevlakom [21]

Zaštitna učinkovitost cinkove prevlake raste s debljinom prevlake. Lokalno povećanje pH-vrijednosti uslijed sporog korodiranja prevlake također doprinosi zaštiti ogoljenih dijelova čelične površine. U usporedbi s drugim metalima, cink je relativno jeftin i često se koristi za zaštitu od atmosferske korozije [20].

Galvansko prevlačenje cinkom provodi se u kiselim kloridnim, alkalnim necijanidnim, i najčešće (oko 70%) u cijanidnim kupkama. Pri radu s cijanidnim kupkama treba biti oprezan jer su izrazito toksične. Tipična debljina prevlaka iznosi 2 do 5 μm .

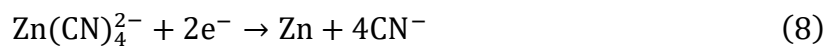
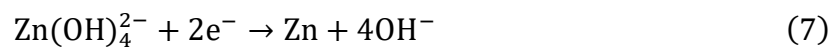
Osnovne cinkove soli korištene za pripremu kiselih elektrolita su Zn-sulfat i Zn fluorid, koji disociraju prema reakcijama (4) i (5).



Primarna komponenta cijanidnih elektrolita za pocinčavanje je kompleksna sol natrijev cinkcijanid $\text{Na}_2[\text{Zn}(\text{CN})_4]$, koji disocira prema reakciji (6).



Prema tome, cink je u elektrolitu vezan u kompleksnim anionima i nastajanje galvanizacijom može se prikazati reakcijom redukcije Zn-aniona, prema (7) i (8).



Da bi koncentracija cinkovih iona u kupci tijekom galvanizacije bila konstantna, potrebno je koristiti taljive anode od cinka [22].

5. ELEKTROKEMIJSKA ISPITIVANJA KOROZIJE

5.1. Osnovne metode elektrokemijskih ispitivanja

Ispitivanja elektrokemijske korozije mogu pružiti korisne informacije o elektrokemijskim reakcijama korozije i mehanizmima koji stoje iza njih. Za izvođenje ove vrste testa obično se koristi instrument potenciostat (slika 19). Obično se koriste sustavi s tri elektrode, koje uključuju: radnu elektrodu (ispitni uzorak), referentnu elektrodu (elektroda poznatog potencijala – zasićena kalomel elektroda potencijala $E_{SCE} = +0,242 \text{ V}$) i pomoćne elektrode (dvije grafitne protuelektrode).

Potencijal, struja i vrijeme tri su važna parametra u elektrokemijskim ispitivanjima. U tim se ispitivanjima uspostavlja određeni potencijal na radnoj elektrodi i mjeri se struja odziva sustava.



Slika 19: Potenciostat i elektrokemijska ćelija [23]

Uzorci za ispitivanje elektrokemijske korozije moraju biti električni vodiči i biti dovoljno mali da stanu u ispitnu ćeliju. Komponente se mogu ispitati u cjelini ili kao posebno pripremljeni manji dijelovi za ispitivanje. Najčešće metode elektrokemijskog ispitivanja korozije jesu:

- određivanje polarizacijskog otpora metodom linearne polarizacije

- određivanje korozijskog potencijala
- određivanje gustoće korozijske struje metodom Tafelove ekstrapolacije
- ciklička polarizacija.

Navedene metode daju sustavni uvid u korozijsko ponašanja materijala i mogućnost usporedbe s drugim materijalima i okolinama.

5.2. Metoda Tafelove ekstrapolacije

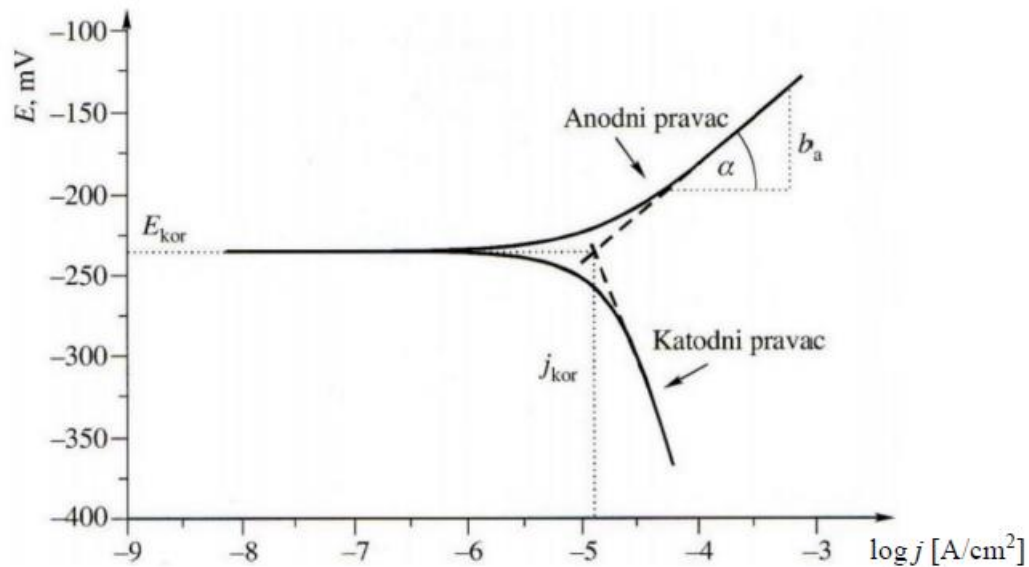
Tafelova krivulja je krivulja anodne i katodne polarizacije (slika 20). Rezultati koji se dobivaju na temelju anodne i katodne polarizacije prikazane su u grafičkom obliku ($E - \log j$). S pomoću sjecišta ekstrapoliranih Tafelovih pravaca (anodni i katodni pravci) određuju se vrijednosti korozijskog potencijala E_{kor} i gustoće korozijske struje j_{kor} . Brzina korozija se tada izračunava na temelju vrijednosti gustoće korozijske struje j_{kor} [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$], ekvivalentne mase EW [g] i gustoće ρ [g/cm^3] [24]:

$$v_{kor} = \frac{0,0033 \times j_{kor} \times EW}{\rho} \left[\frac{\text{mm}}{\text{god.}} \right] \quad (9)$$

Ekvivalentna masa je ona masa tvari koja troši 1 mol elektrona u redoks procesu [24]:

$$EW = \sum_{i=1} \frac{f_i \times M_{ri}}{\eta_i} \text{ [g]} \quad (10)$$

gdje je f_i – maseni udio i-tog elementa, M_{ri} – relativna atomska masa i-tog elementa i η_i – broj otpuštenih elektrona.



Slika 20: Tafelova krivulja [24]

5.3. Metoda linearne polarizacije

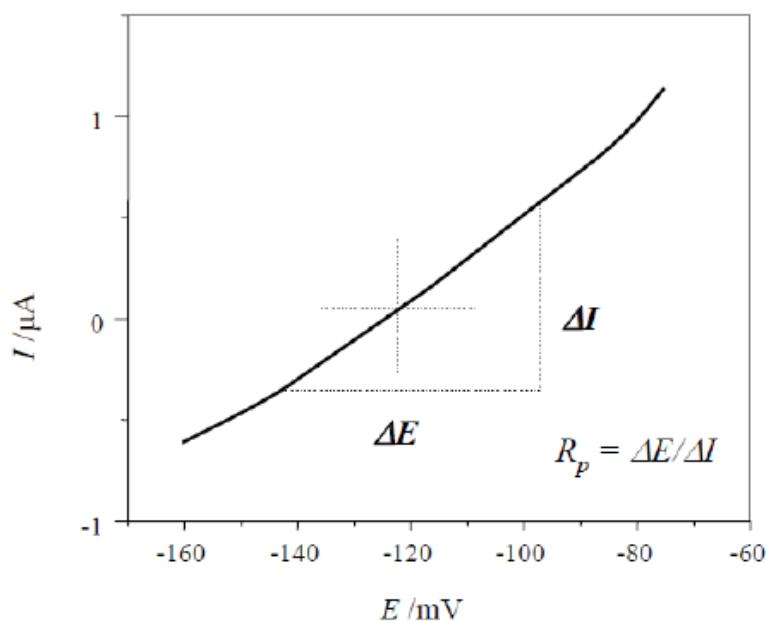
Polarizacijski otpor je mjera otpora metala prema koroziji, a definira se nagibom krivulje struja – potencijal u posrednoj blizini korozijskog potencijala ($E = E_{kor} \pm 20$ mV). Odnos struje potencijala u tom području je linearan (linearna polarizacija). Vrijednost polarizacijskog otpora, R_p , određuje se iz nagiba pravca prema jednadžbi [25]:

$$R_p = \frac{S \Delta E}{\Delta I}, \quad (11)$$

gdje je:

- R_p – polarizacijski otpor [$\Omega \cdot \text{cm}^2$],
- S – površina radne elektrode [cm^2],
- E – potencijal [mV],
- I – jakost struje [A].

Određivanje polarizacijskog otpora je prikazano na slici 21.

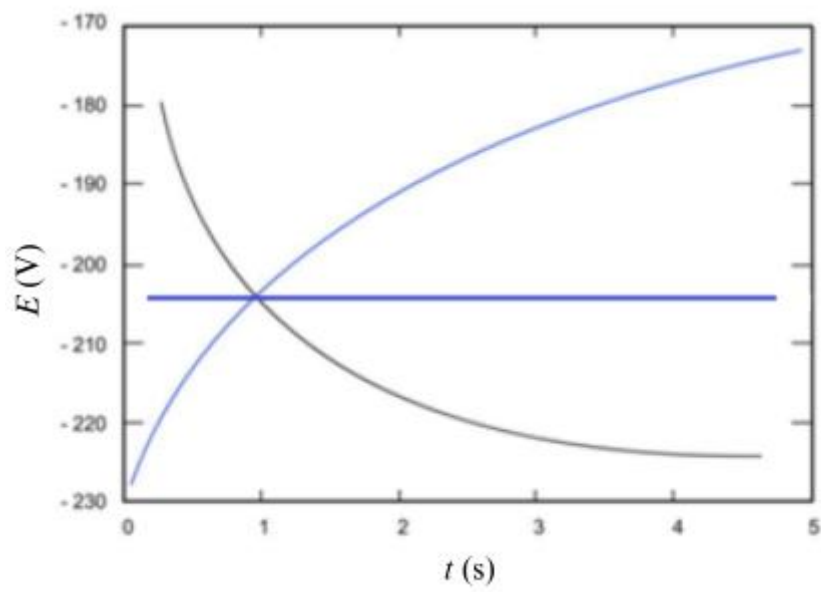


Slika 21: Određivanje polarizacijskog otpora [25]

5.4. Određivanje korozijskog potencijala

Stabiliziranje sustava metal-elektrolit je potrebno prije provođenja polarizacijskog mjerenja. To se odvija na način da nakon što se metal uroni u elektrolit, električni krug između radne i protuelektrode se ostavlja otvorenim, a razlika potencijala između referentne i radne elektrode se prati kao funkcija vremena.

Nakon nekog vremena postiže se približno stacionarno stanje s potencijalom koji odgovara potencijalu otvorenog strujnog kruga E_{ok} ili korozijskom potencijalu E_{kor} . Podatke o kemijskog otpornosti materijala u određenom mediju, moguće je dobiti praćenjem vremenskih promjena stacionarnog potencijala otvorenog strujnog kruga E_{ok} . Pozitivne vrijednosti E_{ok} ukazuju na stabilnost elektrode te na otpornost uzorka na ispitnu otopinu, dok negativne vrijednosti ukazuju na nestabilnost, odnosno otapanje (koroziju). U slučaju da se vrijednosti mijenjaju iz negativnih prema pozitivnima, dolazi do spontane pasivacije. Korozijski potencijal se određuje u dijagramu $E-t$, a to je prikazano na slici 22 [26].



Slika 22. Određivanje korozivnog potencijala [26]

6. EKSPERIMENTALNI DIO

6.1. Izbor ispitnih uzoraka spiralno-metalnih brtvi

Ekperimentalni dio rada je proveden u laboratorijima Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu uz suradnju tvrtke STSi d.o.o. koja je omogućila spiralno-metalne brtve za analizu i ispitivanja. Jedna od zadaća STSi-a je održavanje opreme u rafinerijskim i naftno-plinskim postrojenjima, benzinskim postajama, kompresorskim stanicama i plinovodima, platformama na moru te bušačim i remontnim postrojenjima. Jedno od takvih postrojenja je CPS Molve gdje se obrađuje i pročišćuje plin i koriste se brtve ispitivane u ovom radu.. U postrojenjima za pročišćavanje plina oprema je često izložena visokim temperaturama i tlakovima što dovodi do trošenja elemenata poput ventila i zasuna. Na donjoj slici 22 prikazani su ventili plinovoda pripremljeni za servis u pogonu CPS Molve.



Slika 23. Ventili plinovoda pripremljeni za servis

To su ventili s prirubnicama, na kojima se za postizanje nepropusnog spoja koriste spiralno-metalne brtve od nehrđajućeg čelika (slika 24).



Slika 24. Ventil sa spiralno-metalnom brtvom

Ventili su konstruirani da izdrže unutarnji tlak do određene granice koja se zove „ocjena tlaka ventila“. Povećanjem ocjene tlaka raste i potrebna debljina stijenke ventila čime se sprječava njegovo pucanje. Temperatura također utječe na ventil, odnosno s porastom radne temperature, ventil može izdržati manji tlak.

Para, kao jedan od problematičnijih medija, može uzrokovati kavitacijska oštećenja na unutrašnjosti ventila (slika 25) što dovodi do popuštanja prirubničkog spoja i na kraju do propuštanja medija. Zbog toga je izrazito važno i odabrati odgovarajuću brtvu, a do sada su se za tu ulogu najbolje pokazale spiralno-metalne brtve. Međutim i tu ima mjesta za poboljšanja za postizanje još nepropusnijih, sigurnijih spojeva.

6.2. Plan ispitivanja

Jedan pristup u poboljšavanju svojstava brtvi usmjeren je prema preporukama za poboljšavanje svojstava ventila i obrade brtvenih površina na njima. Oni se proizvode većinom lijevanjem (najjeftinija tehnologija), unutarnje i vanjske površine nisu najbolje kvalitete i moglo bi ih se poboljšati nekim od postupaka završne obrade i postupcima modificiranja površine. Na taj način smanjit će se trošenje uzrokovano prolaskom medija.



