

Utjecaj kvalitete korijenske zaštite na korozijska svojstva zavara

Oljača, Nina

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:718370>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-28**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Nina Oljača

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Nina Oljača

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se mentoru dr.sc. Garašiću dipl. ing., docentu dr.sc. Kurteli dipl. ing., asistentu Štefoku mag. ing., istraživačici na projektu dr. sc. Jurica mag. ing. i tehničkom suradniku Denkoviću na ukazanoj prilici i pomoći pri završnom radu.

Nina Oljača



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 23 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Nina Oljača** JMBAG: **0035221500**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj kvalitete korijenske zaštite na korozivna svojstva zavara**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of root gas forming on corrosion properties of the weld**

Opis zadatka:

Na temelju literature detaljno proučiti i opisati problematiku korijenske zaštite pri TIG zavarivanju austenitnih čelika. Posebno proučiti korozivne mehanizme koji se javljaju u području zavarenog spoja. Dati pregled plinova koji se koriste pri zaštiti korijena kao i metoda mjerenja kisika u području zavarivanja.

U eksperimentalnom dijelu provesti navarivanje TIG postupkom na cijevima od austenitnog Cr-Ni čelika uz varijacije zaštitnih plinova i sadržaja kisika. Uzorke pripremiti za provedbu korozivnih ispitivanja. Zaključno, odrediti utjecaj kisika na korozivnu postojanost zavarenog spoja u području korijena te dati preporuke za primjenu u proizvodnim uvjetima.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2022.

Datum predaje rada:

1. rok: 20. 2. 2023.
2. rok (izvanredni): 10. 7. 2023.
3. rok: 18. 9. 2023.

Predvideni datumi obrane:

1. rok: 27. 2. – 3. 3. 2023.
2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.
3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY	VI
1. UVOD.....	1
2. KOROZIJSKI MEHANIZMI.....	2
2.1. δ-ferit.....	3
2.2. Interkristalna korozija	5
2.3. Napetosna korozija.....	7
2.4. Rupičasta korozija.....	8
2.5. Mikrobiološki poticana korozija	9
3. KORIJENSKA ZAŠTITA	10
3.1. Priprema površine	11
3.2. Zaštitni plinovi	11
3.2.1. Argon	12
3.2.2. Helij.....	12
3.2.3. Dušik	12
3.2.4. Vodik.....	14
3.2.5. Mješavine	14
3.3. Puhanje nakon zavarivanja.....	15
3.4. Mjerenje udjela kisika	16
4. TIG zavarivanje	17
4.1. Pogreške kod TIG zavarivanja austenitnih čelika.....	18
5. Eksperimentalni dio	19
5.1. Opis eksperimenta.....	19
5.2. Osnovni materijal	19
5.3. Oprema za zavarivanje.....	21
5.4. Opis procesa navarivanja	22
5.5. Rezultati navarivanja.....	24
5.6. Ispitivanje na koroziju.....	28
5.7. Rezultati ispitivanja na koroziju	29
5.7.1. Otvoreni strujni krug.....	29
5.7.2. Linearna polarizacija.....	31
5.7.3. Tafel metoda	33
5.7.4. Vizualna kontrola nakon korozijskog ispitivanja	34
6. ZAKLJUČAK.....	36
LITERATURA.....	37

POPIS SLIKA

Slika 1. Mikrostruktura austenitnog čelika [3].....	3
Slika 2. Fazni dijagram s 70% udjelom Fe [3].....	4
Slika 3. Snižavanje žilavosti legure s povećanjem volumnog udjela σ -faze [3].....	5
Slika 4. Utjecaj udjela nikla na nastanak pukotina [7].....	7
Slika 5. Nastanak pobojenja prilikom TIG zavarivanja.....	9
Slika 6. Dijagram nastanka karbida s obzirom na temperaturu [3].....	15
Slika 7. Mjerenje udjela kisika sapnicom oksimetra.....	16
Slika 8. Izmjere cijevi.....	19
Slika 9. Postavljanje cijevi na uređaj za zavarivanje.....	20
Slika 10. Shema regulacije protoka.....	20
Slika 11. Uređaj za zavarivanje Fronius Magic Wave 230I EF.....	21
Slika 12. Automatizacija procesa.....	21
Slika 13. Zaštitni plinovi.....	22
Slika 14. Oksimetar PRO OX-100.....	22
Slika 15. Fluke IR termometar.....	23
Slika 16. Proces rezanja uzoraka.....	23
Slika 17. Vanjska strana navara.....	24
Slika 18. VersaSTAT potenciometar i galvanometar.....	28
Slika 19. Posuda za test s tri elektrode.....	29
Slika 20. Točkaste formacije oksida.....	35

POPIS TABLICA

Tablica 1. Utjecaj pojedinih elemenata na svojstva legure	2
Tablica 2. Precipitati koji mogu uzrokovati interkristalnu koroziju [4].....	6
Tablica 3. PREN broj nehrđajućih čelika [4]	8
Tablica 4. Udio dušika u zavaru s obzirom na udio dušika u osnovnom materijalu i zaštitnom plinu [14]	13
Tablica 5. Mješavine za zaštitu austenitnih čelike i karakteristike [17], [18], [19]	14
Tablica 6. Parametri zavarivanja.....	23
Tablica 7. Unutarnja strana navara i njihovi promjenjivi parametri	25
Tablica 8. Analiza pobojenja.....	27
Tablica 9. Rezultati testa otvorenog strujnog kruga.....	30
Tablica 10. Rezultati testa linearne polarizacije.....	32
Tablica 11. Rezultati Tafel analize.....	33
Tablica 12. Rezultati nakon elektrokemijske korozije	34

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
T	°C	Temperatura u stupnjevima Celzijevim
U	V	Napon
I	A	Jačina struje
q	l/min	Protok plina
/	ppm	Milijunti dio (eng. part per milion)
l	mm	Duljina
t	h	Vrijeme
α	°	Kut
d	cm	Širina
A	cm ²	Površina
v	cm/min	Brzina zavarivanja
E_{OK}	mV	Električni potencijal
R_p	Ω	Otpor
v_{kor}	mmpy	Brzina korozije (eng. milimeters per year)

SAŽETAK

U ovom radu opisana je problematika korijenske zaštite pri TIG (eng. Tungsten Inert Gas) zavarivanju austenitnih čelika. U teorijskom dijelu dat je pregled svojstava austenitnih čelika, kratki pregled TIG postupka i metode mjerenja kisika pri zavarivanju, utjecaj različitih zaštitnih plinova s naglaskom na njihov utjecaj na kvalitetu korijena zavara i naposljetku korozijski mehanizmi koji se mogu javiti u području zavarenog spoja.

U eksperimentalnom dijelu provedeno je navarivanje austenitnih Cr-Ni čeličnih cijevi s različitim zaštitnim plinovima (Argon 4.8, Argon 5.0, Inoxline H5) i udjelom kisika u atmosferi korijena zavara. Uzorci su kasnije dani na testiranje na koroziju čime se utvrđuje korozijska postojanost i na temelju kojih je moguće dati općenite preporuke za primjenu u proizvodnim uvjetima.

Ključne riječi: austenitni Cr-Ni čelik, TIG zavarivanje, zaštitni plinovi, korozijska postojanost.

:

SUMMARY

The problems with TIG welding of austenitic steels are described in this paper. An overview of the properties of austenitic steels, TIG welding process, oxygen level monitoring during welding, the influence of different shielding gases on the weld root and corrosion mechanisms that occur in the weld area are given in the theoretical part.

Welding of austenite Cr-Ni stainless pipes is conducted in the experimental part with different gases (Argon 4.8, Argon 5.0 and Inoxline H5) and with different oxygen levels in the atmosphere near the weld root. Corrosion testing is then conducted on the samples and corrosion resistance is determined based on which general recommendations for real-life applications.

Key words: austenitic Cr-Ni steel, TIG welding. shielding gases, corrosion resistance.

1. UVOD

Nehrđajući čelici su visokolegirani čelici čije je glavno svojstvo korozijska postojanost. Maseni udio kroma u sastavu mora biti barem 12% da bi se postigla korozijska postojanost. Krom stvara pasivni film koji glumi barijeru između metala i okoliša i time usporava reakciju oksidacije za par redova veličine, a time i koroziju. Nehrđajuće čelike najčešće razlikujemo prema mikrostrukтури. Na taj način ih dijelimo na austenitne, feritne, martenzitne i dupleks. Korozijska postojanost je bolja čim je struktura jednolična jer se izbjegava nastajanje galvanskih članaka, a time i ubrzana korozija u vodljivom mediju.

Zavarivanje može stoga prouzročiti narušavanje korozijske postojanosti jer dolazi do promjene mikrostrukture u zoni zavara, najviše zbog utjecaja topline i radi dodatnog materijala. Da bi se to izbjeglo TIG je česta metoda koja se koristi za zavarivanje nehrđajućih čelika, a eksperiment u ovom radu nije izuzetak.

TIG zavarivanjem i korištenjem pravilne korijenske zaštite osiguravaju se optimalna svojstva zavara, a samim time i korozijska postojanost. Pri TIG zavarivanju nehrđajućih čelika korijenska zaštita je korištena kako bi spriječila oksidaciju i nastanak pobojanosti na površini metala. Na mjestima oksidacije nastaju zone sklone rupičastoj koroziji, jedna od najčešćih tipova korozije koji se javljaju na nehrđajućim čelicima.

2. KOROZIJSKI MEHANIZMI

Austenitni nehrđajući čelici su najzastupljeniji od osnovnih vrsta nehrđajućih čelika. Imaju odličnu korozijsku postojanost u raznim medijima, a posebno su otporni na kiseline. Koriste se za postojanost pri atmosferskim uvjetima i pri povišenim temperaturama. Iako su skuplji od feritnih i martenzitnih, koriste se zbog svoje oblikovljivosti, zavarljivosti, dobre duktilnosti, žilavosti i korozijske postojanosti.