Slika 25. Kavitacijska oštećenja na ventilu

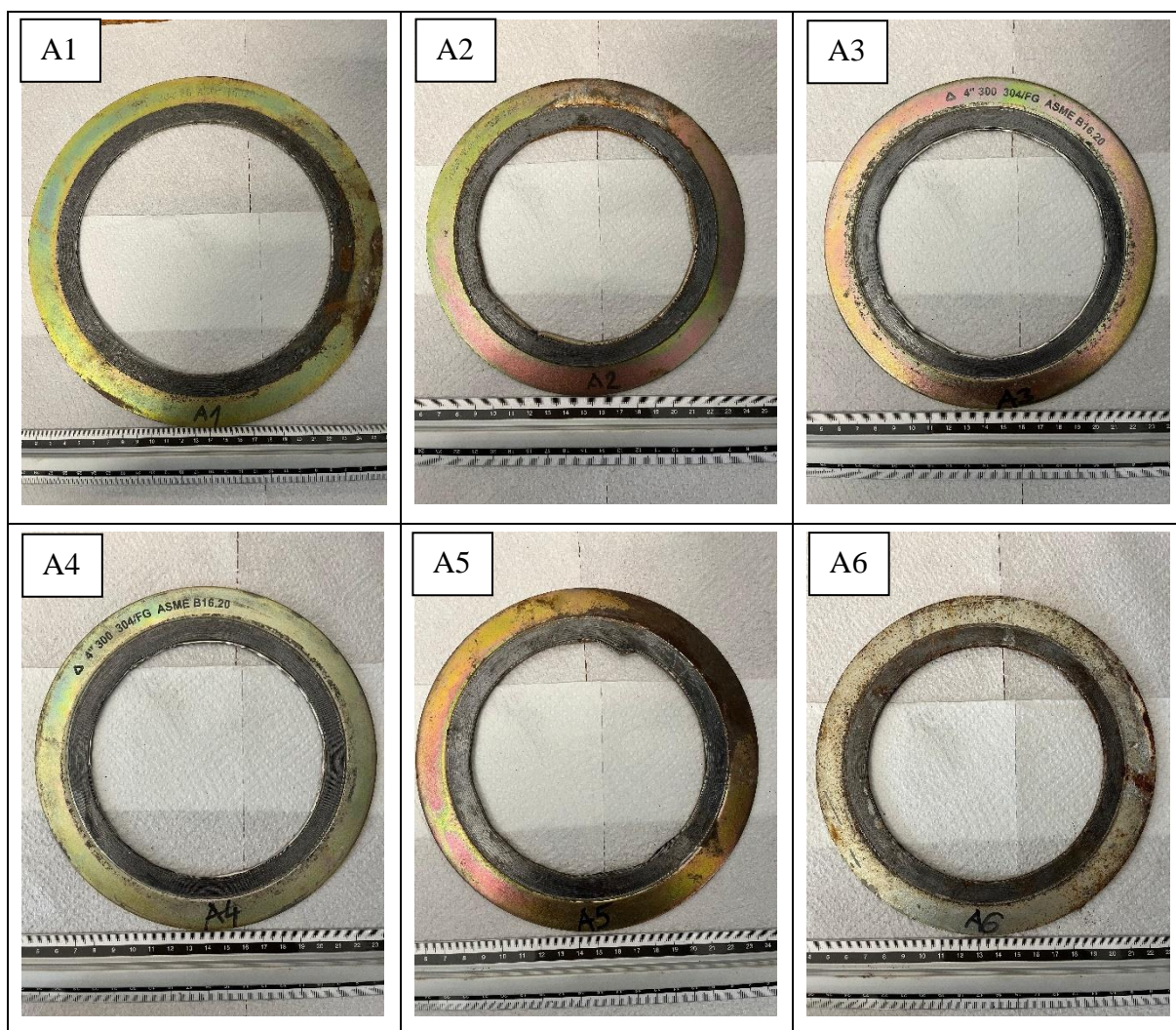
Drugi pristup u poboljšavanju svojstava brtvi usmjeren je na produljenje uporabnog vijeka brtvi na temelju spoznaja iz ispitivanja svojstava postojećih brtvi. Stoga su u ovome radu provedena sljedeća ispitivanja:

- Analiza i sistematizacija oštećenja visokotlačnih brtvi
- Određivanje kemijskog sastava i mjerenje debljine prevlake
- Ispitivanje tvrdoće
- Analiza mikrostrukture
- Ispitivanje hrapavosti
- Ispitivanje otpornosti na elektrokemijsku koroziju

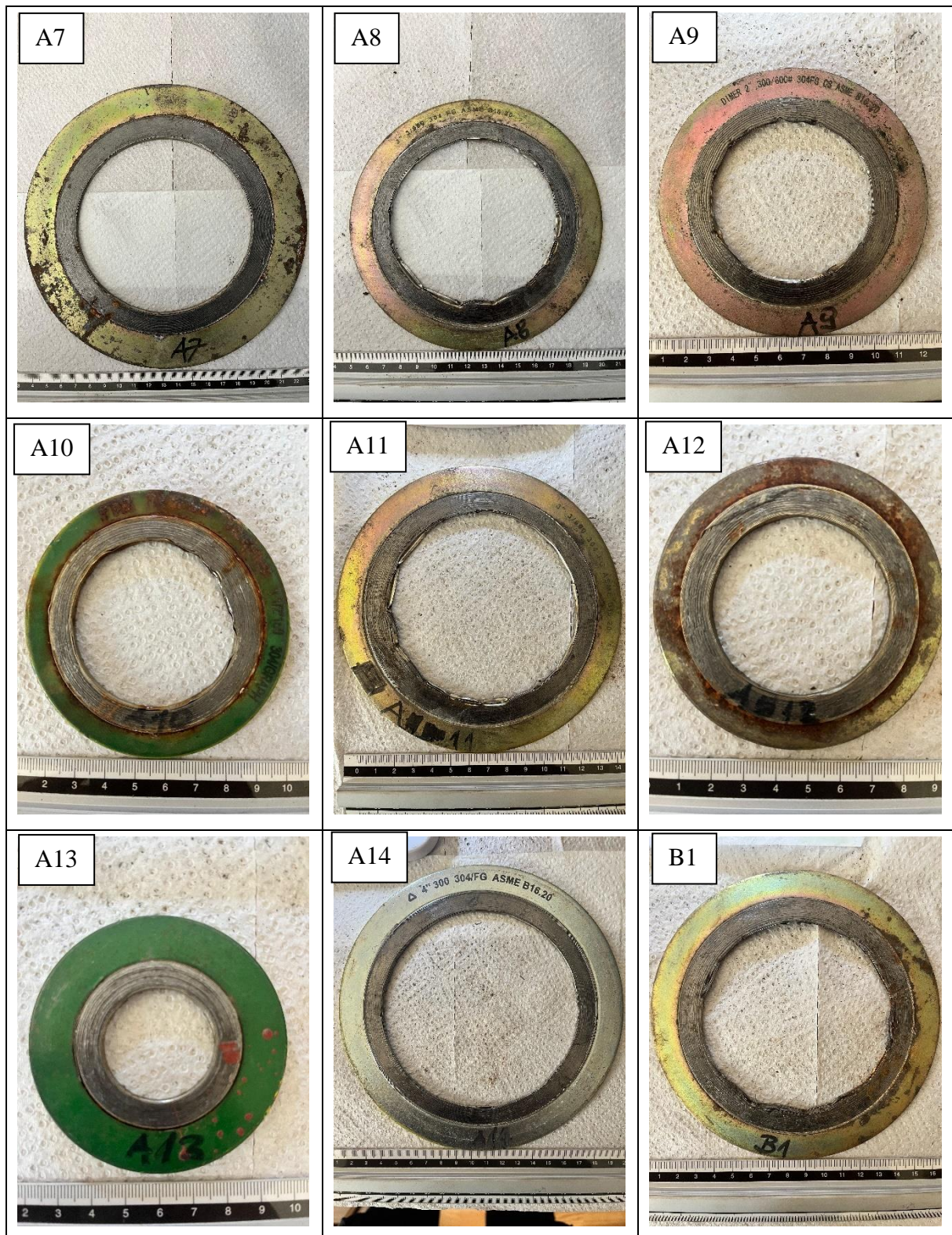
6.3. Klasifikacija brtvi

Prije analize i ispitivanja, spiralno-metalne brtve su ovisno o materijalu brtvenog dijela i broju prstenova podijeljene u razrede „A“, „B“ i „C“ te označene brojevima. U „A“ razred su pripale brtve čiji je spiralni dio od nehrđajućeg čelika X5CrNi18-10 (AISI 304), dok su u „B“ razredu od nehrđajućeg čelika X5CrNiMo17-12-2 (AISI 316). Razred „C“ se razlikuje od prethodna dva razreda po tome što brtve imaju i unutarnji prsten. Svi uzorci su prikazani u tablici 1.

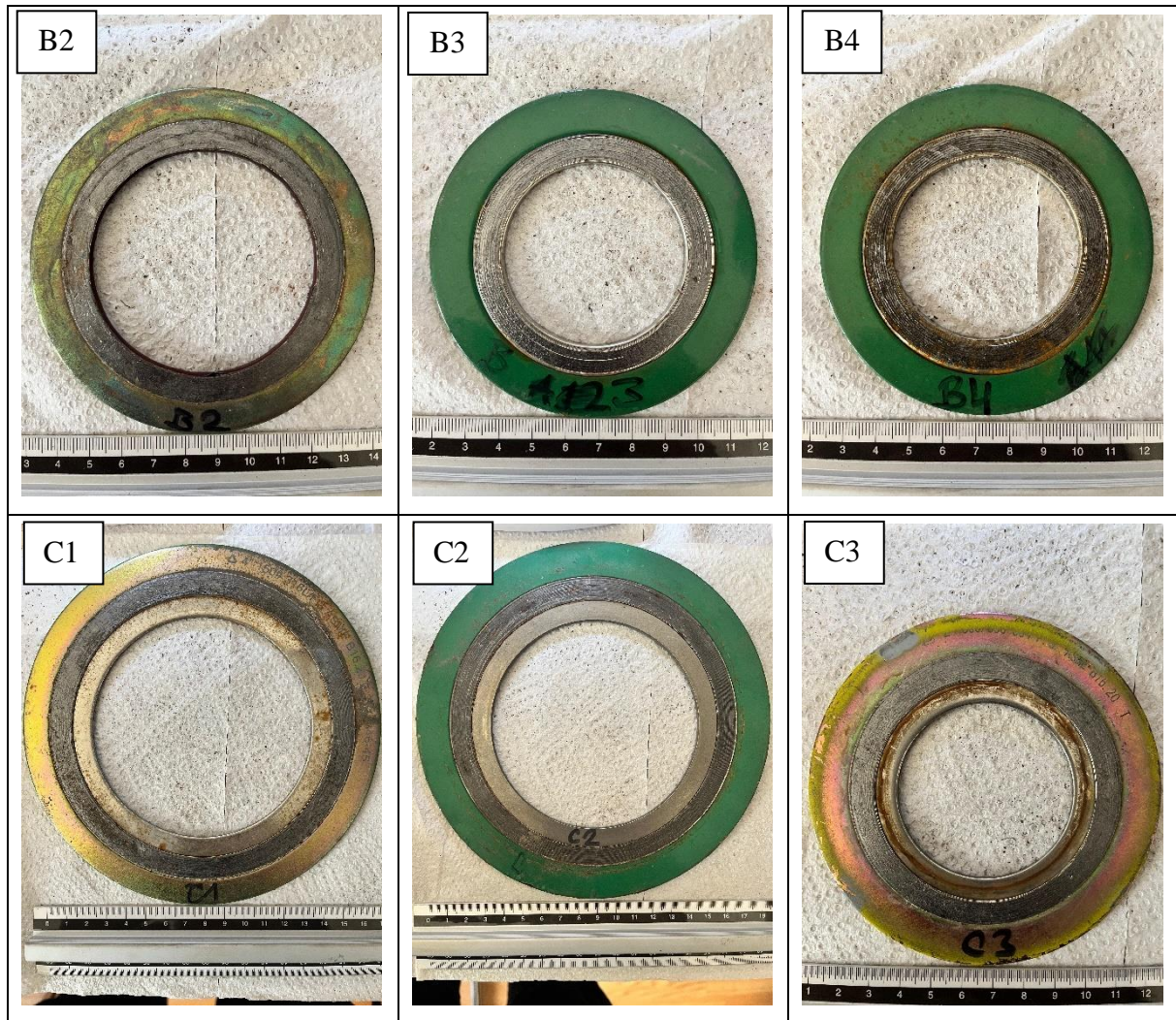
Tablica 1. Označavanje brtvi



Tablica 1. Označavanje brtvi (nastavak)



Tablica 1. Označavanje brtvi (nastavak)



6.4. Određivanje kemijskog sastava dijelova spiralno-metalne brtve

Analiza kemijskog sastava brtvi provedena je XRF metodom (engl. *X-ray fluorescence*). To je nerazorna metoda koja koristi rendgensko zračenje za pobuđivanje atoma ispitivanog uzorka, što dovodi do emisije fluorescentnog zračenja iz materijala, a ono je karakteristično za elementarni sastav. Na temelju tih informacija dobiva se kvalitativna i kvantitativna slika o kemijskom sastavu uzoraka.

Određen je kemijski sastav na tri brtve oznaka A3, A14 i C2. Korišten je uređaj XRF Olympus proizvođača Innov-X Systems. Ispitni uzorci (brtve) su postavljeni u olovnu kutiju zbog zaštite od utjecaja rendgenskih zraka. Postupak je prikazan na slici 26.



Slika 26. Određivanje kemijskog sastava vanjskog prstena brtve C2

U tablici 2 nalaze se rezultati ispitivanja uzorka A3.

Tablica 2. Rezultati XRF analize brtve A3

A3	Vanjski prsten		Spiralni dio	
	Udio (%)	Odstupanje (+/-)	Udio (%)	Odstupanje (+/-)
Si	0,37	0,05	2,16	0,08
P	-	-	0,017	0,003
S	0,46	0,01	4,51	0,03
V	-	-	0,11	0,03
Cr	0,46	0,03	16,1	0,16
Mn	0,11	0,02	1,46	0,08
Fe	39,68	0,18	63,26	0,35
Co	0,41	0,05	0,63	0,1
Ni	-	-	10,57	0,17
Cu	-	-	0,53	0,05
Zn	58,51	0,21	0,28	0,02
Mo	-	-	0,327	0,009
Pb	-	-	0,04	0,01

XRF analiza je pokazala da je vanjski prsten brtve A3 izrađen od ugljičnog pocinčanog čelika, a spiralni dio je od nehrđajućeg čelika koji odgovara čeliku X5CrNi18-10 (AISI 304). Važno je spomenuti kako ova metoda nema mogućnost detektiranja ugljika.

Isti postupak je ponovljen za brtve A14 i C2, a rezultati se nalaze u tablici 3 i tablici 4.

Tablica 3. Rezultati XRF analize brtve A14

A14	Vanjski prsten		Spiralni dio	
	Element	Udio (%)	Odstupanje (+/-)	Udio (%)
Si	0,12	0,04	0,66	0,06
P	-	-	0,163	0,004
S	0,098	0,009	1,55	0,02
Cr	0,07	0,02	15,29	0,16
Mn	0,05	0,01	1,7	0,09
Fe	14,08	0,1	70,79	0,39
Co	0,45	0,03	0,76	0,12
Ni	-	-	8,59	0,17
Zn	85,12	0,23	0,35	0,03
Zr	-	-	0,024	0,004
Mo	-	-	0,053	0,006
Pb	-	-	0,06	0,01

Po kemijskom sastavu brtva A14 je očekivano slična brtvi A3, a razlika je u masenim udjelima elemenata te prisutnosti pojedinih legirnih elemenata. Spiralni dio brtve A3 sadržava i male količine vanadija i bakra, dok spiralni dio brtve A14 ima i cirkonija. Brtva A14 sadrži znatno više cinka u vanjskom prstenu.

Tablica 4. Rezultati XRF analize brtve C2

C2	Vanjski prsten		Spiralni dio i unutarnji prsten	
	Udio (%)	Odstupanje (+/-)	Udio (%)	Odstupanje (+/-)
Al	6,65	0,62	-	-
Si	10,69	0,16	3,6	0,09
P	0,198	0,005	0,068	0,003
S	1,32	0,04	1,03	0,02
V	-	-	0,11	0,03
Cr	11,74	0,18	16,19	0,13
Mn	1,26	0,09	1,13	0,07
Fe	55,23	0,38	66,34	0,3
Co	1,04	0,12	-	-
Ni	7,35	0,16	9,16	0,14
Cu	-	-	0,31	0,03
Zn	1,18	0,05	0,13	0,01
Zr	0,044	0,006	-	-
Mo	3,25	0,03	1,87	0,02
Pb	0,05	0,01	0,05	0,01

Brtva C2 se osim po strukturi (ima unutarnji prsten), razlikuje i po kemijskom sastavu od ostalih brtvi. Vanjski prsten građen je od nehrđajućeg čelika te je prevučen Al-Si prevlakom. Sadrži i veći postotak molibdena koji čeliku daje dodatnu otpornost na koroziju. Spiralni dio i unutarnji prsten brtve građeni su od istog materijala koji odgovara nehrđajućem čeliku X5CrNiMo17-12-2 (AISI 316).

6.5. Mjerenje debljine prevlake

Debljina prevlake se odredila s pomoću uređaja E-12-S-AL, proizvođača Blue Technology. Radi se o prijenosnom uređaju sa sondom, koji induciranjem vrtložnih struja mjeri debljinu prevlake ili premaza. Prednost ove nerazorne metode je brzo dobivanje rezultata, a primjenjiva je samo za elektrovodljive materijale. Uređaj ima mogućnost detekcije cinka i aluminija, odnosno razlikuje pocinčani čelik od ugljičnog čelika i aluminija. Mjerno područje mu je od 0 μm do 2000 μm .

Izmjerena je debljina prevlake na pet brtvi (A3, A4, A5, A10 i A13). Za svaku brtvu provedeno je pet mjerenja na različitim mjestima vanjskog prstena.

Na slici 27 prikazan je postupak mjerenja.



Slika 27. Mjerenje debljine prevlake brtve A3

U tablici 5 dani su rezultati mjerenja za brtve A3, A4 i A5. Te brtve sličnog su, gotovo identičnog kemijskog sastava, a prema rezultatima mjerenja su i jednako galvanski prevučene.

Tablica 5. Rezultati mjerenja debljine prevlake vrtložnim strujama brtvi A3, A4 i A5

	Brtva A3	Brtva A4	Brtva A5
Redni broj mjerenja	Debljina (μm)	Debljina (μm)	Debljina (μm)
1.	20	10	10
2.	20	10	10
3.	20	10	10
4.	20	10	10
5.	20	10	10

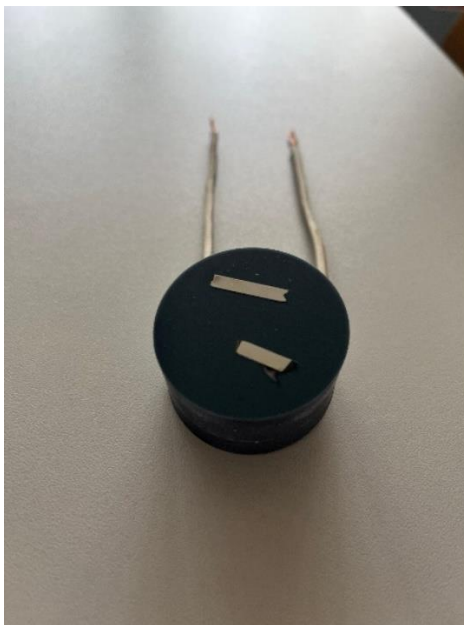
Brtve A10 i A13 imaju vanjski prsten zelene boje te osim cinka u prevlaci sadrže i aluminij koji je XRF uređaj očitao. Stoga su izmjerene debljine prevlaka većih vrijednosti od pocinčanih brtvi. Rezultati mjerenja navedeni su tablici 6.

Tablica 6. Rezultati mjerenja debljine prevlake vrtložnim strujama brtvi A10 i A13

	Brtva A10	Brtva A13
Redni broj mjerenja	Debljina (μm)	Debljina (μm)
1.	190	80
2.	220	90
3.	240	90
4.	240	100
5.	230	90
A	224	90

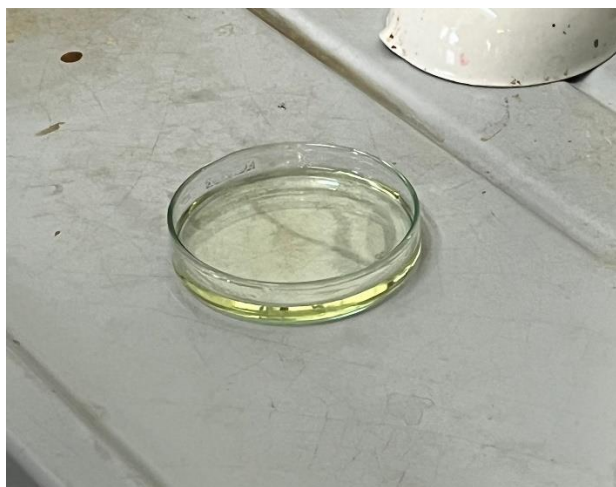
6.6. Analiza mikrostrukture prstena brtve

Za analizu mikrostrukture, metalografski su pripremljena dva uzorka. Izrezani su uzorci iz vanjskog prstena brtvi A4 i C3 te su zaliveni u polimernu masu (slika 28).



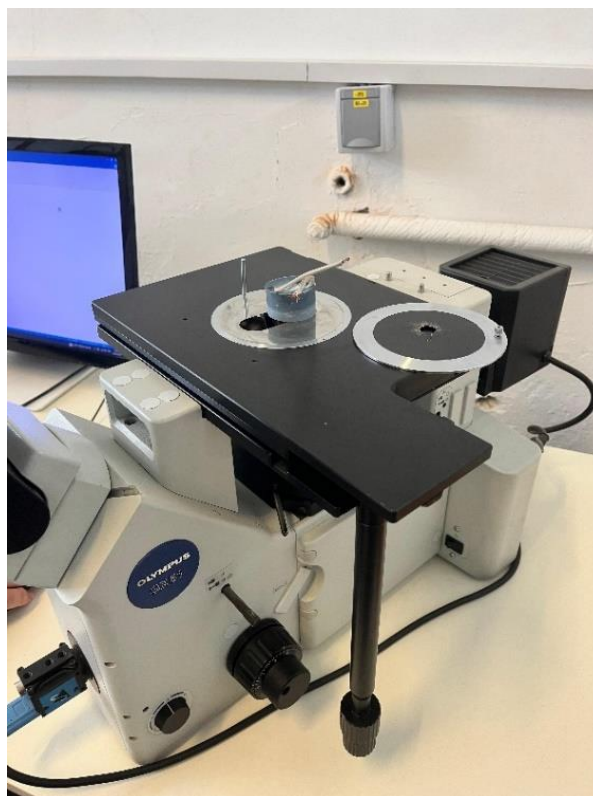
Slika 28. Uzorci zaliveni u polimernu masu

Prije analize svjetlosnom mikroskopijom, uzorci su nagriženi 3 % otopinom NITAL-a (slika 29) u trajanju od 15 sekundi, a kemijska reakcija je zaustavljena vodom. Nagrizanjem će se izraziti jasnije granice zrna, što će olakšati analizu mikroskopom.



Slika 29. 3 %-tna otopina NITAL-a

Analiza mikrostrukture provedena je na metalografskom mikroskopu Olympus GX51 (slika 30) pri povećanjima od 50×, 200× i 500×. Kamera mikroskopa spojena je na programski paket za obradu slike, mjerenje veličine zrna planimetrijskom metodom i metodom presjeka te određivanje debljine slojeva i prevlaka.



Slika 30. Metalografski mikroskop Olympus GX51

Mikrostruktura uzorka A4 je prikazana na slici 31, slici 32 i slici 33 uz različita povećanja.



Slika 31. Mikrostruktura uzorka A4, povećanje 50x

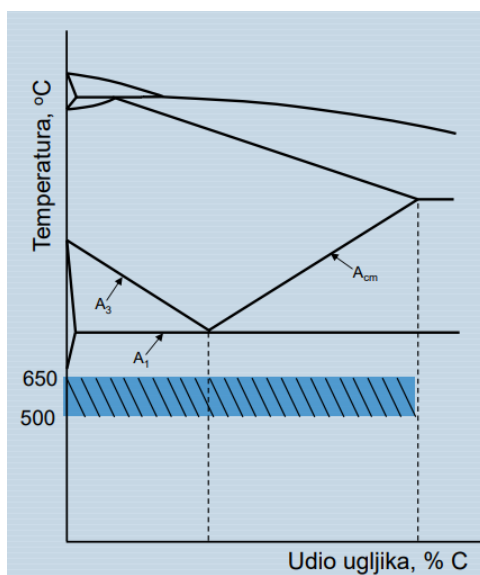


Slika 32. Mikrostruktura uzorka A4, povećanje 200x



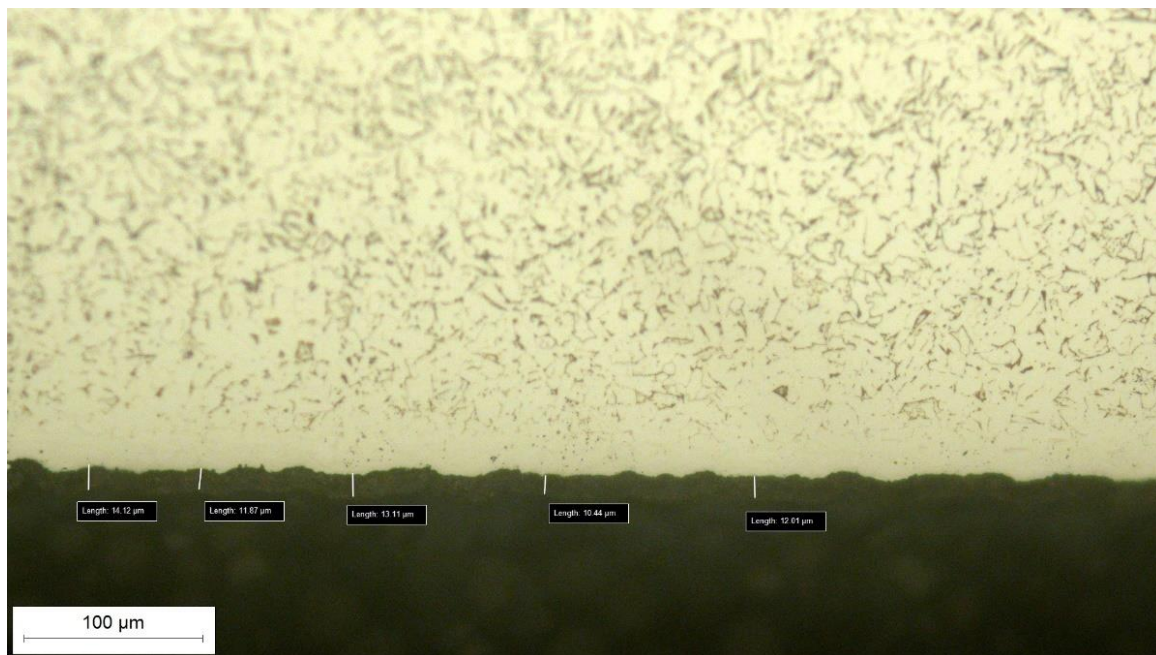
Slika 33. Mikrostruktura uzorka A4, povećanje 500x

Na slikama mikrostrukture uočava se ravnomjerna sitnozrnata feritna mikrostruktura. Takva mikrostruktura je deformabilna, što je izrazito važno u montaži prilikom centriranja vanjskog prstena na prirubnicu, ali i u eksploataciji gdje je brtva izložena visokim temperaturama i promjenama tlaka. Kristalna zrna su poligonalna jednolike veličine te upućuju na rekristalizacijski odžarenu mikrostrukturu. Rekristalizacijsko žarenje se provodi poslije hladnog oblikovanja radi povišenja duktilnosti i deformabilnosti [27]. Temperatura rekristalizacije kojom se postiže prikazana ravnomjerna veličina zrna uobičajeno se nalazi između 550 °C i 680 °C. Područje temperatura rekristalizacijskog žarenja nelegiranih čelika u Fe-C dijagramu prikazano je na slici 33.