Korozijska postojanost nehrđajućih čelika ovisi o stvaranju pasivnog zaštitnog filma na površini čelika koji nastaje u kontaktu s oksidirajućim okolišem. Poznato je da se svojstva nehrđajućih čelika mogu drastično poboljšati korištenjem legirajućih elemenata, a razlog tomu je direktna ovisnost sastava i svojstava pasivnog filma o legirajućim elementima. Ispod je dana tablica s najčešćim legirnim elementima i njihovim utjecajem na svojstva legure. [1]

Tablica 1. Utjecaj pojedinih elemenata na svojstva legure

Element	Utjecaj
Krom	Promiče formiranje ferita. Povećava otpornost na oksidaciju i koroziju
Nikal	Promiče formiranje austenita. Povećava čvrstoću na povišenim temperaturama, otpornost na koroziju i duktilnost i istezljivost
Mangan	Ima veliki afinitet prema sumporu i zato smanjuje mogućnost vrućih pukotina prilikom zavarivanja. Povećava duktilnost na visokim temperaturama
Molibden	Promiče formiranje ferita. Povećava čvrstoću na visokim temperaturama. Poboljšava otpornost na koroziju u reducirajućem okolišu.
Silicij	Povećava otpornost na oksidaciju. Izraziti afinitet prema kisiku (deoksidirajuće djelovanje). Poboljšava fluidnost tekućeg metala.

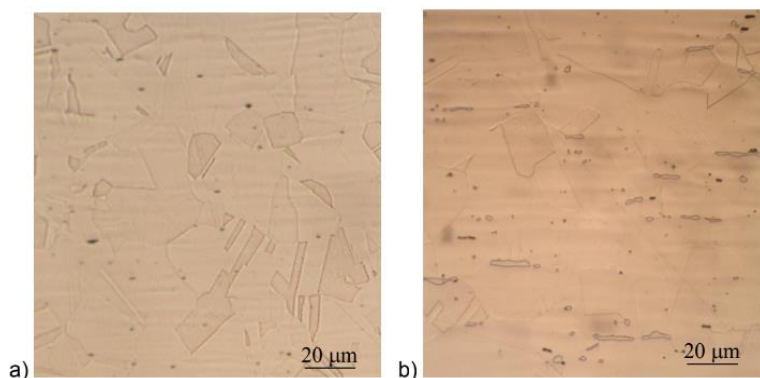
Nastanak i raspad pasivnog filma osim o elementima ovisi o sastavu okoliša. Istraživanja su pokazala mogućnost prilagodbe pasivnog filma prema promjenama u potencijalu i koncentraciji aniona u elektrolitu u kojem se nalazi. Pri niskim potencijalima pasivni sloj se ne može formirati dok pri visokim stvara kromove ione i formira se. Pasivni film se često naziva i oksidnim slojem, ali sastav pasivnog filma je složeniji od toga. Često se formira u više slojeva pa tako

pasivni film u, npr. kiselim otopinama sadrži tri sloja: gornji je hidroksidni sloj, srednji je oksidnom obogaćen kromom dok je donji sloj obogaćen niklom na bazi metala. U lužnatim otopinama je pak topljivost kroma i željeza drugačija što direktno utječe na količinu kroma u filmu, a tako i na korozijsku postojanost. Time je lako zaključiti kolika je osjetljivost pasivnog filma o mnogim faktorima među kojima veliku ulogu ima okoliš. Osjetljivost pasivnog filma je jako primjetna pri promjenama temperature što pogotovo dolazi do izražaja prilikom zavarivanja kada se pri visokim temperaturama mijenja mikrostruktura čelika.

Prilikom TIG zavarivanja utječe se na sastav atmosfere u neposrednom dodiru s metalom, a također se regulira temperatura zavarivanja što za rezultat daje promjene u pasivnom sloju. Prisustvo pasivnog sloja, tj. korozijska postojanost najčešći je razlog izbora nehrđajućih čelika za konstrukcije i stoga se prilikom TIG zavarivanja nehrđajućih čelika mora paziti na niz faktora da bi kvaliteta zavara bila zadovoljavajuća. Promjene koje su moguće u mikrostrukturi i korozijski mehanizmi koji nastaju prilikom zavarivanja austenitnih čelika opisane su u točkama ispod. [1], [2]

2.1. δ-ferit

Mikrostruktura austenitnih čelika je pri sobnoj temperaturi ili 100% austenitna ili s malim udjelom ferita, što ovisi o udjelu i vrsti legirnih elemenata. Za postizanje najbolje korozijske postojanosti poželjno je da mikrostruktura bude u potpunosti austenitna. Pojava ferita (δ-ferita), koji nastaje zbog kroma tokom naknadne termičke obrade ili tokom primarne kristalizacije, može prouzročiti nastanak nepoželjnih mikrostruktura kao što su pojava karbida i σ-faze uz granice δ-ferita koji se na slici 1 nalazi u trakastim nakupinama. [3]



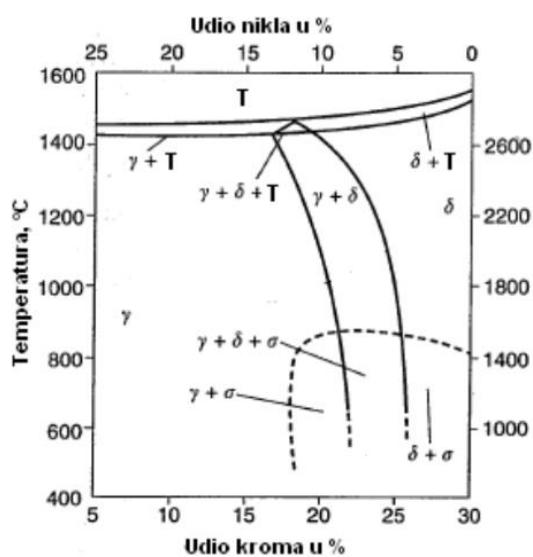
Slika 1. Mikrostruktura austenitnog čelika [3]

a) sa 100% udjelom austenita

b) sa austenitom i δ-feritom

δ-ferit ima dvojak u ulogu u sastavu austenitnih čelika. Ovisno o primjeni čelika mogu se prilagoditi svojstva povećanjem ili smanjenjem udjela δ-ferita. Povećanjem udjela se smanjuje korozivna postojanost, ali se povećava čvrstoća i magnetičnost. Smanjenjem δ-ferita postiže se bolja korozivna postojanost, ali se povećava mogućnost pojave toplih pukotina prilikom zavarivanja. δ-ferit ima dobru topljivost sumpora i time se sumpor ne izlučuje i smanjuje mogućnost nastanka toplih pukotina. Povećanje udjela ferita može se postići izborom pravilnih legirajućih elemenata (Ti, Nb).

Čelici koji pri primarnoj kristalizaciji imaju potpun sastav austenita imati će nakon hlađenja i dalje austenitnu strukturu. Udjelom kroma i nikla može se utjecati na željenu strukturu čelika na način da će čelici s manje od otprilike 12% Ni i više od 18% Cr imati u potpunosti δ-ferit u strukturi, a čelici s više Ni i manje kroma od navedenog će imati u potpunosti austenitnu strukturu. Željena mikrostruktura može se predvidjeti i postići pomoću faznog pseudobinarnog dijagrama na slici ispod dok se u praksi koriste Schaefferlov, de Longov i WRC dijagrami, koji su dobiveni iskustveno.



Slika 2. Fazni dijagram s 70% udjelom Fe [3]

Osim u faznim dijagramima, udio δ-ferita, a također i drugih mikrostruktura, se pouzdano određuje magnetskim metodama. Magnetska metoda se temelji na svojstvu magnetičnosti ferita (povećava magnetičnost u metalu) i tokom mjerenja se mjeri sila potrebna za razdvajanje metala od standardiziranog magneta. Spomenuta metoda se koristi u slučajevima kada nije poznata početna mikrostruktura i sastav čelika, dok se metoda predviđanja pomoću faznog dijagrama koristi kada je ista poznata.

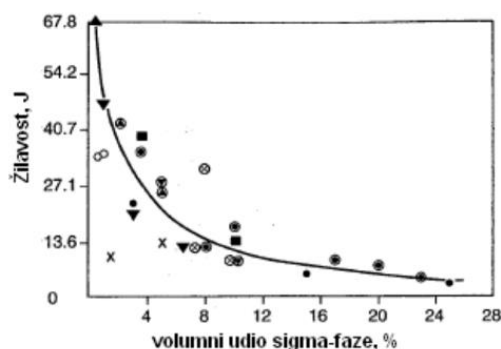
2.2. Interkristalna korozija

Interkristalna korozija je općenito posebno opasan tip korozije jer napreduje nevidljivo duž granica kristalita te izaziva raspad metalne veze među kristalitim te u konačnici raspad čitavog metala. Dugo može ostati nezamijećena, a naglo snižava žilavost i čvrstoću metala. Spomenuti karbidi nastaju pri temperaturama između 400-800°C, zbog prevelikog afiniteta ugljika s kromom i preniske brzine hlađenja. Sprječavanjem nastanka uvjeta za karbide sprječava se i interkristalna korozija. To se može postići snižavanjem udjela ugljika (ispod 0,03%), žarenjem koje otapa karbide tipa Cr_{23}C_6 ponovno otapaju u austenitu zatim gašenjem vodom i prikladnim odabirom legirnih elemenata i prilagodba mikrostrukture koje je opisno ispod. [4]

Nastanak karbida je sasvim očekivan u pojedinim dijelovima faze zbog kroma koji je snažan karbidotvorac. Molibden, niobij i titan su također jaki karbidotvorci.

Ti i Nb se nazivaju stabilizirajućim elementima jer imaju veći afinitet prema ugljiku od kroma stoga se na granicama ne izlučuju karbidi i time se sprječava senzibilizacija koja može dovesti do interkristalne korozije. [5]

Najštetniji karbidi su ipak karbidi tipa M_{23}C_6 koji se izlučuju na granicama austenitnih zrna i uzrokuju interkristalnu koroziju. Treba izbjegavati temperature između 600-850°C ili proći taj raspon što brže, jer pri tim temperaturama dolazi do izlučivanja karbida na granicama zrna. [3] Od faza koje mogu nastati u mikrostrukтури (χ , η , G...) najopasnija je σ -faza. Iako sve nabrojane faze snižavaju žilavost, σ -faza nastaje najbrže i najveći joj je utjecaj na žilavost. Volumni udio σ -faze od samo 5% snižava žilavost legure za čak 50%.



Slika 3. Snižavanje žilavosti legure s povećanjem volumnog udjela σ -faze [3]

σ -faza nastaje lakše u čelicima sa postotkom molibdena, niobija i titana. σ -faza ne nastaje u potpuno austenitnim čelicima jer ona nastaje na granicama ferit/austenit i širi se prema feritu i povećava svoj volumen. Ugljik i dušik sprječavaju nastanak σ -faze.

Proces nastanka δ faze i karbida direktno utječe na senzibilizaciju čelika – izlučivanje kromovih karbida koje ima za posljedicu kromom osiromašena lokalna područja uz zavar. Ta područja postaju znatno osjetljiva na interkristalnu koroziju. [6] Osim karbida i σ -faze postoje i niz drugih precipitata koji mogu nastati na granicama ferit/austenit. Neki od njih dani su u tablici ispod.