Slika 34. Temperatura rekristalizacije [27]

Pri većim povećanjima na površini uzorka A4 dobro je vidljiva prevlaka cinka. Sloj cinka osigurava korozivsku postojanost vanjskog prstena brtvi. Debljina prevlake cinka je izmjerena na pet mjesta te je izračunata srednja vrijednost koja iznosi 12.31 μm . Ova debljina prevlake cinka približno odgovara debljini izmjerenoj metodom vrtložnih struja.



Slika 35. Izmjerene vrijednosti debljine sloja cinka, uzorak A4

Nakon analize mikrostrukture uzorka vanjskog prstena brtve A4, isto je napravljeno za brtvu C3. Mikrostrukture uzorka C3 se nalaze na slikama 36, 37 i 38.



Slika 36. Mikrostruktura uzorka C3, povećanje 200x

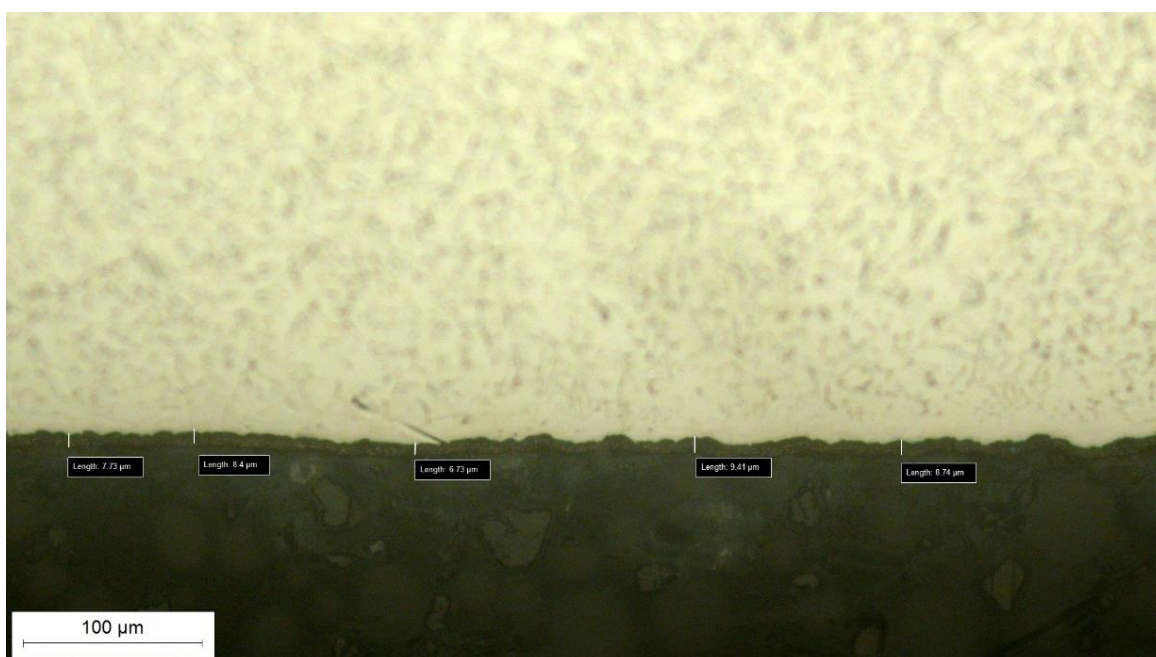


Slika 37. Mikrostruktura uzorka C3, povećanje 500x



Slika 38. Mikrostruktura uzorka C3, povećanje 1000x

Mikrostruktura uzorka vanjskog prstena brtve C3 je slična mikrostrukturi uzorka A4. Većinom je sitnozrnata feritna, a pri većim povećanjima (1000x) uočava se i perlit. Sloj cinka je malo tanji, sa srednjom vrijednosti debljine 8,20 μm. Izmjerene vrijednosti prikazane su se na slici 39.



Slika 39. Izmjerene vrijednosti debljine sloja cinka, uzorak C3

6.7. Ispitivanje tvrdoće

Poslije analize svjetlosnom mikroskopijom, na istim uzorcima (A4 i C3) je ispitana tvrdoća metodom Vickers. Korišten je tvrdomjer ZHV μ -S Micro Vickers, proizvođača Zwick Roell, prikazan na slici 40.



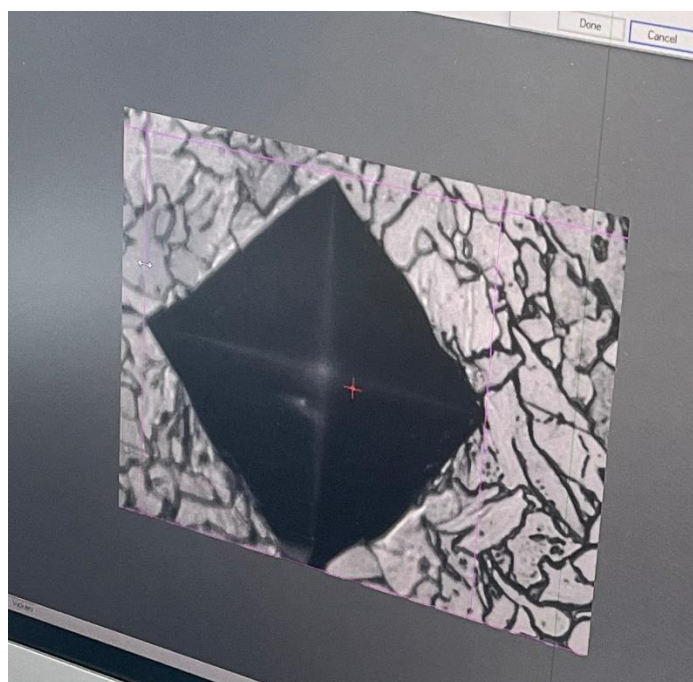
Slika 40. Tvrdomjer ZHV μ -S Micro Vickers

Vickers metoda koristi za indenter četverostranu dijamantnu piramidu s kutem između stranica iznosa 136°. Otisak indentora je četverokut čije se dijagonale mjere i koriste za izračunavanje tvrdoće (slika 41). Tvrdoća se izračunava prema izrazu:

$$HV \approx 0,1891 \frac{F}{d^2}, \quad (12)$$

gdje je:

- F – primijenjena sila, N,
- d – aritmetička sredina dijagonala d_1 i d_2 , mm [28].



Slika 41. Otisak indentora u uzorku A4

U provedenom ispitivanju korišteno je opterećenje od 4,903 N koje odgovara metodi Vickers HV0,5. Za svaki uzorak je napravljeno pet mjerenja i izračunata je srednja vrijednost tvrdoće. Rezultati su dani u tablici 7. Iz vrijednosti tvrdoće zaključuje se da su ispitani uzorci izrađeni od mekanog niskougličnog čelika sa srednjom tvrdoćom od 132,4 HV0,5, odnosno 129,6 HV0,5.

Tablica 7. Rezultati ispitivanja tvrdoće Vickers metodom

	Uzorak A4	Uzorak C3
Redni broj mjerenja	Tvrdoća (HV0,5)	Tvrdoća (HV0,5)
1.	134	132
2.	137	138
3.	132	131
4.	128	121
5.	131	126
A	132,4	129,6

6.8. Ispitivanje hrapavosti površine

Hrapavost površine je od velike važnosti prilikom kontakta brtve i prirubnice. Prevelika hrapavost može dovesti do propuštanja spoja, dok preniska može spriječiti uspostavljanje kvalitetnog kontakta između brtve i prirubnice, što će opet rezultirati propuštanjem medija. Hrapavost površine utječe i na distribuciju opterećenja preko brtve, tj. pravilno obrađenom površinom spriječit će se lokaliziranje opterećenja na brtvi. Kvalitetno obrađene površine bolje se ponašaju u dinamičkim uvjetima rada, uključujući promjene tlaka i vibracije koje su česte u industriji nafte i plina.

Hrapavost površine je ispitana na novim brtvama, koje nisu još bile u eksploataciji. Ispitivane brtve se prikazane su na slici 42.



Slika 42. Brtve za ispitivanje hrapavosti

Za ispitivanje je korišten elektromehanički uređaj s ticalom TIME 3202 (slika 43). Ticalo prelazi preko ispitivane površine, prati površinske neravnine te bilježi vertikalne pomake. Vertikalni pomaci se pretvaraju u električne signale koje uređaj dalje obrađuje.



Slika 43. Elektromehanički uređaj s ticalom TIME 3202

Dobiveni su podaci o parametrima hrapavosti (tablica 8):

- R_a – srednje aritmetičko odstupanje profila [μm]
- R_z – srednja visina neravnina [μm]
- R_{max} – najveća visina neravnina [μm]

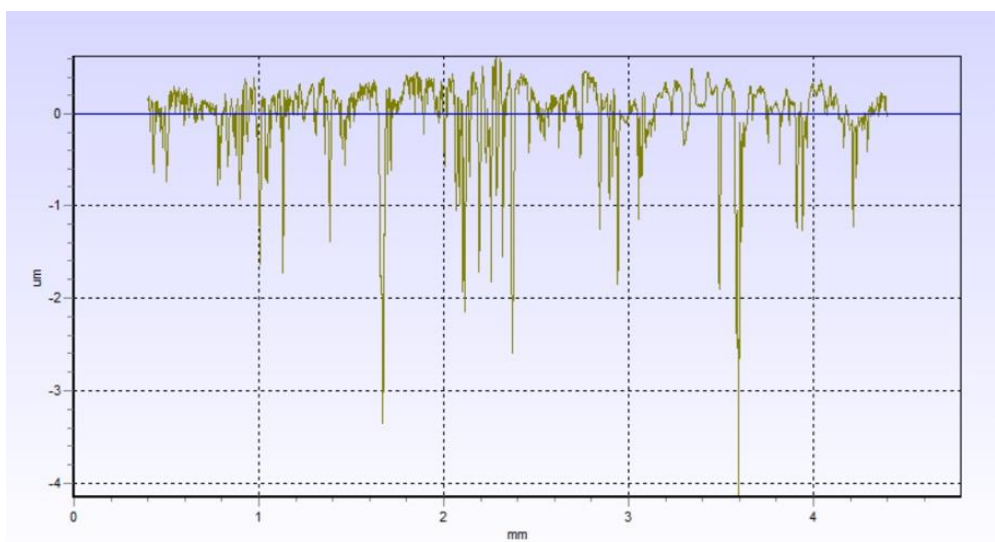
Tablica 8. Vrijednosti dobivenih parametara hrapavosti

Brtva D			Brtva E			Brtva F		
Unutrašnji prsten			Vanjski prsten			Vanjski prsten		
Ra	Rz	Rmax	Ra	Rz	Rmax	Ra	Rz	Rmax
[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]
0,26	2,625	4,765	1,734	9,375	12,44	1,208	6,515	7,919

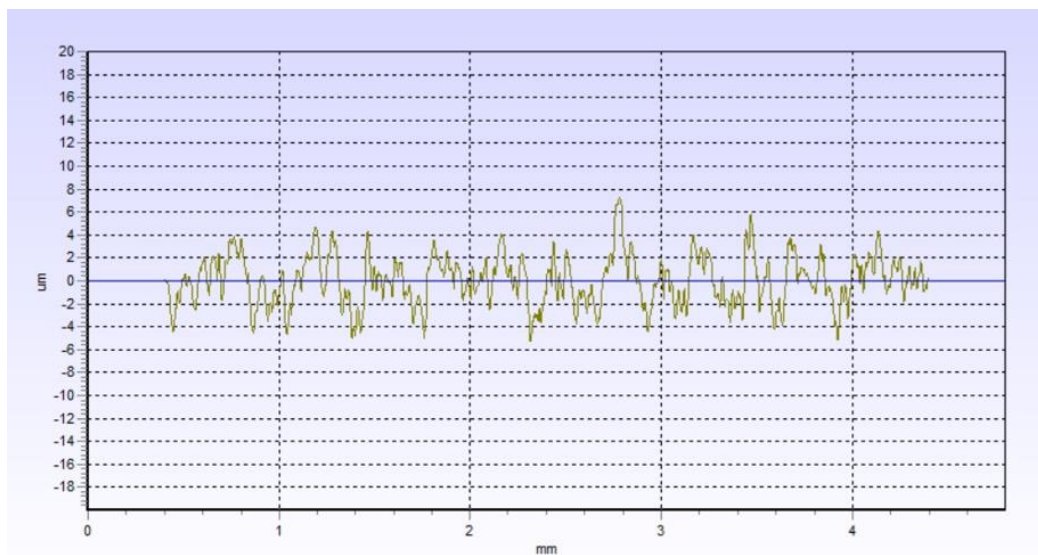
U tablici 8 uočavaju se znatno manje vrijednosti parametara hrapavosti unutrašnjeg prstena u odnosu na vanjski prsten, a to je objašnjeno različitošću uloga prstenova.

Spiralni dio brtve ne može se ispitati zbog zaustavljanja ticala na mekanom sloju grafita.

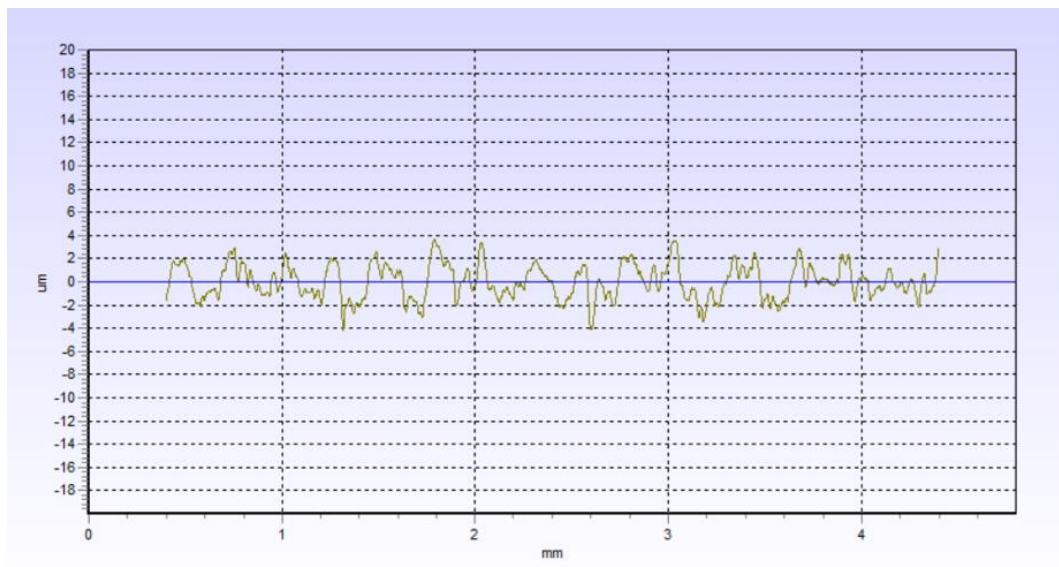
U nastavku na slikama 44, 45 i 46, nalaze se profili hrapavosti ispitivanih brtvi.



Slika 44. Profil hrapavosti površine na brtvi D



Slika 45. Profil hrapavosti površine na brtvi E



Slika 46. Profil hrapavosti površine na brtvi F

6.9. Ispitivanje korozijske postojanosti

Provedena su sljedeća tri elektrokemijska ispitivanja istosmjernom strujom:

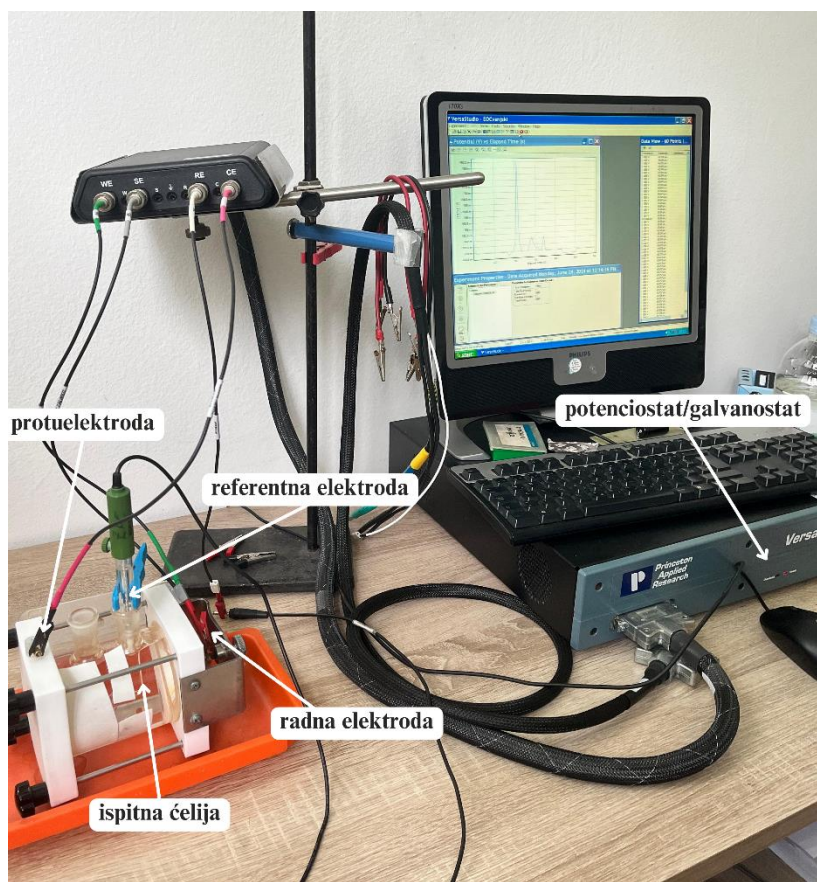
- Određivanje korozijskog potencijala E_{kor}
- Određivanje polarizacijskog otpora R_p metodom linearne polarizacije
- Određivanje brzine korozije v_{kor} metodom Tafelove ekstrapolacije

Za ispitivanja su pripremljena dva uzorka koja su zaokružena crvenom bojom na slici 47. Jedan od uzoraka bio je izrezan iz vanjskog prstena brtve A4, a drugi je izrezan iz spiralnog dijela brtve A3. Uzorci su prije ispitivanja oprani etanolom. Elektrolit u kojemu su provedena ispitivanja bila je 3,5 %-tna otopina NaCl. Površine ispitnih uzoraka izloženih elektrolitu iznosile su $0,785 \text{ cm}^2$. Sva ispitivanja su provedena na sobnoj temperaturi.



Slika 47. Pripremljeni uzorci za elektrokemijska ispitivanja istosmjernom strujom

Ispitivanja su provedena na uređaju potenciostat/galvanostat VersaSTAT3. Uređaj je povezan preko radne elektrode s ispitnom ćelijom, a uz pomoć softvera bilježe se rezultati. Kao referentna elektroda korištena je zasićena kalomel elektroda (ZKE) potencijala $+ 242 \text{ mV}$ prema standardnoj vodikovoj elektrodi. Strujni krug je zatvoren grafitnim protuelektrodama. Korištena oprema za elektrokemijska ispitivanja prikazana je na slici 48.



Slika 48. Oprema za elektrokemijska ispitivanja

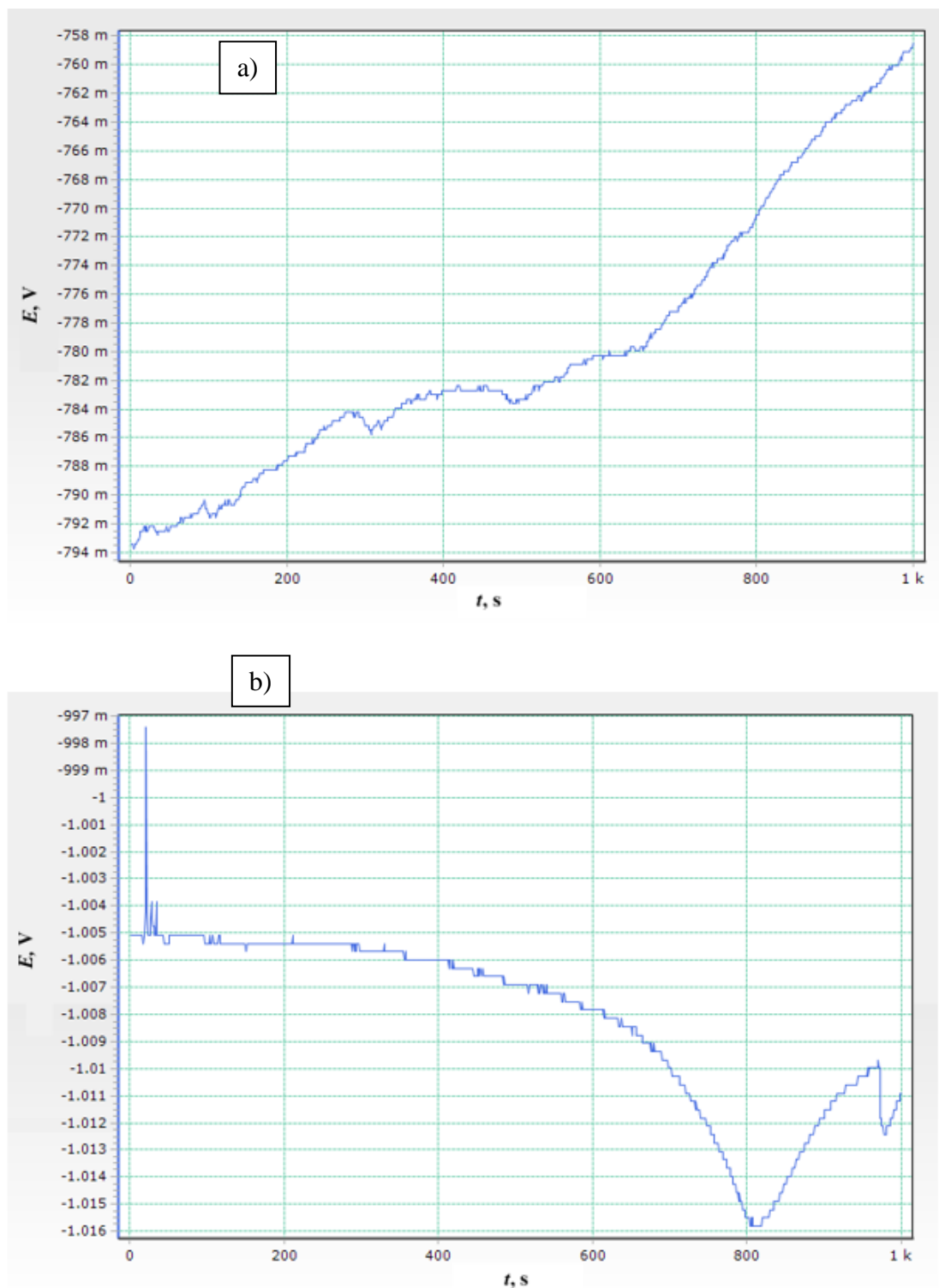
6.9.1. Određivanje korozivnog potencijala E_{kor}

Ispitivanje korozivnog potencijala obuhvaća uranjanje radne elektrode u elektrolit i praćenje razlike korozivnog potencijala između referentne i radne elektrode u vremenu. Strujni krug je tijekom ispitivanja otvoren. Korozivni potencijal se očitava iz $E-t$ krivulje, a sam postupak traje 16 minuta. U tablici 9 nalaze se dobivene vrijednosti korozivnih potencijala.

Tablica 9. Korozivni potencijal ispitnih uzoraka

Uzorak	E_{kor}
A3 - spiralni dio	-758,49 mV
A4 - vanjski prsten	-1010 V

Na slici 49 nalaze se dijagrami ovisnosti korozivnog potencijala o vremenu.



Slika 49. Dijagrami određivanja korozivnog potencijala, a) A3 – spiralni dio, b) A4 – vanjski prsten

Na dijagramu 49.a vrijednosti potencijala su u stalnom porastu, što ukazuje na stvaranje pasivnog filma na površini. To je poželjan efekt, dok vrijednosti potencijala na dijagramu 49.b padaju i negativne su cijelo vrijeme, što je naznaka otapanja materijala (korozije).

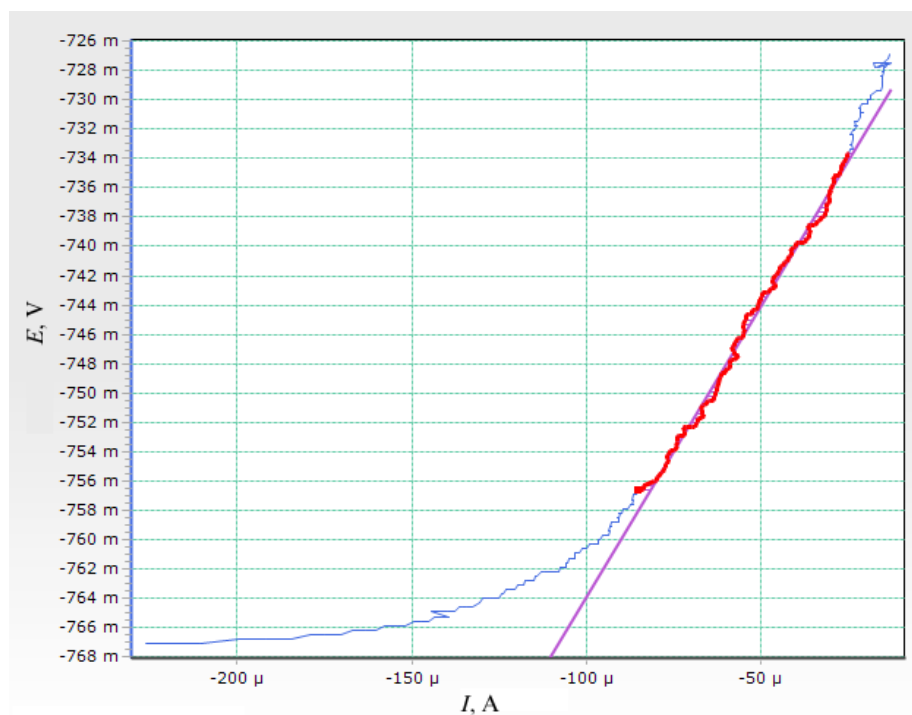
6.9.2. Određivanje polarizacijskog otpora

Metodom linearne polarizacije određen je polarizacijski otpor ispitnih uzoraka. U tablici 10 su navedene vrijednosti polarizacijskog otpora.