Tablica 2. Precipitati koji mogu uzrokovati interkristalnu koroziju [4]

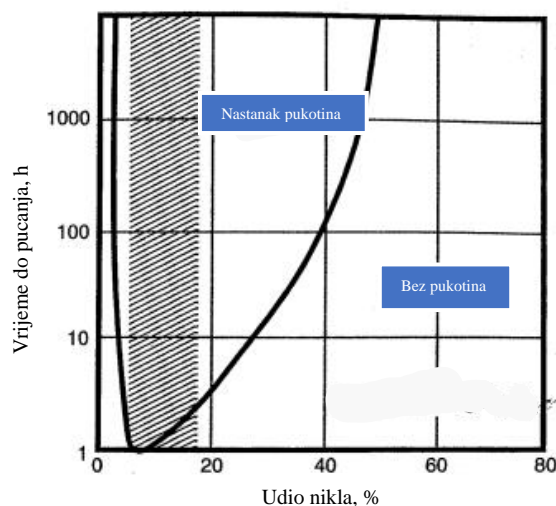
Precipitat	Kristalna građa	Stehiometrijska formula
Mc	FCC	TiC, NbC
M₆C	Diamond cubic	(FeCr) ₃ Mo ₃ C, Fe ₃ Nb ₃ C, Mo ₅ Si
M₂₃C₆	FCC	(Cr, Fe) ₂₃ C ₆ , (Cr,Fe,Mo) ₂₃ C ₆
NbN	FCC	NbN
Z-faza	Tetragonalna	CrNbN
σ-faza	Tetragonalna	Fe-Ni-Cr-Mo
Lavsova faza	Heksagonalna	Fe ₂ Mo, Fe ₂ Nb
χ_1-faza	BCC	Fe ₃₆ Cr ₁₂ Mo ₁₀
G-faza	FCC	Ni ₁₆ Nb ₆ Si ₃ , Ni ₁₆ Ti ₆ Si ₇
R	Heksagonalna romboedarska	Mo-CO-Cr Mo-CO-Cr
η-nitridi (Cr₂N)	Heksagonalna	Cr ₂ N
Ni₃Ti	Heksagonalna	Ni ₃ Ti
Ni₃(Al,Ti)	FCC	Ni ₃ Al

Posebna podvrsta interkristalne korozije koje nastaje prilikom zavarivanja austenitnih čelika je noževa korozija. Ona također nastaje na granicama ferit/austenit rastapanjem stabiliziranih karbida pri visokim temperaturama pored mjesta taljenja. Naglim hlađenjem se kromovi karbidi formiraju puno brže od titanijevih i niobijevih karbida i formira se jako uska osjetljiva zona koja pri pucanju izgleda kao da je zavar bio prerezan nožem, a tako je dobila i ime. [7]

2.3. Napetosna korozija

Napetosna korozija općenito je oblik korozije koji nastaje zbog istodobnog djelovanja agresivnog okruženja i vlačnih naprezanja na materijal konstrukcije. Vlačna naprezanja su posljedica zaostalih naprezanja, nastalih hladnom deformacijom ili zavarivanjem. Pukotine napreduju okomito na smjer vlačnog opterećenja, a šire se interkristalno ili transkristalno. Nastanak korozije moguć je nakon postizanja tri uvjeta: materijal sklon koroziji (legirani su skloniji), postojanje naprezanja i agresivni mediji koji stvaraju uvjete za koroziju. Napetosna korozija kod nehrđajućih čelika najčešće se javlja u elektrolitu koji sadrži Cl i OH ili H₂S. Austenitni čelici su posebno skloni ovom tipu korozije u kontaktu s morskom vodom ili općenito u okolišu s visokom ph vrijednošću. [4]

Skлонost napetosnoj koroziji austenitnih čelika može se vidjeti na dijagramu i ona direktno ovisi o sadržaju nikla u leguri. Drastično je smanjena sklonost koroziji u čelicima s manje od 5% i s više od 20% nikla kao što pokazuje dijagram ispod. [7]



Slika 4. Utjecaj udjela nikla na nastanak pukotina [7]

Na dijagramu se može primijetiti da u sivom području, koje pokazuje opasno područje, se nalaze najčešće korištene Cr-Ni austenitne legure. Pravilnim izborom stupnja legiranosti metala i izbjegavanjem označenog područja se može izbjeći napetosna korozija.

Zavarivanjem se postižu svi uvjeti napetosne korozije, pogotovo u agresivnom okolišu. Osim šta uzrokuje zaostala naprezanja, uzrokuje i već spomenutu senzibilizaciju metala koja također može biti inicijator napetosne korozije. Takvu koroziju je teško uočiti, a rezultira velikim gubitkom čvrstoće i žilavosti s malim gubitkom materijala, čime dolazi do pucanja konstrukcija.

Korištenje feritnih ili superaustenitnih čelika u nekim slučajevima umjesto austenitnih može se pokazati kao dobar način zaštite od ove korozije. Korištenje pravilno legiranih elemenata također. Toplinska obrada za smanjenje vlačnih naprezanja je opcija za tretiranje metala poslije zavarivanja, ali se mora izvesti s posebnom pažnjom da ne bi postigla kontraefekt.

2.4. Rupičasta korozija

Rupičasta korozija je općenito lokalni tip korozije čija dubina prodiranja je nakon nekog vremena puno veća od njene površine na materijalu. Uzrokuju ju lokalna kemijska ili mehanička oštećenja pasivnog filma na površini materijala, nehomogenosti u strukturi ili lokalno djelovanje mikroorganizama. Otpornost na rupičastu koroziju može se odrediti na osnovi djelotvorne sume elemenata, odnosno PREN broja.

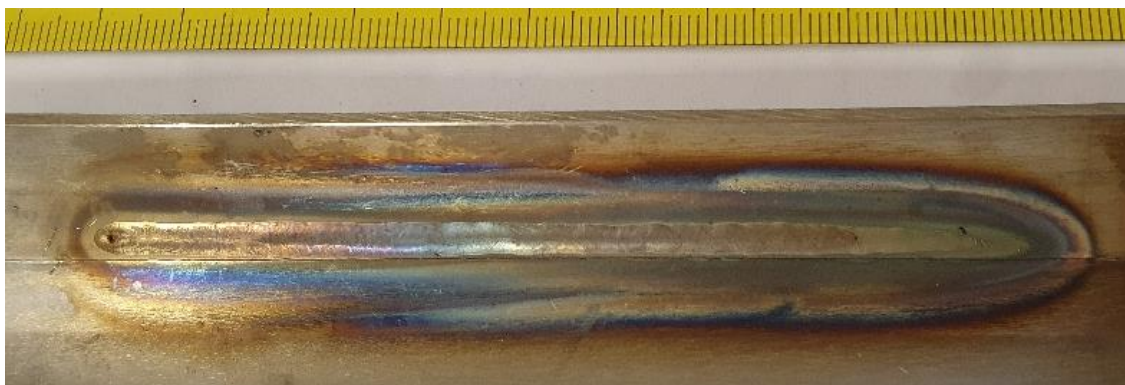
$$PREN = \%Cr + (3,0 - 3,3) \times \%Mo + (16 - 30) \times \%N, (1)$$

Vrijednosti PREN-a preko 25 smatraju se kao umjerena otpornost na rupičastu koroziju dok se vrijednosti veće od 35 smatraju visokom otpornosti. U tablici ispod dat je pregled PREN broja nehrđajućih čelika. [4]

Tablica 3. PREN broj nehrđajućih čelika [4]

Vrsta	Oznaka čelika		Maseni udio, %				PREN
	ASTM	EN	Cr	Ni	Mo	N	broj
Martenzitni	410	1.4006	12,5	-	-		12,5
Feritni	430	1.4016	12,5	-	-		12,5
Austenitni	304L	1.4306	18,5	10,5	-		18,5
	316L	1.4404	17	11,5	2,1		24
Superaustenitni	904L	1.4539	20	25	4,2	0,05	35
	S31254	1.4547	20	18	6,1	0,20	43
Dupleks	S32205	1.4462	22	5,5	3	0,17	35

Rupičasta korozija na nehrđajućim čelicima nastaje kao posljedica zavarivanja. Veliki unos topline prilikom procesa uzrokuje pobojanosti oko zavara i ta mjesta u određenim agresivnim sredinama uvjetuju nastanak ovog tipa korozije. Pobojanosti su rezultat oksidacije raznih dijelova sastava čelika. Novonastali film, tj. pobojanosti, je oksidni sloj koji se bitno razlikuje od zaštitnog pasivnog i u tim područjima pobojanosti se nalaze područja osiromašena kromom, a tako i nižeg otpora na koroziju. Razne pobojanosti mogu se vidjeti na slici 5.



Slika 5. Nastanak pobojenja prilikom TIG zavarivanja

Tokom visokih temperatura se u zoni utjecaja topline formiraju navedeni oksidi koji imaju značajnije veću debljinu od pasivnog sloja. Taj deblji sloj je često kontaminiran raznim česticama, koje ovisno o čestici svaka daje drugu boju. [8]

Osim pobojanosti, ostale nečistoće, mikroorganizmi, soli i atmosfere i vlaga samo su neke nehomogenosti koje mogu uzrokovati rupičastu koroziju.

Mehaničkim ili kemijskim uklanjanjem pobojanosti omogućuje se ponovno formiranje pasivnog sloja i time se može spriječiti nastanak rupičaste korozije. Također za zaštitu se preporučuje korištenje čelika s legiranim molibdenom. Osim toga također se preporuča korištenje superaustenitnih čelika za agresivne medije ili snižavanje pH vrijednosti i temperature takvih medija. Anodne zaštita je također primjenjiva za zaštitu od ovakve korozije. [4]

2.5. Mikrobiološki poticana korozija

Mikrobiološki poticana korozija nastaje u određenim vodenim uvjetima gdje aerobne bakterije oštećuju metal. Danas je poznato da je u vodi potreban kisik kako bi došlo do razgrađivanja metala. Izgledom na površini podsjeća na rupice i time se često zamjenjivala za rupičastu koroziju. Austenitni čelici koji nakon zavarivanja imaju dvofaznu austenitnu i feritnu mikrostrukturu su se pokazali kao posebno osjetljivi na mikrobiološki poticanu koroziju. [7]

3. KORIJENSKA ZAŠTITA

Osim navedenih korozijskih mehanizama koji se javljaju tokom zavarivanja austenitnih nehrđajućih čelika, opasne su i druge deformacije koje se pojavljuju tokom procesa. Najčešće od njih su nastanak pukotina tokom solidifikacije zavara. Karakteristično za pukotine koje predstavljaju opasnost u austenitnim čelicima je njihov nastanak u zoni utjecaja toplote, a ne uz granice zavara. Najčešća vrsta pukotina koje nastaju u austenitnom čeliku su tople pukotine. Nastaju pod utjecajem nečistoća poput sumpora i fosfora. Austenit nema dobru topljivost sumpora stoga su veće šanse formiranja niskotaljivih segregacija koje u posljednjem stadiju skrućivanja uzrokuju stvaranje međukristalnih toplih pukotina. Fosfor također pri skrućivanju uzrokuje stvaranje segregacija i spora mu je difuzija u željezu, time nastaju mjesta siromašna fosforom i legirnim elementima, te nastaje štetna nehomogenost strukture. Veći udio fosfora uzrokuje rast krhkosti metala. Sumpor i fosfor su posebno štetni čelicima s 100% austenitnom strukturom, dok imaju dobru topljivost u feritu. [7], [9]

Sprječavanje prethodno navedenih korozijskih mehanizama, nastanak pukotina uslijed procesa solidifikacije zavara, oksidacije, provarivanja i ostalih neželjenih pojava potrebno je cijeli proces optimizirati. Predugi period hlađenja zavara omogućuje nastanak karbida, previsoke temperature zavarivanja ugrožavaju korozijsku postojanost, legirni elementi imaju pozitivne i negativne utjecaje na svojstva, agresivna atmosfera uzrokuje napetosnu koroziju i mnogi su drugi faktori koji utječu na kvalitetu zavara. Stoga treba prilikom zavarivanja prikladno zaštititi zavar od raznih utjecaja, a posebna pažnja se pridaje zaštiti korijena zavara.

Korijen zavara ima temeljnu ulogu za ostatak zavara, velik utjecaj na mogućnost nastanka pukotina i korozije. Pogreške u korijenu zavara teško je detektirati budući da zavarivač često nije u mogućnosti vidjeti suprotnu stranu zavara i jer je obično pokriven ostalim zavarima. [10] Pogreške u korijenu zavara imaju najveći utjecaj na čvrstoću spoja, a korijen je mjesto gdje je najveća učestalost grešaka. Korijenska zaštita zavara je pojam koji većinom obuhvaća utjecaj zaštitnih plinova kao sekundarne zaštite zavara, dok će u idućim točkama biti opisani i procesi koji se izvode prije i poslije samog zavarivanja zbog postizanja tražene kvalitete zavara i izbjegavanja svih prethodno objašnjenih procesa koji narušavaju korozijsku postojanost austenitnih čelika.

3.1. Priprema površine

Prvi korak u procesu zavarivanja je priprema površine. Površinu treba „odmastiti“ ili očistiti kako bi se uklonile sve nečistoće na površini koje mogu pri visokim temperaturama zavarivanja oksidirati, prouzročiti lokalne dijelove s osiromašenim udjelom kroma i naposljetku uzrokovati rupičastu koroziju. Površina se čisti od jednostavnijih spojeva kao što su prašina, ulja, masti, boje, otisci prstiju i ostale nečistoće koje su na površinu metala dospjele vanjskim utjecajem. Takve spojeve je ponekad dovoljno očistiti etanolom, sredstvima za odmaščivanje, kiselinama, četkama, krpama ili u posebnim situacijama sredstvima za pripremu površine kao što su sprejevi i gelovi za premaz koji jednokratno štite područje na koje su naneseni.

Iznad nabrojani načini čišćenja i zaštite se mogu primijeniti na tipične atmosferske uvjete i nakon procesa čišćenja u normalnoj atmosferi se novi pasivni sloj uspostavlja odmah nakon završetka čišćenja. U drugim atmosferskim uvjetima, tj. agresivnim uvjetima, primjenjuju se dodatni koraci zaštite.

Tako na primjer je potrebno otklanjanje oksidnog sloja koji se stvori na površini u kloridnim solucijama. Oksidni sloj u takvom okruženju djeluje na depasivizaciju i direktno utječe na mogućnost nastanka rupičaste korozije. [11]

Većina svih nečistoća može se ukloniti gore navedenim metodama, a ostatak može se zaštititi elektropoliranjem i drugim kemijskim procesima. U nekim slučajevima je potreban tretman pasivizacije da bi se ponovno uspostavio zaštitni sloj. Generalno su hrapavije površine podložnije koroziji nego polirane površine stoga se za zaštitu mogu primijeniti i elektropoliranje ili fino brušenje. [4]

3.2. Zaštitni plinovi

Glavni korak zaštite pri zavarivanju je korištenje zaštitnih plinova. Uloga zaštitnih plinova je stvaranje inertne atmosfere pod tlakom u području korijena zavara. Primarna funkcija inertne atmosfere je uklanjanje kisika i ostalih elemenata iz područja zavara i time se sprječava početak oksidacije, nastanak pobojanosti i time rupičaste korozije čiji je štetan učinak opisan u točki 2.4.

Osim oksidacije, zaštitna atmosfera sprječava prodor ostalih elemenata iz zraka poput dušika, koji smanjuje žilavost, i vodika, koji potiče stvaranje poroznosti.

Plinovi koji su najčešći pri TIG zavarivanju austenitnih čelika su helij, koji je klasični inertni plin, i argon, koji se u posljednje vrijeme više koristi zbog sličnih utjecaja na zavar poput helija, niže cijene i omogućuje veću produktivnost. Osim što preventiraju kemijske reakcije između

okoliša i taljevine zavara, imaju velik utjecaj na stabilnost električnog luka, geometrijske karakteristike zavarenog spoja i sveukupnu stabilnost procesa.

Za korijensku zaštitu uz argon i helij koriste se dušik i vodik, najčešće kao mješavine.

3.2.1. Argon

Čisti argon (99,95% se smatra čistim argonom) se najčešće koristi kao sekundarna zaštita za TIG zavarivanje austenitnih čelika. Osim lake dostupnosti argona ističe se njegov niski ionizacijski potencijal. To omogućuje lakšu uspostavu i stabilnost električnog luka. Osim toga teži je od zraka i stoga pri korijenskoj zaštiti lakše „istisne“ zrak iz sapnice i štiti područja uz taljevinu. Kombinacijom sile njegove težine i gravitacijom najbolje štiti taljevinu u ravnom položaju. Potreban je manji protok prilikom zavarivanja i time se manje plina iskoristi, ostali plinovi trebaju veći protok kako bi pročistili štice dio od zraka. Proizvodi kompaktni električni luk čime se dobije manja penetracija i protaljivanje. Kod zavarivanja debljih dijelova čisti argon može prouzrokovati poroznost i nedovoljnu penetraciju stoga se u tim slučajevima uvijek koristi mješavina, najčešće s helijem. Tokom zavarivanja nehrđajućih čelika se, u usporedbi s čistim helijem kao sekundarnom zaštitom, postiže veća temperatura pri istim parametrima zavarivanja što za posljedicu daje veću zonu miješanja osnovnog i dodatnog materijala. Argon s malim udjelom kisika također pomaže u uklanjanju sumpora iz spoja, koji je često nepoželjan, unatoč tomu što uzrokuje bolju penetraciju i time veću produktivnost zavarivanja. [12]

Istraživanja su pokazala da pri korištenju čistog argona kao sekundarne zaštite na istom čeliku nakon hlađenja rezultira većim udjelom ferita u području zavara nego kao kad se koristi helij.

3.2.2. Helij

Helij (99,99% helija se smatra čistim) za razliku od argona ima viši ionizacijski potencijal i uspostava električnog luka i održavanje njegove stabilnosti je otežana. Helij je lakši od argona i time protoci plina moraju biti veći nego kod argona za postizanje inertne atmosfere u području zavara. Helij ima dobru toplinsku vodljivost što da rezultat daje veću penetraciju i unos topline. Veći unos topline se pokazuje dobrom značajkom za zavarivanje debljih komada. Tanji materijali se teže zavaruju jer helij pri nižim strujama postiže veći napon od drugih zaštitnih plinova. Helij koji se unese prilikom zaštite povećava čvrstoću spoja. Skuplji je od argona stoga se rjeđe koristi. [13]

3.2.3. Dušik

Dušik je kemijski inertan plin koji se za korijensku zaštitu najčešće koristi u mješavinama. Udio dušika u mješavini služi za kompenzaciju gubitaka dušika iz mjesta zavara. Istraživanja su

pokazala korelaciju između količine dušika u zavaru i sklonosti na rupičastu koroziju. Metali koji su za korijensku zaštitu imali čisti dušik, u usporedbi s onima gdje je korišten čisti argon, imali su veći udio austenita, tj. dušik potiče formiranje austenita u solidifikaciji korijena zavora. Prilikom zavarivanja može doći do nastanka pora i izlučivanja nitrda iz osnovnog metala koje uzrokuju nehomogenu strukturu i rupičastu koroziju. Kompenzacijom dušika pomoću zaštitnog plina postiže se ujednačena struktura. [14] Dušik iz zaštitnog plina pod utjecajem visokih temperatura miješa se s taljevinom osnovnog i dodatnog metala. Istraživanja su pokazala da je veći unos dušika povoljniji prilikom smanjenog volumena bazena taljevine. U tablici ispod dat je pregled postotka dušika u zavaru s obzirom na postotak dušika u osnovnom materijalu i zaštitnom plinu. Rezultati su dobiveni pri naponu od 13 V, jakosti struje od 110 A i protokom zaštitnog plina od 10 l/min.