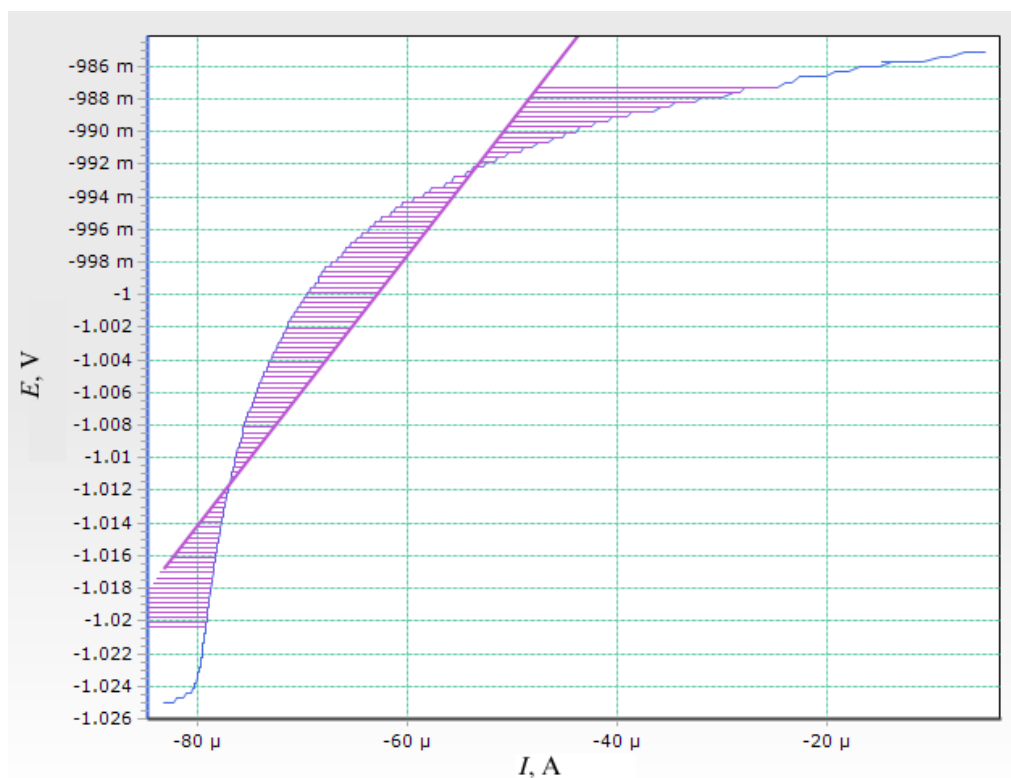
Tablica 10. Izmjerene vrijednosti polarizacijskog otpora

Uzorak	R_p
A3 - spiralni dio	397,11 Ω
A4 - vanjski prsten	827,94 Ω

Na slici 50 i na slici 51 su prikazani dijagrami linearne polarizacije.



Slika 50. Polarizacijska krivulja, A3 – spiralni dio



Slika 51. Polarizacijska krivulja, A4 – vanjski prsten

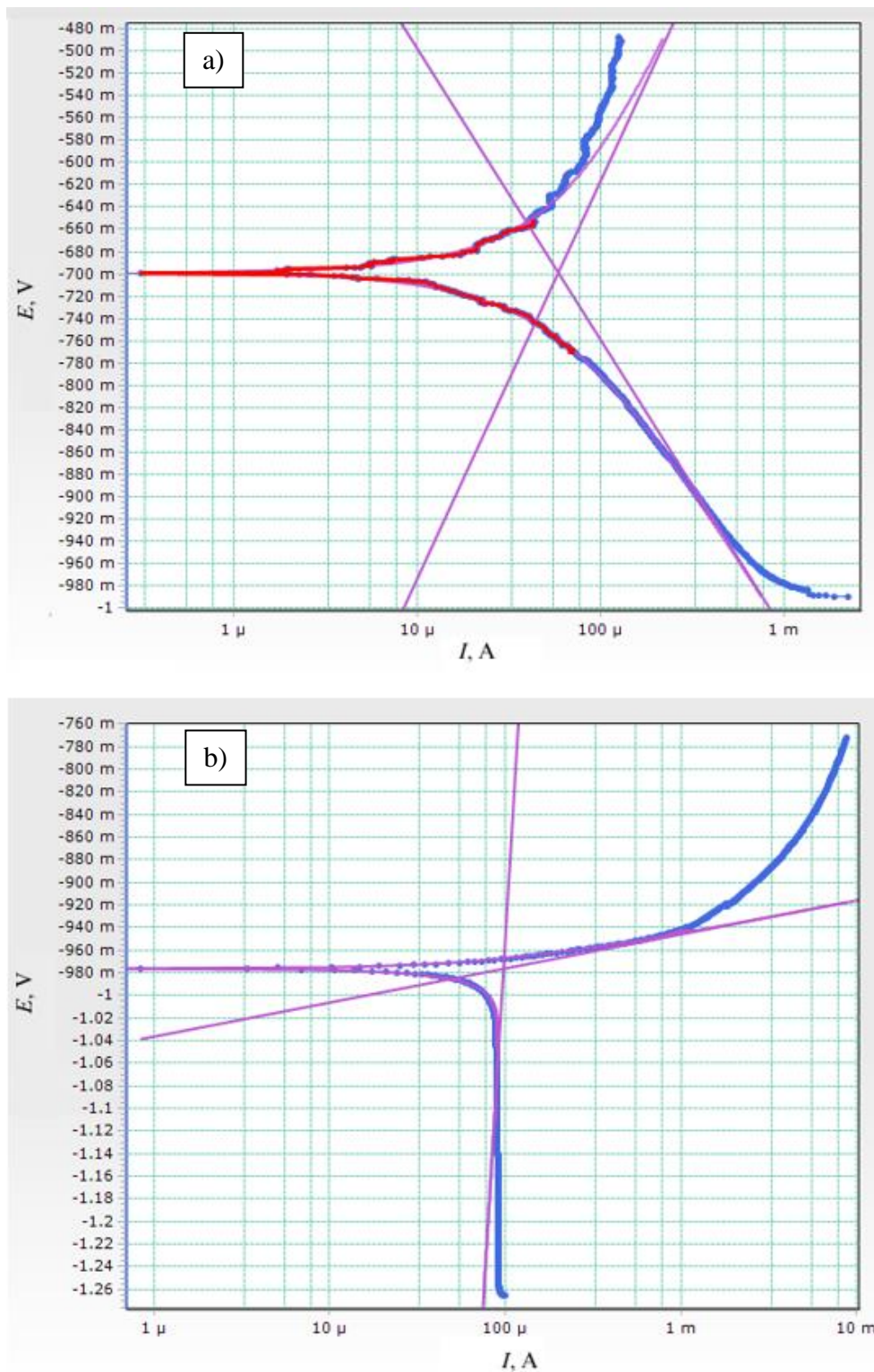
6.9.3. Određivanje brzine korozije

Tafelovom ekstrapolacijom određena je brzina korozije. Određene su vrijednosti gustoće korozijske struje j_{kor} te nagibi anodnog b_a , i katodnog pravca b_c . Rezultati ispitivanja su navedeni tablici 11.

Tablica 11. Rezultati ispitivanja metodom Tafelove ekstrapolacije

Uzorak	v_{kor}	j_{kor}	b_a	b_c
A3 - spiralni dio	0,873 mm/god	74,59 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	0,357 V/dek	0,262 V/dek
A4 - vanjski prsten	1,457 mm/god	124,54 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	0,03 V/dek	-2,57 V/dek

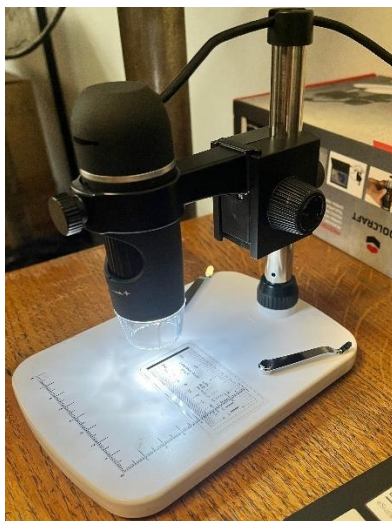
Iz rezultata je vidljivo da će korozija znatno brže napredovati na vanjskom prstenu. Krivulje Tafelove ekstrapolacije su prikazane na slici 52.



Slika 52. Krivulje Tafelove ekstrapolacije, a) A3 – spiralni dio, b) A4 – vanjski prsten

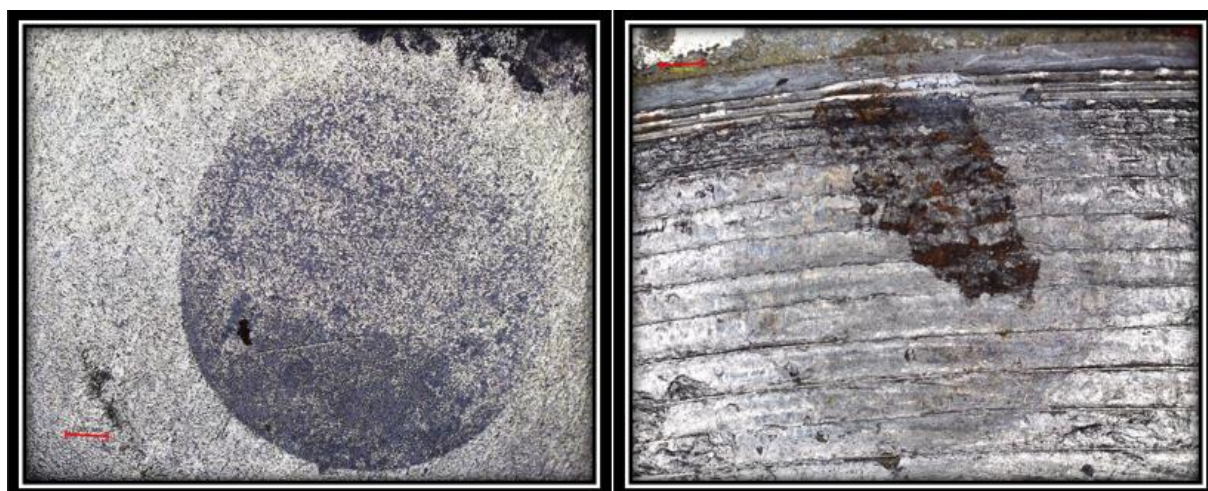
6.9.4. Korozijsko oštećenje površine brtvi

Nakon provedenih elektrokemijskih ispitivanja, promjene koje su se dogodile na površinama ispitnih uzoraka A3 i A4, fotografirane su na stereomikroskopu DigiMicro Profi, proizvođača Toolcraft. Stereomikroskop je najprije kalibriran, kako je prikazano na slici 53.



Slika 53. Kalibracija stereomikroskopa

Snimljene površine prikazane se na slici 54. Na površini vanjskog prstena brtve A4 uočavaju se produkti korozije, dok se na spiralnom dijelu brtve A3 stvorio pasivni film.

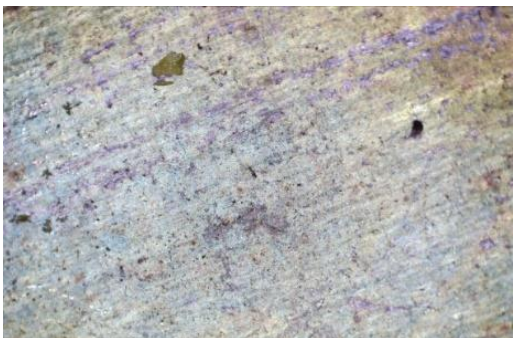


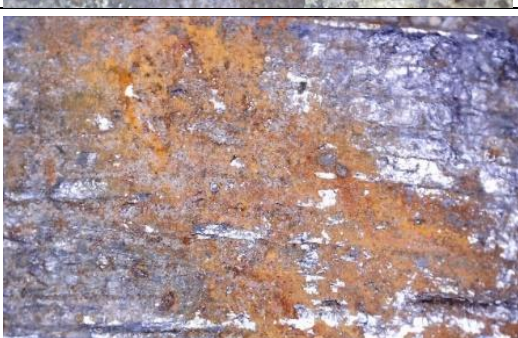


Slika 54. Izgled površina uzoraka nakon elektrokemijskih ispitivanja

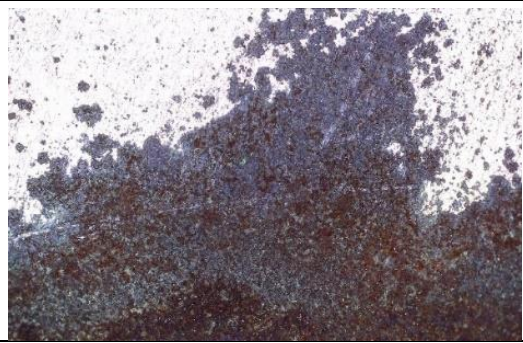
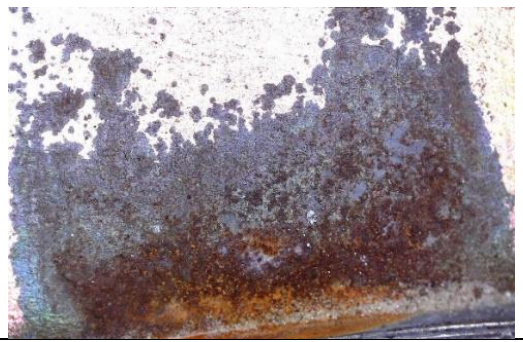

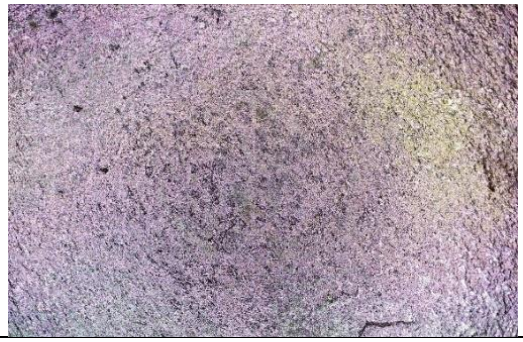

6.10. Analiza trošenja i korozije brtvi

Već prije klasificirane brtve korištene u postrojenju, analizirane su stereomikroskopom DigiMicro Profi. U tablicama 12 do 24 nalaze se slike oštećenih i korodiranih površina brtvi.