Tablica 4. Udio dušika u zavaru s obzirom na udio dušika u osnovnom materijalu i zaštitnom plinu [14]

Udio dušika u osnovnom materijalu	Sastav zaštitnog plina	Maseni udio kisika u zavaru (%)	Maseni udio dušika u zavaru (%)
2205 0,13%N	2N ₂ 98Ar	0,09	0,16
	5N ₂ 95Ar	0,07	0,19
	8N ₂ 92Ar	0,08	0,20
2507 0,2507%N	2N ₂ 98Ar	0,09	0,17
	5N ₂ 95Ar	0,09	0,21
	8N ₂ 92Ar	0,11	0,25
2304 0,101%N	2N ₂ 98Ar		0,16
	5N ₂ 95Ar		0,18
	8N ₂ 92Ar		0,19
SMO 0,212%N	2N ₂ 98Ar		0,11
	5N ₂ 95Ar		0,14
	8N ₂ 92Ar		0,20

Zbog male dostupnosti i visoke cijene argona za korijensku zaštitu danas se sve više koristi čisti dušik i njegove mješavine. Dušik se koristi za nehrđajuće čelike, ali je veća primjena za dupleks čelike i superaustenitne, dok se također koristi za austenitne čelike s većim udjelom dušika. [15]

3.2.4. Vodik

Vodik je plin koji se najčešće koristi u mješavinama za zavarivanje austenitnih nehrđajućih čelika. Uobičajeno se koristi mješavina s argonom. Ima najmanju masu od svih nabrojanih elemenata i najveću toplinsku vodljivost. Iako je lagan, ima bolju efikasnost od argona pri stvaranju reducirajuće atmosfere i time je bolja korijenska zaštita. Dobra toplinska vodljivost povećava penetraciju zavara i omogućuje veće brzine zavarivanja. Ipak, prisustvo vodika u području zavara može izazvati poroznost. Poroznost dalje može prouzrokovati nastanak pukotina u području zavara. Ta pojava je prisutna u nehrđajućim čelicima, osim u austenitnim. Austenitni čelici pokazuju sklonost vodikovim pukotinama ako se uz austenit u mikrostrukturi nalazi martenzit. Kod austenitnih vodik osim dobre penetracije, stabilizira električni luk i pomaže u reduciraju oksida s površine metala. [16], [12]

3.2.5. Mješavine

U praksi se koriste čisti plinovi, ali zbog poboljšavanja svojstava često se dodaju ostali elementi koji onda skupa čine mješavine. Mješavine koje se najčešće koriste za zaštitu austenitnih čelika dane su u tablici ispod.

Tablica 5. Mješavine za zaštitu austenitnih čelike i karakteristike [17], [18], [19]

Karakteristike	Mješavine plinova korištene za zaštitu austenitnih čelika			
	Argon/helij	Argon/vodik	Argon/dušik	Vodik/dušik
Brzina zavarivanja	Bolja brzina zavarivanja s obzirom na čisti argon	Bolja brzina zavarivanja s obzirom na čisti argon	Bolja brzina zavarivanja s obzirom na čisti argon	Dobra zbog vodika
Penetracija	Bolja penetracija od čistog argona	Bolja penetracija od čistog argona	Bolja penetracija od čistog argona	Dobra zbog vodika
Stabilnost luka	Bolja stabilnost luka s obzirom na čisti helij	Veća stabilnost od čistog argona	Veća stabilnost od čistog argona	Dobra zbog vodika
Unos topline	Veći unos topline s obzirom na čisti argon	Veći unos topline od čistog argona	Veći unos topline od čistog argona	Dobra zbog oba elementa
Svojstvo čišćenja površine	Bolje čišćenje površine s obzirom na čisti helij	Bolje čišćenje površine od čistog argona	Bolje čišćenje površine od čistog argona	Odlično zbog vodika
Cijena	Jeftinije od čistog helija, a skuplje od čistog argona	Veća cijena od čistog argona	Manja od čistog argona	Najjeftiniji od navedenih

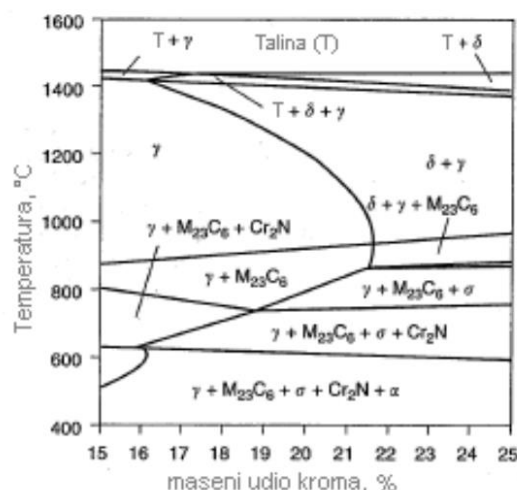
Neki od komercijalnih naziva i postoci udjela elemenata mješavina plinova koji se često koriste za korijensku zaštitu austenitnih nehrđajućih čelika su:

- Argon 5.0 (99,99990% Ar), Argon 4.8 (99,99998%)
- Forming gas H5 (95% N₂, 5%H₂)
- Inoxline H5 (95% Ar, 5% H₂), koriste se mješavine sa do 10% H₂ , [20]

3.3. Puhanje nakon zavarivanja

Puhanje zaštitnog plina nakon procesa zavarivanja se provodi da bi se osigurala zaštitna atmosfera u procesu hlađenja. Proces hlađenja, tj. solidifikacije zavara potrebno se provesti brzo da ne bi došlo do pojave toplih pukotina.

Također se održavanjem zaštitne atmosfere onemogućuje oksidacija na isti način opisan u točki iznad. Ovisno o svojstvima i legiranosti čelika koji se koristi bitno je omogućiti korijensku zaštitu zavara dok se temperatura područja ne snizi ispod 400 °C. Iznad temperature od 400 °C dolazi do izlučivanja karbida i promjene mikrostrukture u metalu, a ispod te temperature nastaje stabilna mikrostruktura i daljnji prodor nečistoća i kisika u talinu zavara je onemogućen., što je primjetno na dijagramu ispod. Dijagram prikazuje temperature pri kojima počinje nastanak štetnih precipitata i razlog korištenja korijenske zaštite pri procesu hlađenja zavara.



Slika 6. Dijagram nastanka karbida s obzirom na temperaturu [3]

U praksi pri radnim uvjetima često se ne koristi termometar prilikom zavarivanja i stoga se preporučuje gašenje korijenske zaštite u trenutku kada je metal koji se zavaruje moguće dodirnuti bez rukavica prilikom čega ne dolazi do opeklina na koži.

3.4. Mjerenje udjela kisika

Kisik predstavlja najveću opasnost u sastavu zraka pri zavarivanju u atmosferi stoga ga je potrebno mjeriti. Osiguranje kvalitete korijenske zaštite i efektivnost iste mjeri se udjelom kisika u području zavara. Idealno je imati udio kisika u zaštitnoj atmosferi ispod 100ppm, dok su vrijednosti koje se često viđene u praksi oko 50ppm, a materijali sa visokim zahtjevom za čistoću zaštite obično ispod vrijednosti 10ppm kisika u području mjerenja.

Udio kisika u atmosferi se općenito mjeri oksimetrom. Oksimetri s visokom osjetljivošću na udio kisika i nastavkom na kraju cijevi za prikupljanje uzorka s otpornošću s visoke temperature mogu se lako primijeniti prilikom zavarivanja ravnih ploča, konstrukcija i cijevi. [21]

Udio kisika se mjeri na uzorku koji se pomoću cijevi uzima iz štíćene atmosfere pomoću pumpe. Nakon toga se uzorak analizira pomoću senzora za kisik koji rezultate mjerenja prenosi u obliku postotka na ekran ili se podaci spremaju u memoriju. Ovisno o modelu, vrijednosti mjerenja su postavljene u vremenskom intervalu po potrebi. Oksimetri mogu imati priključak za struju i bateriju ili oboje. Također je većinu oksimetara moguće privremeno instalirati na konstrukciju ili ih je moguće pridržavati ručno. Najvažnija specifikacija oksimetra je pumpa, koja mora biti pravilno kalibrirana. Dobra kalibracija je bitna za dobivanje pravilnih očitavanja. [22]



Slika 7. Mjerenje udjela kisika sapnicom oksimetra

4. TIG zavarivanje

TIG zavarivanje (eng. Tungsten Inert Gas) je elektrolučni postupak zavarivanja koji za zaštitu područja zavara koristi interni plin. Toplinom oslobođenom u električnom luku se tali osnovni materijal, a po potrebi i dodatni. Električni luk uspostavljen je između elektrode načinjene od volframa i radnog komada. Elektroda je načinjena od čistog volframa ili od volframa s nekim legirajućim elementima (torijev ili cirkonijev oksid). Elektroda služi isključivo za uspostavu i održavanje električnog luka. Iako je elektroda u teoriji netaljiva uslijed erozije vrha elektroda se troši. U prosjeku elektroda duljine 170mm može trajati 30h rada.

Struje koje se koriste u TIG zavarivanju su istosmjerna pozitivna, istosmjerna negativna i izmjenična ili impulsna. Najčešće se koristi istosmjerna struja s negativnim polom na elektrodi. Vrsta struje određuje koji se materijali mogu zavariti, ali uvjetuje i oblik vrha elektrode, koji mora biti prikladno izbrušen. Oštar vrh elektrode omogućuje bolju penetraciju i koristi se kod istosmjernog izvora struje s negativnim polom i time omogućuje najveće moguće opterećenje elektrode, dok kod istosmjernog izvora s pozitivnim polom na elektrodi koristi se zaobljeni vrh i dozvoljeno je vrlo malo opterećenje elektrode, a samim time nije moguće postići veliku penetraciju.

TIG zavarivanje može biti ručno, polu-automatsko i automatsko. Općenito TIG postupak se koristi kod potrebe za visokom kvalitetom zavara i pogodan je za bilo koje položaje zavarivanja. Stoga se često primjenjuje u zavarivanju cijevi gdje često možemo naići na uske prostore (npr. kotlovnica broda) i visoka potreba za kvalitetom (cijevi kojima se transportira nafta, plin, itd.). Zbog odličnih korozivnih svojstava nehrđajuće cijevi se koriste i u kemijskoj, prehrambenoj i prerađivačkoj industriji. Osim odlične kvalitete i primjene na bilo koje položaje rada neke od prednosti korištenja TIG postupka su smanjena zona utjecaja topline, zavarivanje raznih materijala, s naglaskom na mogućnost zavarivanja tankih limova, postupak je pogodan za izvođenje reparaturnih radova i moguće je postići odličan izgled zavara. Nedostaci TIG zavarivanja su niska produktivnost, visoka cijena opreme, potreban je izuzetno vješt zavarivač, potrebna je detaljna priprema mjesta spoja i otežanost izvođenja na otvorenim prostorima. [23], [24], [10].

4.1. Pogreške kod TIG zavarivanja austenitnih čelika

Korozija zavarenih spojeva se osim pravilnom primjenom korijenske zaštite i pripremom površine zavara može spriječiti i ostalim metodama na koju pri TIG zavarivanju treba skrenuti pozornost. Neki od koraka pri zavarivanju koje treba pravilno izvesti su:

- Pravilno projektiranje zavara – kod TIG zavarivanja austenitnih čelika potreban je veći kut otvora spoja nego kod ugljičnih čelika, čime se postiže sigurnost od protaljivanja
- Predgrijavanje – predgrijavanje i grijanje međuprolaza kod austenitnih čelika nije potrebno jer nema utjecaj, osim kod debljih dijelova
- Termička obrada – smanjuje zaostala naprezanja i omogućuje dimenzijsku postojanost, ali se mora izvesti s oprezom zbog mogućih formiranja karbida pri visokim temperaturama [4]
- Protok zaštitnog plina – ne treba biti premali jer može dovesti do poroznosti, ali ne treba biti ni prevelik jer dovodi do turbulentnih strujanja što dovodi do nehomogenosti u strukturi
- Uključci volframa – do uključaka volframa u talinu može doći pri korištenju nepravilne tehnike rada ili pri lošem izboru veličine elektrode. Preveliko strujno opterećenje na promjer elektrode može dovesti do otkidanja elektrode [8]

5. Eksperimentalni dio

5.1. Opis eksperimenta

Proveden je eksperiment kojim se utvrđuje utjecaj dvaju različitih zaštitnih plinova i udio kisika na korozijsku postojanost zavara pri TIG zavarivanju Cr-Ni čelika. Svi parametri, osim zaštitnog plina i udjela kisika, su jednaki pri svakom uzorku, čime se osigurava ovisnost korozijske postojanosti samo o zaštitnim plinovima i udjelu kisika.

Eksperiment je proveden u dvije faze. Prvi dio je navarivanje. Navaruje se cijev Cr-Ni čelika. Dva su zavara s čistim argonom kao plinom za korijensku zaštitu, a dva su štice s Inoxline H5 (mješavina argona i vodika). Jedan od dva zavara s istim zaštitnim plinom je navaren sa zaštitnom atmosferom od ispod 100ppm kisika, dok je drugi navaren u rasponu od 100ppm do 5% kisika.

U drugoj fazi eksperimenta provedeno je ispitivanje na koroziju. Ispitivanje je provedeno elektrokemijski i svaki uzorak je izložen korozivnom mediju. Rezultati ispitivanja trima različitim testovima daju podatke o brzini korozije, korozijskom potencijalu i polarizacijskom otporu koji su pokazatelji afiniteta prema elektrokemijskoj koroziji.

5.2. Osnovni materijal

Osnovni materijal je Cr-Ni čelik oznake X5 CrNi 18-10. To je austenitni nehrđajući čelik koji općenito ima dobra korozivna svojstva. Navaruje se cijev duljine 30 cm, promjera 4.8 cm i debljine 2 mm. Cijev prije navarivanja prikazana je na slici 8 ispod.



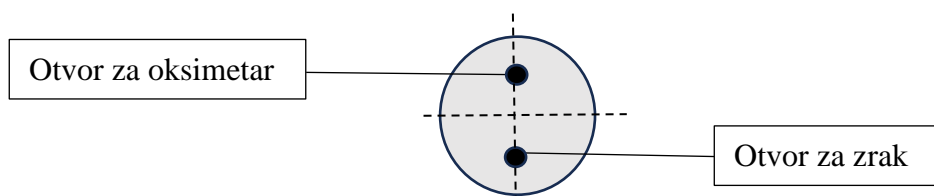
Slika 8. Izmjere cijevi

Cijev je prije korištenja očišćena etanolom i time je osigurana čistoća površine metala. Na oba kraja cijevi postavljena je aluminijska traka. Na jednom kraju postavljena je radi izolacije međuprostora koji se nalazi između promjera cijevi i cijevi za zaštitnim plinom koji se upuhuje, dok na drugoj strani je zalijepljena traka kako bi se regulirao protok plina koji izlazi iz cijevi. Regulacijom protoka plina iz cijevi sprječava se turbulentno strujanje zaštitnog plina i omogućuju se bolja očitavanja udjela kisika s oksimetrom. Regulacija protoka provodi se s dvije rupice u aluminijskoj traci, jedna za oksimetar, koja se nalazi više budući da je argon lakši od zraka, dok je druga, donja rupica, namijenjena za izlazak zraka iz cijevi.

Nakon pripreme cijevi za zavarivanje ona se stavlja na uređaj za zavarivanje i s jedne strane se priključuje na cijev za korijensku zaštitu dok je s druge je pridržavan oksimetar.



Slika 9. Postavljanje cijevi na uređaj za zavarivanje



Slika 10. Shema regulacije protoka

5.3. Oprema za zavarivanje

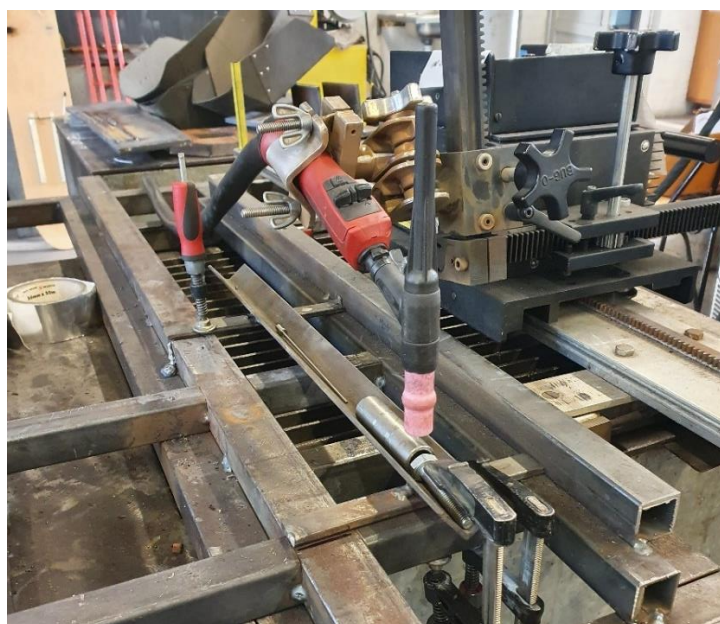
Oprema korištena za navarivanje nalazi se u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zgarebu.

Izvor struje za zavarivanje koji je korišten ima komercijalni naziv Fronius Magic Wave 230I EF. Koristi se za TIG zavarivanje. Njegove specifikacije prikazane su na slici ispod.



Slika 11. Uređaj za zavarivanje Fronius Magic Wave 230I EF

Postupak je proveden polu automatizirano, čime se osigurava ponovljivost rezultata pri svakom uzorku. Uređaj koji se koristi je BUG-O Systems, koji služi za automatizaciju procesa i nalazi se na slici ispod.



Slika 12. Automatizacija procesa

Zaštitni plinovi koji se koriste pri zavarivanju su Argon 5.0, Argon 4.8 i Inoxline H5. Argon 4.8 koristi se za vanjsku zaštitu na svim uzorcima, dok se Argon 5.0 i Inoxline H5 koriste za korijensku zaštitu, koja se upuhuje u cijev, na dva uzorka svaki.



Slika 13. Zaštitni plinovi

5.4. Opis procesa navarivanja

Cijev koja je očišćena i pripremljena na uređaju navaruje se četiri puta i time se dobiva četiri zavara. Zavari su međusobno udaljeni 90° . Primarni zaštitni plin je spojen na Argon 4.8. Prva dva navara napravljeni su Argonom 5.0 kao korijenskom zaštitom. Inoxline H5 zavari su napravljeni drugi po redu zbog vodika, koji bi mogao utjecati na zavare od Argon 5.0 budući da se zavaruje ista cijev. Nakon spajanja korijenske zaštite na cijev spaja se oksimetar. Oksimetar korišten zove se PRO OX-100 i nalazi se na slici ispod. Njegova sapnica za uzimanje uzorka stavljena pridržava se rukom prilikom zavarivanja kao što je objašnjeno u točki 5.2.



Slika 14. Oksimetar PRO OX-100

Parametri prilikom zavarivanja isti su za sve uzorke. Jačina struje, brzina zavarivanja namješteni su ručno, dok je napon izvor struje automatski prilagođen. Protok plina namješten je ručno, odvrtnjem ventila na slici 13.

Tablica 6. Parametri zavarivanja

Brzina zavarivanja	Protok primarnog zaštitnog plina	Protok sekundarnog zaštitnog plina	Jačina struje	Visina električnog luka
13cm/min	9 l/min	1,5 l/min	70A	3 mm

Nakon zavarivanja prilikom hlađenja nastavlja se puhanje korijenske zaštite, kako ne bi došlo do neželjenih uključaka. Hlađenje ispod temperature od 400°C regulirano se korištenjem termometra na slici.



Slika 15. Fluke IR termometar

Nakon navarivanja cijev se izrezana na četiri dijela kako bi se mogla izvršiti vizualna analiza dobivenih zavara. Cijev je izrezana na pili BS 350 GH sa slike. Prilikom rezanja nisu se koristila sredstva za hlađenje kako ne bi utjecala na pasivni film i nastale okside na zavarima. Također se prilikom brušenja temperatura regulirala termometrom kako ne bi visoka temperatura pri rezanju uzrokovala nove neželjene uključke, oksidaciju ili promjenu u mikrostrukturi.



Slika 16. Proces rezanja uzoraka


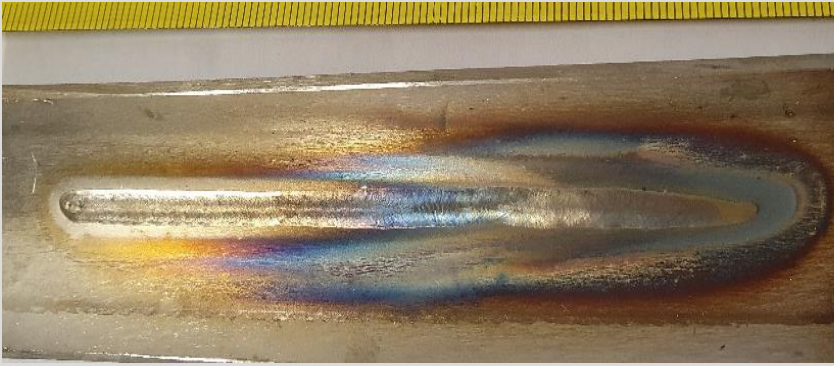
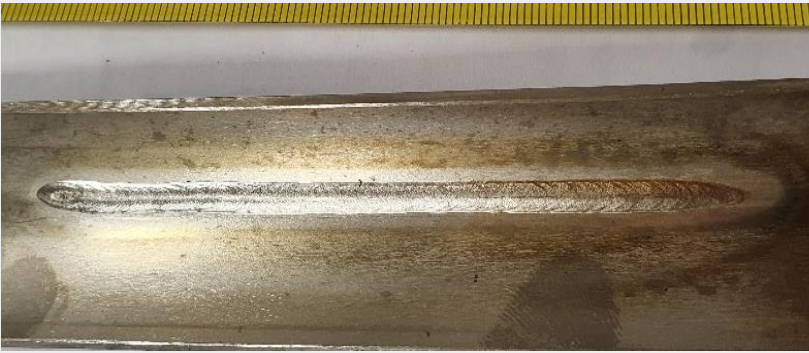
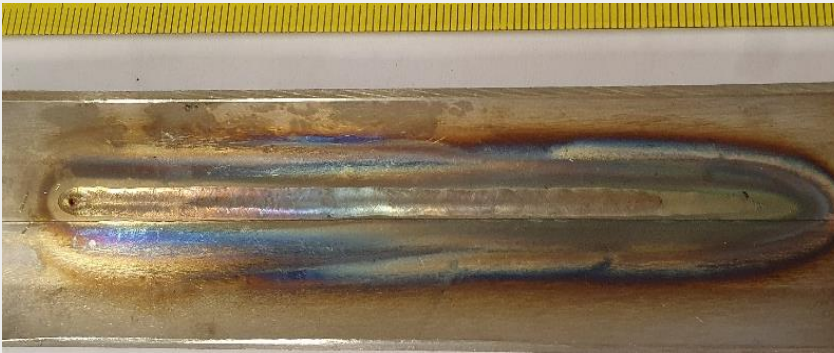
5.5. Rezultati navarivanja