Tablica 12. Oštećenja brtve A1

Brtva A1		Neoštećeni dio vanjskog prstena
		Pojava izjedanja na prijelazu brtveni dio – vanjski prsten
		Ljuštenje prevlake cinka na vanjskom prstenu
		Opća korozija spiralnog dijela brtve

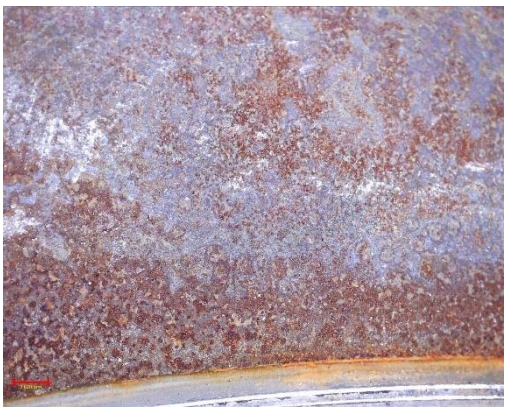

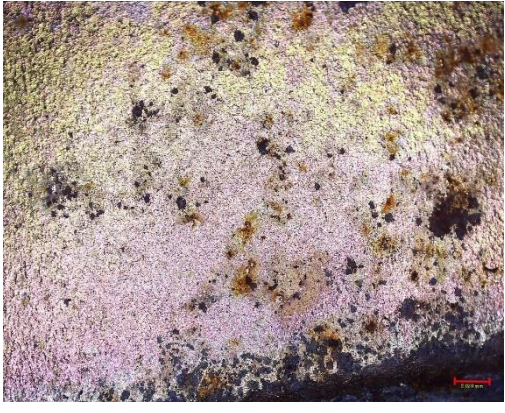
Tablica 13. Oštećenja brtvi A2 i A3

Brtva A2		Ljuštenje cinkovog sloja i produkti korozije na vanjskog prstenu
		Izjedanje na prijelazu spiralni dio – vanjski prsten
		Mehaničko oštećenje spiralnog dijela – odvajanje namotaja
Brtva A3		Neoštećena površina vanjskog prstena – sloj cinka je kompaktan
		Izjedanje na vanjskom prstenu



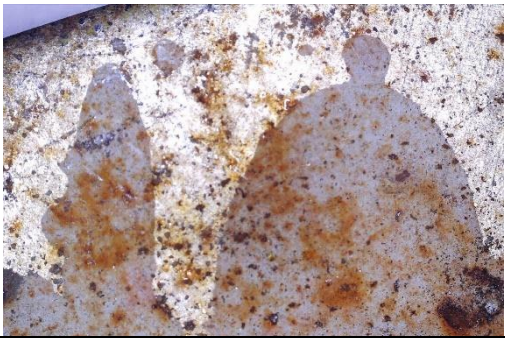
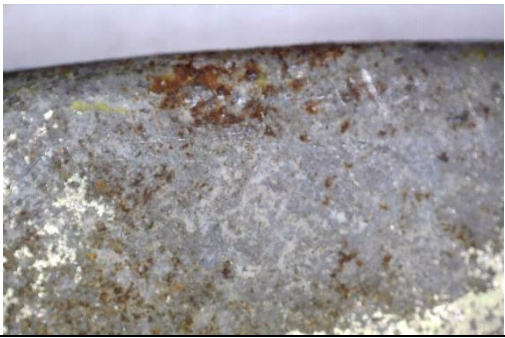

Tablica 14. Oštećenja brtve A4

Brtva A4		Neoštećena površina vanjskog prstena
		Mehaničko oštećenje spiralnog dijela
		Neoštećena površina vanjskog prstena

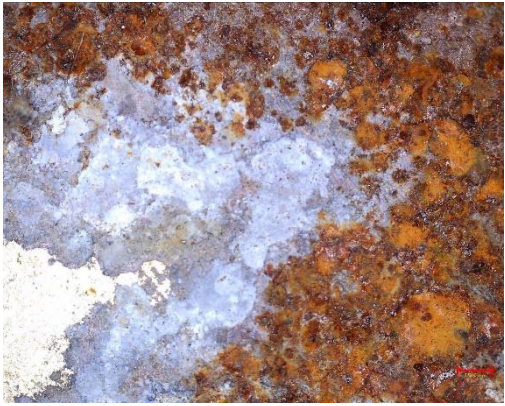
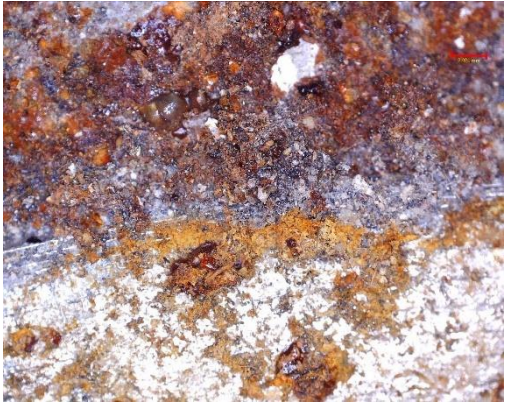
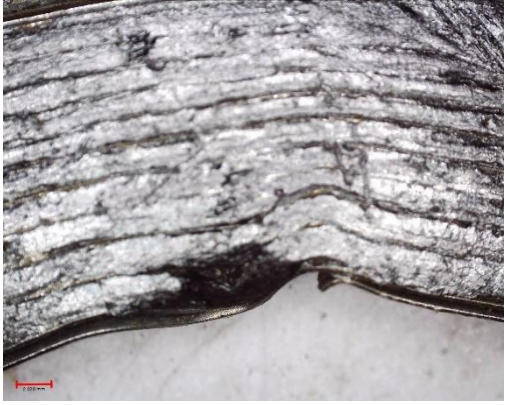

Tablica 15. Oštećenja brtve A5

Brtva A5		Jamičasta i opća korozija vanjskog prstena
		Mehaničko oštećenje spiralnog dijela – izvijanje namotaja
		Rupičasta korozija na vanjskom prstenu


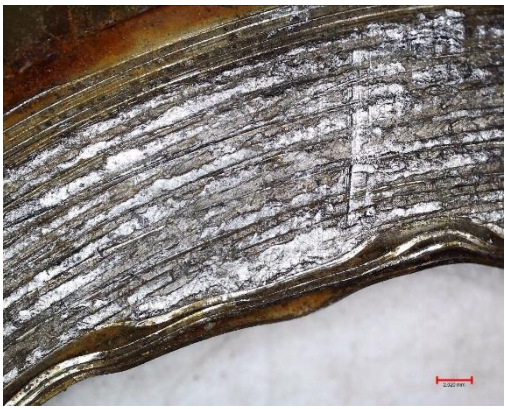

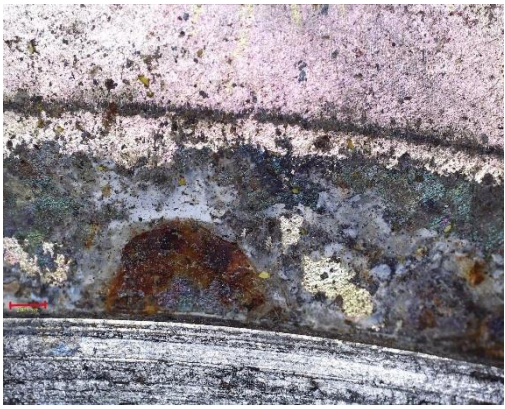
Tablica 16. Oštećenja brtvi A6 i A7

Brtva A6		Naslage opće korozije na sloju cinka vanjskog prstena
		Naslage opće korozije na rubu vanjskog prstena
		Rupičasta korozija na vanjskom prstenu
Brtva A7		Jamičasta korozija na vanjskom rubu
		Mehaničko oštećenje spiralnog dijela i naslage uzrokovane korozijom

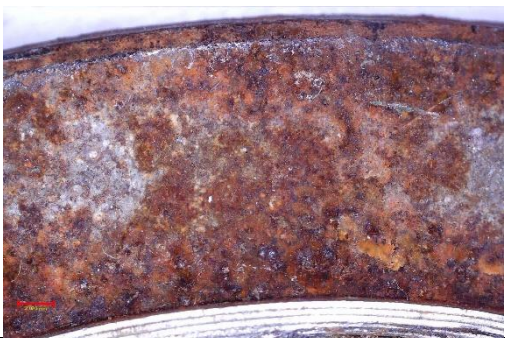

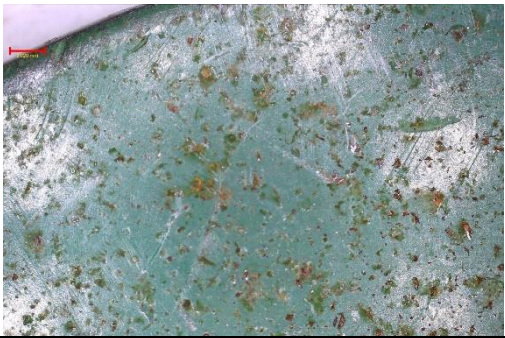


Tablica 17. Oštećenja brtvi A8 i A9

Brtva A8		Opća korozija i korozija pocinčanog sloja
		Opća korozija vanjskog prstena i spiralnog dijela
Brtva A9		Mehaničko oštećenje spiralnog dijela
		Izjedanje na vanjskom prstenu

Tablica 18. Oštećenja brtvi A10 i A11

Brtva A10		Opća korozija i oštećenje premaza Zn, Al - ljuštenje
		Mehaničko oštećenje namotaja spiralnog dijela
Brtva A11		Odvajanje grafita iz spiralno namotanog nehrđajućeg čelika
		Opća i cinkova korozija vanjskog prstena

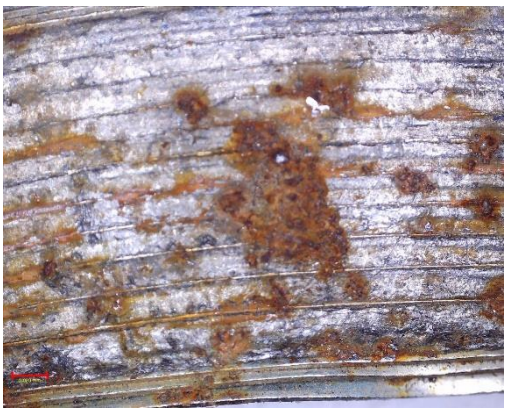
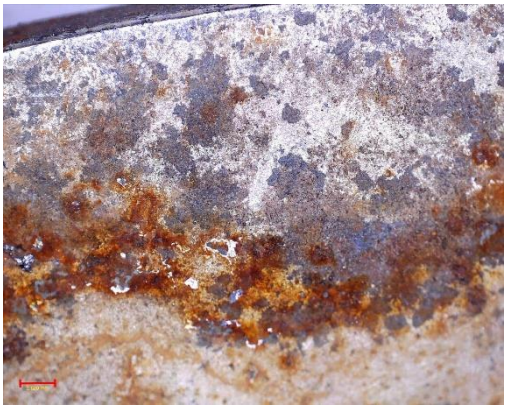
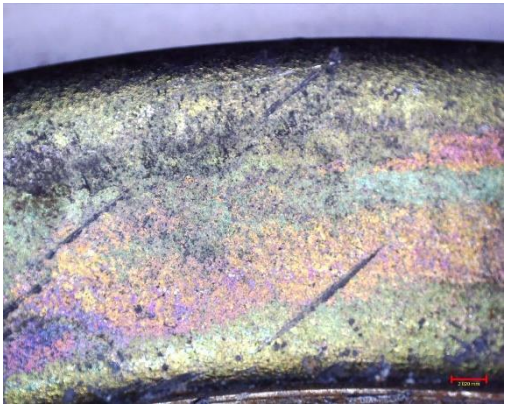
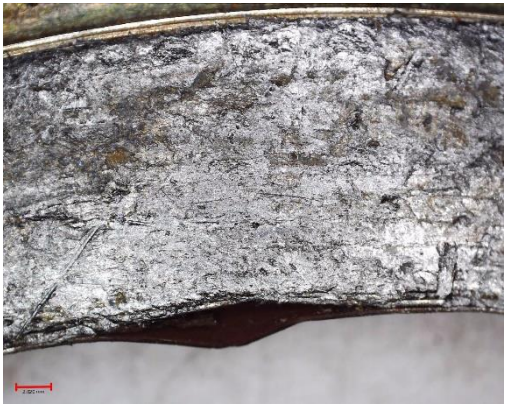
Tablica 19. Oštećenja brtvi A12, A13 i A14

Brtva A12		Opća korozija cijelog vanjskog dijela
		Mehaničko oštećenje – odvajanje namotaja
Brtva A13		Jamičasta korozija na premazu vanjskog prstena
		Korozija u procijepu
Brtva A14		Mehaničko oštećenje – vidljivi tragovi (linije) trošenja


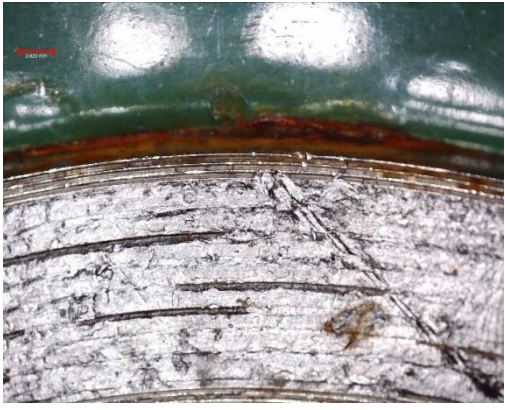

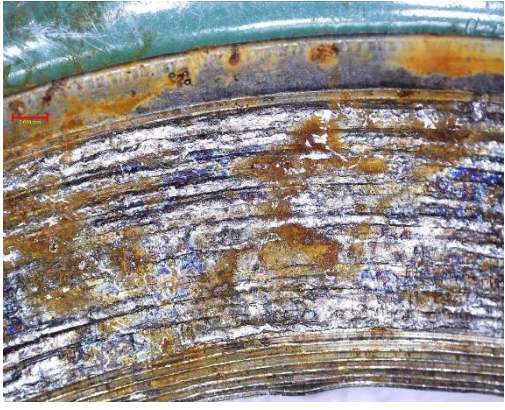
Iz izgleda oštećenih i korodiranih površina brtvi serije A uočavaju se sljedeća oštećenja:

- Pojava izjedanja na prijelazu brtveni dio – vanjski prsten
- Izjedanje na vanjskom prstenu
- Ljuštenje prevlake cinka na vanjskom prstenu
- Mehaničko oštećenje – odvajanje namotaja
- Odvajanje grafita iz spiralno namotanog nehrđajućeg čelika
- Opća korozija spiralnog dijela brtve
- Opća korozija i oštećenje premaza Zn, Al – ljuštenje
- Jamičasta i opća korozija vanjskog prstena
- Jamičasta korozija na premazu vanjskog prstena
- Rupičasta korozija na vanjskom prstenu
- Korozija u procijepu

Tablica 20. Oštećenja brtvi B1 i B2

Brtva B1		Opća korozija spiralnog dijela
		Opća korozija vanjskog prstena i ljuštenje sloja cinka
Brtva B2		Oštećenje premaza vanjskog prstena
		Mehaničko oštećenje – odvajanje namotaja spiralnog dijela