Vanjski zavari su napravljeni svi sa istim zaštitnim plinom i s istim parametrima stoga ne iznenađuje da su svi zavari isti. Na slici su vidljiva mala pobojenja na svakom navaru koja nisu nastala u navaru već u zoni utjecaja topline. Navari su kontinuirane širine, nemaju poroznosti niti uključke od nečistoća. Na navarima nema pukotina.



Slika 17. Vanjska strana navara

Tablica 7. Unutarnja strana navara i njihovi promjenjivi parametri

	<100 ppm O ₂	<100 ppm – 5% O ₂
Argon 5.0	<p><u>Uzorak A</u></p> 	<p><u>Uzorak B</u></p> 
Inoxline H5	<p><u>Uzorak C</u></p> 	<p><u>Uzorak D</u></p> 

- Nema vidljivih pukotina, poroznosti i uključaka niti na jednom uzorku.
- Na uzorku A, na kojem je korišten Argon 5.0 i razina kisika je bila ispod 100 ppm, vidljiva su jako mala pobojenja. Pobojenja također nisu uz zavar već u zoni utjecaja topline. Zavar je zadovoljavajuć i može se zaključiti kako je Argon 5.0 dobar za korijensku zaštitu.
- Uzorak B ima istu korijensku zaštitu kao uzorak A, ali je udio kisika veći. Zavar je napravljen tako da se s lijeva na desno povećava udio kisika s ispod 100ppm na 5% kisika. Zavar na kraju s ispod 100ppm izgleda kao uzorak A, dok se prema drugom kraju povećavaju pobojanosti. Na početku nastajanja pobojanosti javljaju se u zoni utjecaja topline, a ne uz zavar, dok se na otprilike pola uzorka počinju pojavljivati na zavaru. Vidljivo je kako se količina pobojanosti drastično povećava s približavanjem kraju s 5% kisika.
- Uzorak C napravljen je s udjelom kisika ispod 100ppm i zaštitnim plinom Inoxline H5. Pobojenja koja su nastala su šira nego kod uzorka A stoga se može zaključiti da je veći unos topline prilikom korištenja Inoxline H5. Pobojenja su također izraženija.
- Uzorak D napravljen je s Inoxline H5 i udjelom kisika u rasponu od ispod 100ppm do 5% kisika. Povećavanjem udjela kisika povećavaju se i pobojanosti. Nastanak pobojanosti je u uzorku D puno raniji nego u uzorku B. Time se može zaključiti kako kisik ima štetniji utjecaj na zaštitu s vodikom, zbog brže reakcije.

Iz vizualnih pregleda može se zaključiti kako je zaštita s Argonom 5.0 djelotvornija u prevenciji oksidacije.. Preporuka je koristiti argon s vodikom samo kada je razina kisika niska zbog bolje produktivnosti, dok se čisti argon može koristiti u situacijama kada kisik nije moguće u potpunosti ukloniti (vanjski uvjeti – vjetar, morska atmosfera...). Jednolične zavare je lakše postići s Inoxline H5, a samim time i bolju stabilnost procesa. Argon 5.0 zahtijeva detaljniju pripremu, dok je Inoxline H5 prilagodljiviji na sitne nepravilnosti.

Pobojenja koja su nastala direktno ovise o udjelu kisika u zaštitnoj atmosferi. Stoga se razlikuju područja na uzorku na kojima su nastala. Napravljena je analiza koja uspoređuje uzorke sa istim udjelima kisika, a različitim zaštitnim plinovima u tablici ispod.

Tablica 8. Analiza pobojenja

Dimenzije pobojenja	
<100ppm O ₂	
Uzorak A	Uzorak C
Pobojenja na uzorku A nalaze se oko zavara i počinju 4 mm od ruba zavara. Na rubovima zavara su pobojenja širine 2 mm dok na sredini zavara pobojenja nisu tolikog intenziteta, ali imaju širinu 5 mm.	Pobojenja na uzorku C nalaze se oko zavara i počinju 3 mm od ruba zavara. Na rubovima su pobojenja širine 3 mm dok na sredini zavara dostižu i 7 mm širine.
Utvrđeno je da pobojenja na uzorku C pokrivaju veći dio uzorka nego kod uzorka A i time se potvrđuje bolji utjecaj na prevenciju oksidacije s korištenjem zaštitnog plina Argon 5.0.	
<100ppm O ₂ - 5% O ₂	
Uzorak B	Uzorak D
Na uzorku B pobojenja nastaju odmah na početku (lijevi kraj) i ne nalaze se na zavaru, već 3 mm od ruba zavara i imaju širinu od 4mm. U smjeru povećanja udjela kisika povećava se širina pobojenja na 16 mm od ruba zavara, dok se počinju stvarati pobojenja na pola uzorka (5,5 cm od početka zavara) direktno na samom zavaru.	Na uzorku D pobojenja nastaju pri početku zavarivanja (lijevi kraj) i početak im je 2 mm od ruba zavara. Širina im je 8 mm na lijevom kraju, dok se u smjeru povećavanja udjela kisika širina povećava na 13 mm od ruba zavara. Pobojenja se nalaze direktno na zavaru već 2 cm od lijevog ruba, tj. početka zavarivanja.
U usporedbi uzoraka B i D može se primijetiti kako su pobojenja veće širine na uzorku B, nego D, ali se u uzorku D puno ranije dogodi prodiranje oksidacije i pobojenja u sami zavar.	

5.6. Ispitivanje na koroziju

Ispitivanje na koroziju je također provedeno na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Provedeno je elektrokemijsko ispitivanje na koroziju. Uzorci su zbog ograničenja veličine posude za ispitivanje uronjeni 3 cm u elektrolit. Elektrokemijska korozija nastaje u elektrolitima, a u ovom slučaju korištena je otopina NaCl. Afinitet prema koroziji očituje se kao električni napon, tj. kao razlika potencijala između mjenenog uzorka i referentne elektrode. Elektrokemijska korozija je općenito kemijski redukcijско-oksidacijski proces u kojem dolazi do oksidiranja i reduciranja, tj. otpuštanja i primanja elektrona. Broj elektrona koji se oslobađaju anodnom reakcijom jednak je broju elektrona koji katodna reakcija prima. Anodna reakcija je ona koja uzorkuje koroziju. [4]

Uzorak je uronjen u elektrolit i spojen na potenciometar i galvanometar VersaStat koji potiče nastanak korozije koji se nalazi na slici 18. Također je istim uređajem nakon tri provedena testa izmjeren rezultat mjerenja na računalu u softwareskom programu VersaStudio. [25]



Slika 18. VersaSTAT potenciometar i galvanometar

Na posudu za ispitivanje prvo su spojeni svi dijelovi. Koristi se metoda elektrokemijskog ispitivanja s tri elektrode. Uzorak ima ulogu radne elektrode, tj. elektrode na kojoj se odvija reakcija. Referentna elektroda služi za usporedbu, tj. dobivanje rezultata mjerenja. One su napravljene tako da imaju dobro definiran i stalan potencijal. U ovom slučaju koristi se kalomelna elektroda. U posudici unutar kalomelne elektrode nalazi se živa i sloj paste priređene

miješanjem teško topivog Hg_2Cl_2 (kalomel), žive i otopine KCl. Treća elektroda je grafitna i na njoj nastaje oksidacija čime omogućuje nastanak iste na radnoj elektrodi. Posude koja je korištena za provedbu testa s tri elektrode nalazi se napunjena elektrolitom i spojenim radnim uzorkom na slici ispod. Površina uzorka koja je uronjena u elektrolit i time je i ispitivana iznosi 21 cm^2 .



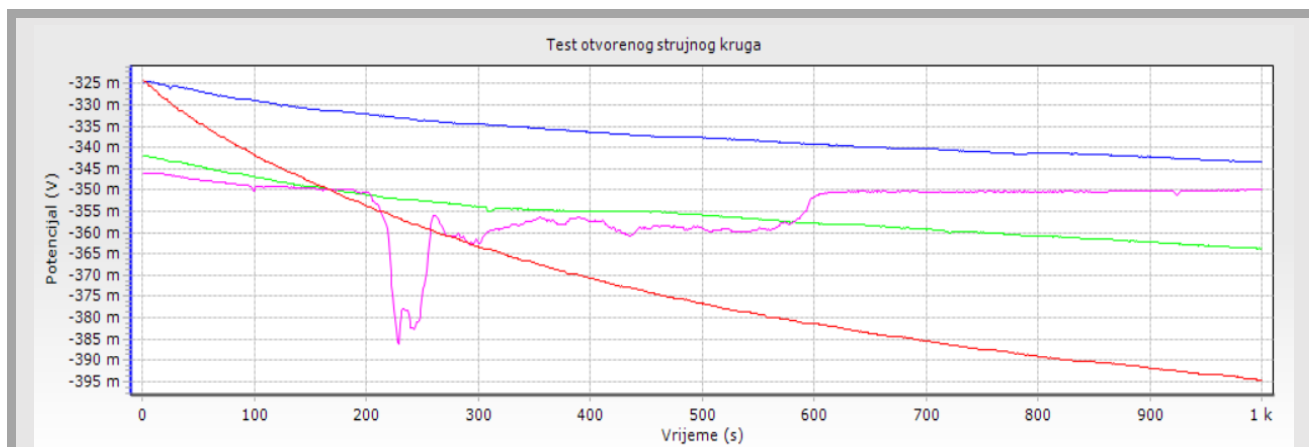
Slika 19. Posuda za test s tri elektrode