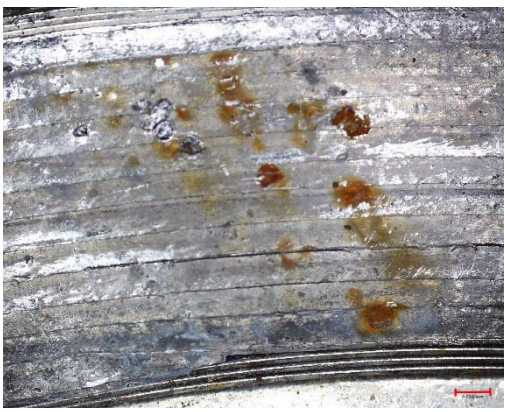
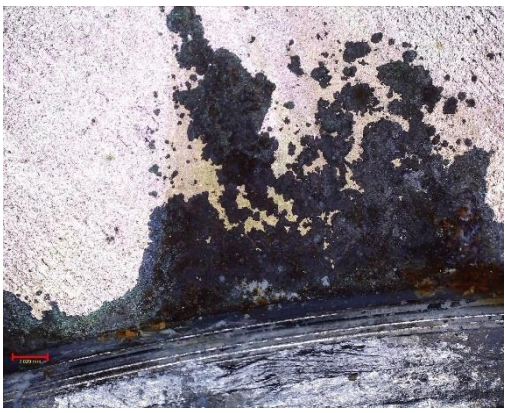
Tablica 21. Oštećenja brtvi B3 i B4

Brtva B3		Neoštećeni vanjski prsten
		Mehaničko oštećenje i korozija u procijepu
Brtva B4		Jamičasta korozija na vanjskom prstenu
		Opća korozija spiralnog dijela

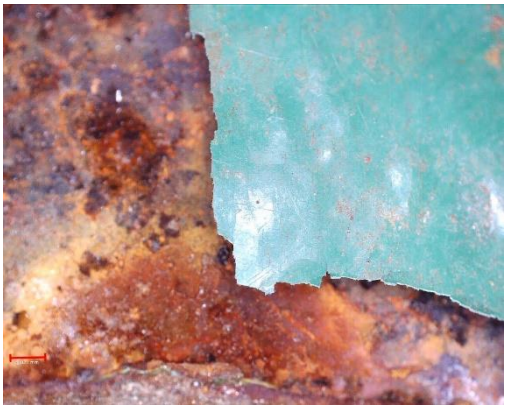
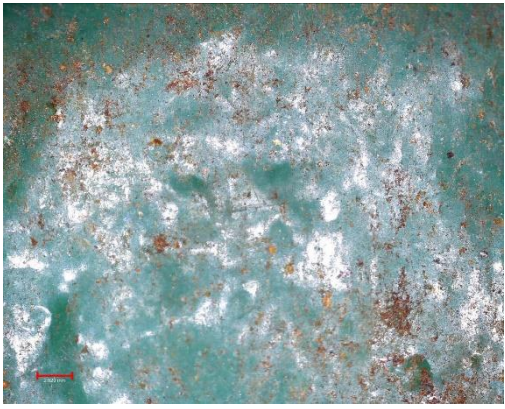
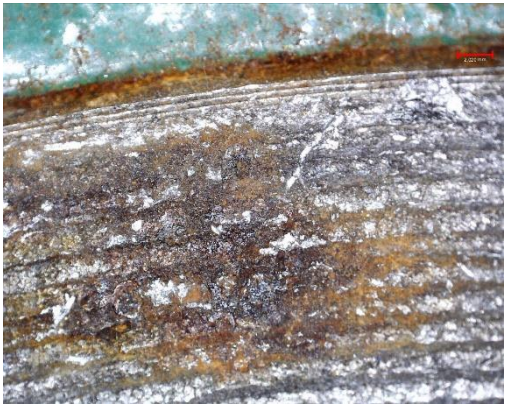
Iz izgleda oštećenih i korodiranih površina brtvi serije B uočavaju se sljedeća oštećenja:

- Opća korozija spiralnog dijela brtve
- Opća korozija vanjskog prstena i ljuštenje sloja cinka
- Mehaničko oštećenje i korozija u procijepu
- Jamičasta korozija na vanjskom prstenu
- Mehaničko oštećenje – odvajanje namotaja spiralnog dijela
- Mehaničko oštećenje i korozija u procijepu

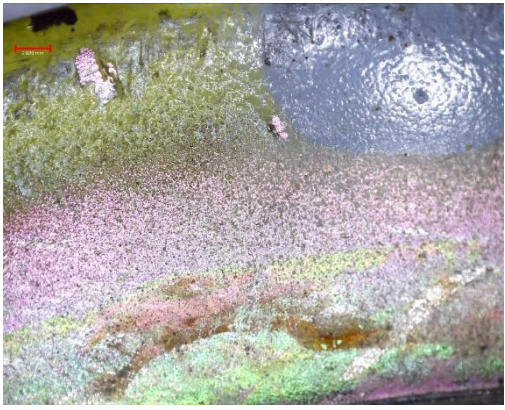


Tablica 22. Oštećenja brtve C1

Brtva C1		Lokalna korozija na unutarnjem prstenu
		Jamičasta korozija spiralnog dijela
		Korodirana površina vanjskog prstena

Tablica 23. Oštećenja brtve C2

Brtva C2		Opća korozija vanjskog prstena na dijelu gdje se odvojio premaz
		Ljuštenje premaza
		Korozija u procijepu, opća korozija spiralnog dijela

Tablica 24. Oštećenja brtve C3

Brtva C3		Oštećenje pocinčanog sloja
		Korodirani unutarnji prsten
		Korozija na prijelazu unutarnji prsten – spiralni dio

Iz izgleda oštećenih i korodiranih površina brtvi serije C uočavaju se sljedeća oštećenja:

- Ljuštenje premaza
- Oštećenje pocinčanog sloja
- Lokalna korozija na unutarnjem prstenu
- Jamičasta korozija spiralnog dijela
- Korozija na prijelazu unutarnji prsten – spiralni dio
- Korozija u procijepu, opća korozija spiralnog dijela

7. ZAKLJUČAK

U radu je analizirana korozija, trošenje i mehanička oštećenja spiralno-metalnih brtvi izuzetih iz cjevovoda za pročišćavanje zemnog plina. Na temelju provedenih ispitivanja zaključeno je sljedeće:

- Nerazornom XRF metodom ispitan je kemijski sastav brtvi te je utvrđeno da je najviše brtvi sa spiralnim umetkom izrađenim od nehrđajućeg čelika koji po sastavu odgovara čeliku X5CrNi18-10 (AISI 304), dok je vanjski prsten brtvi izrađen od pocinčanog niskougličnog nelegiranog čelika.
- Prijenosnim uređajem metodom induciranja vrtložnih struja izmjerena je debljina prevlake cinka koja je većinom ujednačena po promjeru brtvi, a iznosa je 10 μm za brtvu A4, odnosno 20 μm za brtvu A3. Ovi iznosi upućuju na galvanski prevučene vanjske prstenove. Najveća debljina sloja izmjerena je na brtvi A13, srednje vrijednosti 224 μm , na kojoj je u prevlaci prisutan sloj cinka i aluminija.
- Analizom mikrostrukture vanjskog prstena uzoraka A4 i C3 uočena je ravnomjerna sitnozrnata feritna mikrostruktura s poligonalnim kristalnim zrnima. Takva mikrostruktura je deformabilna i duktilna što je važno za uspješnu montažu vanjskog prstena brtve. Pri većim povećanjima uočava se i mali udio perlita.
- Vickers metodom dobivena je srednja vrijednost tvrdoće uzorka A4, iznosa 132,4 HV0,5 te uzorka C3, iznosa 129,6 HV0,5 koja je karakteristična za feritnu mikrostrukturu vanjskog prstena brtve.
- Ispitivanjem hrapavosti novih brtvi, dobivene su najveće vrijednosti parametara hrapavosti za vanjski prsten brtve oznake F, a najmanje vrijednosti parametara hrapavosti za unutarnji prsten brtve oznake D.
- Elektrokemijska ispitivanja korozije potvrdila su bolju korozijsku postojanost spiralnog dijela brtve A3 u odnosu na vanjski prsten brtve A4. Pri ispitivanju spiralni dio brtve A3 ne korodira, već se stvara pasivni film, dok vanjski prsten brtve A4 korodira i dolazi do otapanja površinskog sloja. Brzina korozije spiralnog dijela iznosi 0,873 mm/god, a vanjskog prstena 1,457 mm/god.
- Analizom površine brtvi uočeni su različiti tipovi oštećenja. Najučestalija su korozijska oštećenja nastala istjecanjem medija iz prirubničkog spoja: opća korozija, jamičasta, rupičasta te korozija prevlake cinka. Na prijelazima spiralni dio – vanjski prsten uočena

je korozija u procijepu. Također, uočena su mehanička oštećenja poput izvijanja spiralnog dijela, odvajanja grafita i odmotavanja spiralnog dijela. Do mehaničkih oštećenja je dovela nepravilna montaža, posebno pritezanje prirubničkog spoja, koje je stvorilo nejednakosti u iznosu sila na vijcima.

Na temelju rezultata provedenih ispitivanja, preporučuju se sljedeće preventivne mjere za produljenje uporabnog vijeka spiralno-metalnih brtvi:

- Osiguravanje pravilne montaže prirubničkih spojeva
- Pобољшanje površine ventila toplinskom obradom, npr. nitriranjem, jer osim brtve prirubnički spoj čine i drugi elementi, a prema rezultatima ispitivanja, problem nije u brtvi već u popuštanju prirubnice ventila i daljnjem istjecanju medija
- Smanjenje hrapavosti površine prirubnice polimernim prevlakama čime će se omogućiti optimalno brtvljenje

Implementacijom ovih mjera očekuje se značajno smanjenje kvarova i produljenje vijeka trajanja brtvi i prirubničkih spojeva.

LITERATURA

- [1] Hakimian S, Bouzid AH, Hof LA. Corrosion failures of flanged gasketed joints: A review. Vol. 9, Journal of Advanced Joining Processes. Elsevier B.V.; 2024.
- [2] Silva CC, Farias JP, de Sant'Ana HB. Evaluation of AISI 316L stainless steel welded plates in heavy petroleum environment. Materials and Design. 2009 May;30(5):1581–7.
- [3] K.H. Decker, Elementi strojeva, Tehnička knjiga, Zagreb 2003., p. 302-308
- [4] Lamons.com [Internet]. [pristupljeno: 2024-4-14.]. Dostupno na: <https://www.lamons.com/wp-content/uploads/2021/09/Lamons-Gasket-Fastener-Handbook.pdf>
- [5] Nelson NR. Effective modeling of spiral wound gasket with graphite filler in gasketed flange joint subjected to bending loads. In: Materials Today: Proceedings. Elsevier Ltd; 2021. p. 2199–204.
- [6] Spiral wound gasket archives [Internet]. Flexitallic. [pristupljeno: 2024-4-17]. Dostupno na: <https://flexitallic.com/product-type/spiral-wound-gasket/>
- [7] Hamilton S. Spiral wound gaskets, explained [Internet]. Hextechnology.com. [pristupljeno: 2024-4-17]. Dostupno na: <https://www.hextechnology.com/articles/spiral-wound-gaskets-explained/>
- [8] Thomasnet.com [Internet]. [pristupljeno: 2024-4-18]. Dostupno na: <https://www.thomasnet.com/articles/hardware/spiral-wound-gaskets/>
- [9] Bickford J, Handbook of Bolts and Bolted Joints, CRC Press, 1998.
- [10] Jenco JM, Hunt ES. Generic issues effecting spiral-wound gasket performance [Internet]. Dostupno na: www.elsevier.com/locate/ijpvp
- [11] Ćorić D, Franz M, Odabrana poglavlja iz mehaničkih svojstava materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2008.
- [12] Zhong J, Liu D, Zhou T, Guan K. Failure analysis of outer ring of spiral wound gasket. Engineering Failure Analysis. 2020 Nov 1;117.
- [13] Outokumpu: Handbook of Stainless Steel, Edition 1.1, Outokumpu Oyj, Helsinki, 2017.
- [14] K.H. Lo, C.H. Shek, J.K.L. Lai: Recent development in stainless steels, Elsevier, 2009.
- [15] Rede V.: Korozijski postojani čelici, predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [16] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2013.
- [17] Rede V. Posebni metalni materijali - Autorizirana predavanja. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb; 2023.

- [18] Hutchings I, Shipway P. Surface engineering. Tribology. 2017.
- [19] A. Fossati, F. Biorgioli, E. Galvanetto, T. Bacci: Glow-discharge nitriding of AISI 316L austenitic stainless steel: influence of treatment time, Surface and Coatings Technology, no. 200, pp. 3511-3517, 2006.
- [20] Munger CG, Vincent LD. Corrosion prevention by protective coatings, Second edition. www.osti.gov [Internet]. 1999 Jul 1 [pristupljeno: 2024-4-25]; Dostupno na: <https://www.osti.gov/biblio/20050623>
- [21] Davis JR, ASM International. Handbook Committee. Machining. Metals Park, OH: Asm International; 1999.
- [22] Gojić M, Površinska obradba materijala, Metalurški fakultet, Zagreb, 2010
- [23] CS350M EIS Potentiostat /Galvanostat-Corrtest Instruments [Internet]. Com.cn. [pristupljeno: 2024-29-4]. Dostupno na: <https://www.corrtest.com.cn/en/service1/1181.html>
- [24] S. S. Hanza: „Zaštita materijala - materijali s predavanja“, Rijeka, Tehnički fakultet Rijeka, 2020.
- [25] Mansfeld F. The polarization resistance technique for measuring corrosion currents. In: Advances in Corrosion Science and Technology. Boston, MA: Springer US; 1976. p. 163–262.
- [26] Esih I., Dugi Z., Tehnologija zaštite od korozije I, Školska knjiga, Zagreb, 1990.
- [27] Matijević B., Podloge s predavanja iz kolegija Toplinska obrada, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [28] Aleksandrov Fabijanić, T., „Razvoj referentnih pločica tvrdoće po Vickersu postupkom metalurgije praha“, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.