5.7. Rezultati ispitivanja na koroziju

5.7.1. Otvoreni strujni krug

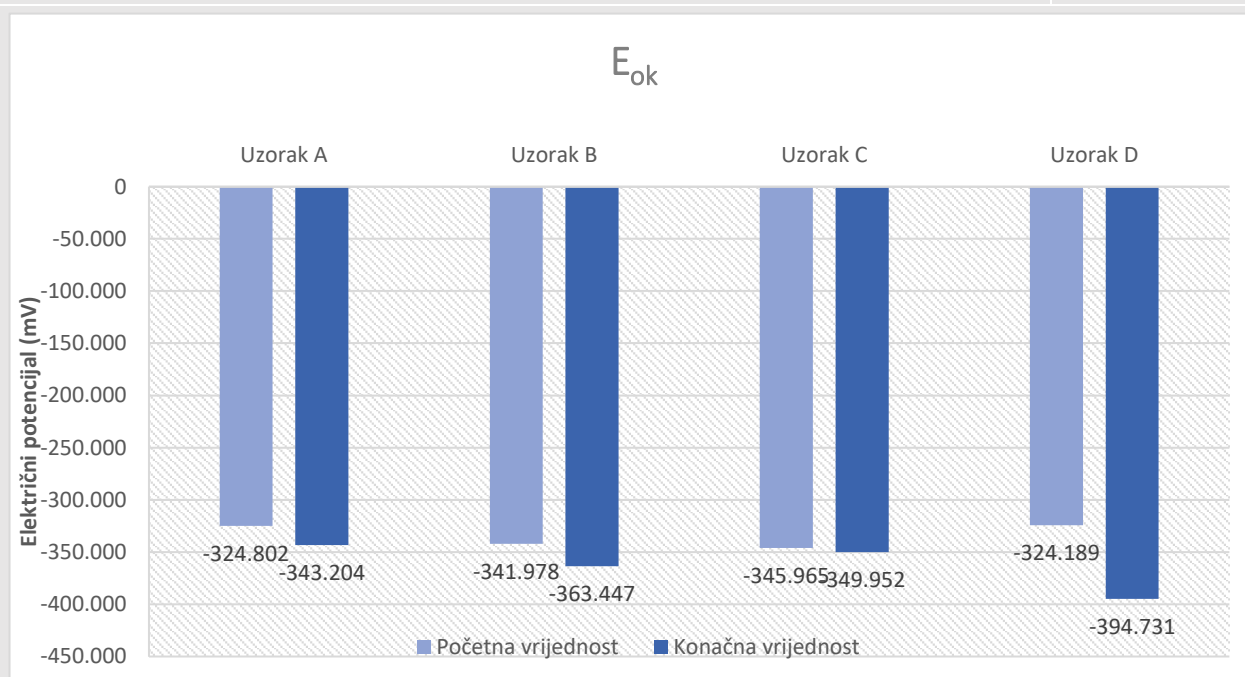
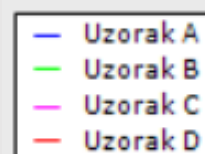
Test otvorenog strujnog kruga je prvi test koji se provodi na svim uzorcima i njime se dobije vrijednost električnog potencijala (E_{ok}). Najnegativnija vrijednost ukazuje na dolazak do najvećeg raspada pasivnog filma. Krivulje testova na svim uzorcima s njihovim krajnjim vrijednostima nalaze se u tablici 8. Uzorci A, B i D imaju kontinuirani pad električnog potencijala kroz vrijeme od 1000s, koje dokazuju raspad pasivnog filma. Uzorak C ima drastičan pad u rasponu od 200 do 600s mjerenja, koje je rezultat nepravilnosti pri mjerenju i može se zanemariti.

Tablica 9. Rezultati testa otvorenog strujnog kruga



U grafu iznad prikazani su rezultati testa za svaki uzorak u software-u VersaStudio.

U stupčastom grafu ispod su ispisane početne i konačne vrijednosti električnog potencijala.



- Uzorak A je u usporedbi s ostalima imao najmanje negativnu konačnu vrijednost električnog potencijala što za rezultat daje najbolji pasivni film od svih uzoraka.
- Uzorak B u usporedbi s uzorkom A ima negativniju konačnu vrijednost E_{ok} što je konzistentno s vidljivom oksidacijom na uzorku. Može se zaključiti da je veći raspad pasivnog filma na uzorku B nego na A uzorku. Kisik u zaštitnoj atmosferi je ubrzao raspad pasivnog sloja u otopini NaCl.
- Uzorak C, koji ima dobru korijensku zaštitu, ima također negativniji E_{ok} od uzorka A što je očekivano jer je malo više oksida nastalo na uzorku. Unatoč tomu vrijednosti su poprilično bliske, stoga se može reći da uzorak A i C imaju približno jednak pasivni film. Na ovom uzorku došlo je do najmanjeg pada E_{ok} , što znači da Inoxline H5 s udjelom kisika ispod 100ppm u zaštitnoj atmosferi ima najstabilniji pasivni film u otopini NaCl. Iako je konačna vrijednost uzorka A bolja, pad je veći, što znači manju stabilnost pasivnog filma.
- Uzorak D je u usporedbi s C uzorkom puno negativniji što znači da zaštitni plin Inoxline H5 loše reagira u prisustvu kisika u zaštitnoj atmosferi. Također je razlika između konačne i početne vrijednosti puno veća nego kod uzorka B, čime se može zaključiti bolja postojanost pasivnog filma u zaštitnoj atmosferi s Argonom 5.0 kada ima prisustvo kisika.

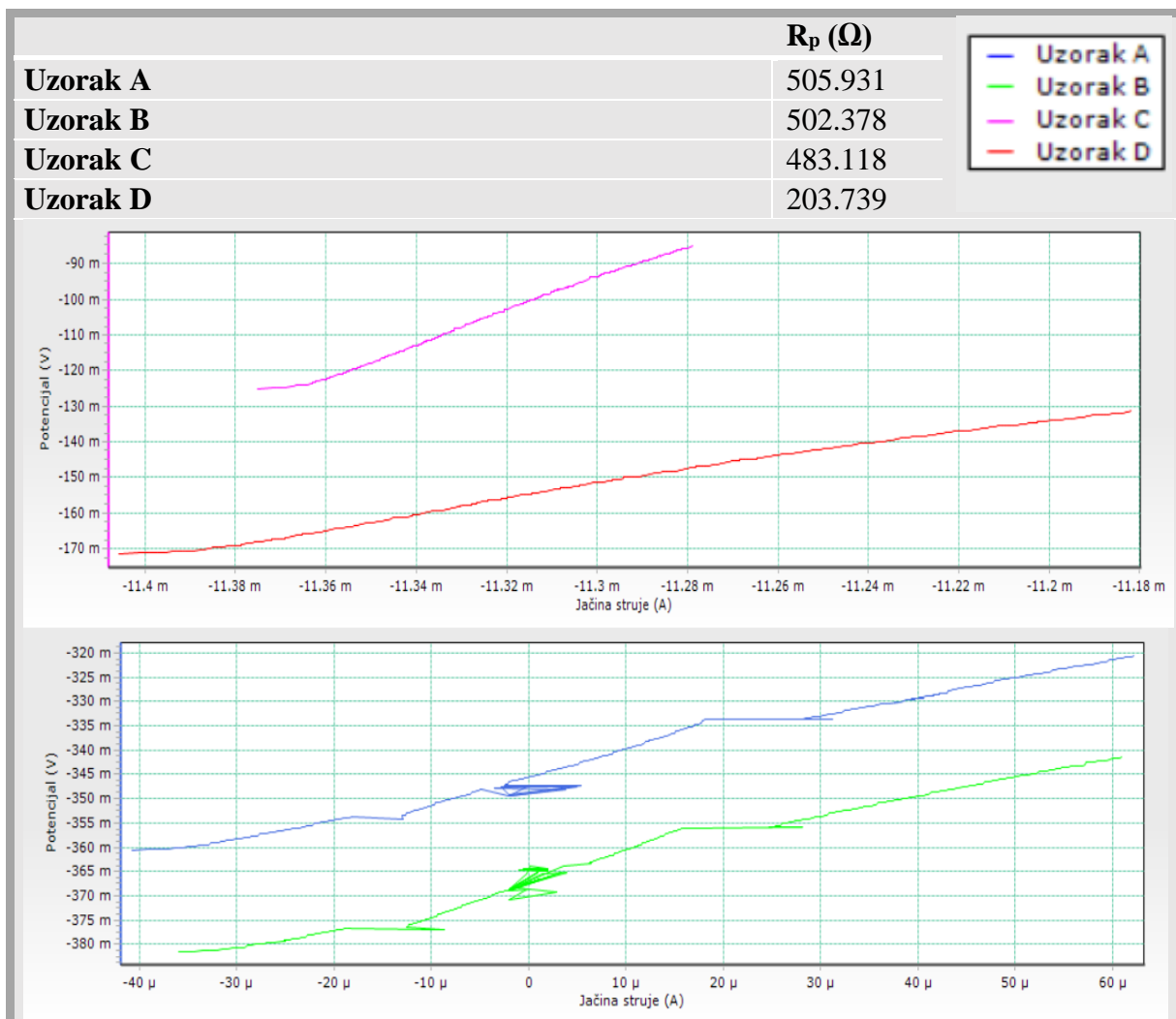
Kisik ima puno veći utjecaj na raspad pasivnog filma u kombinaciji s Inoxline H5 zaštitnim plinom. Razlika početne i konačne vrijednosti E_{ok} je u uzorku C puno manja, dok je u uzorku D skoro 15 puta veća.

Kisik nema toliko velik utjecaj intenzitet raspada pasivnog filma pri zaštiti Argonom 5.0. Razlike početne i konačne vrijednost E_{ok} u uzorku s malim i velikim udjelom kisika su gotovo iste.

5.7.2. *Linearna polarizacija*

Drugi test koji se proveo na sva četiri uzorka je test linearne polarizacije. Linearna polarizacija za rezultat daje vrijednosti otpora na polarizaciju. Otpor na polarizaciju R_p pokazatelj je otpora promjene potencijala u pozitivnom (katodnom) ili negativnom (anodnom) smjeru. Veći R_p znači veći otpor oksidaciji. Rezultati linearne polarizacije i pripadne vrijednosti otpora dani su u tablici 9 na idućoj stranici.

Tablica 10. Rezultati testa linearne polarizacije



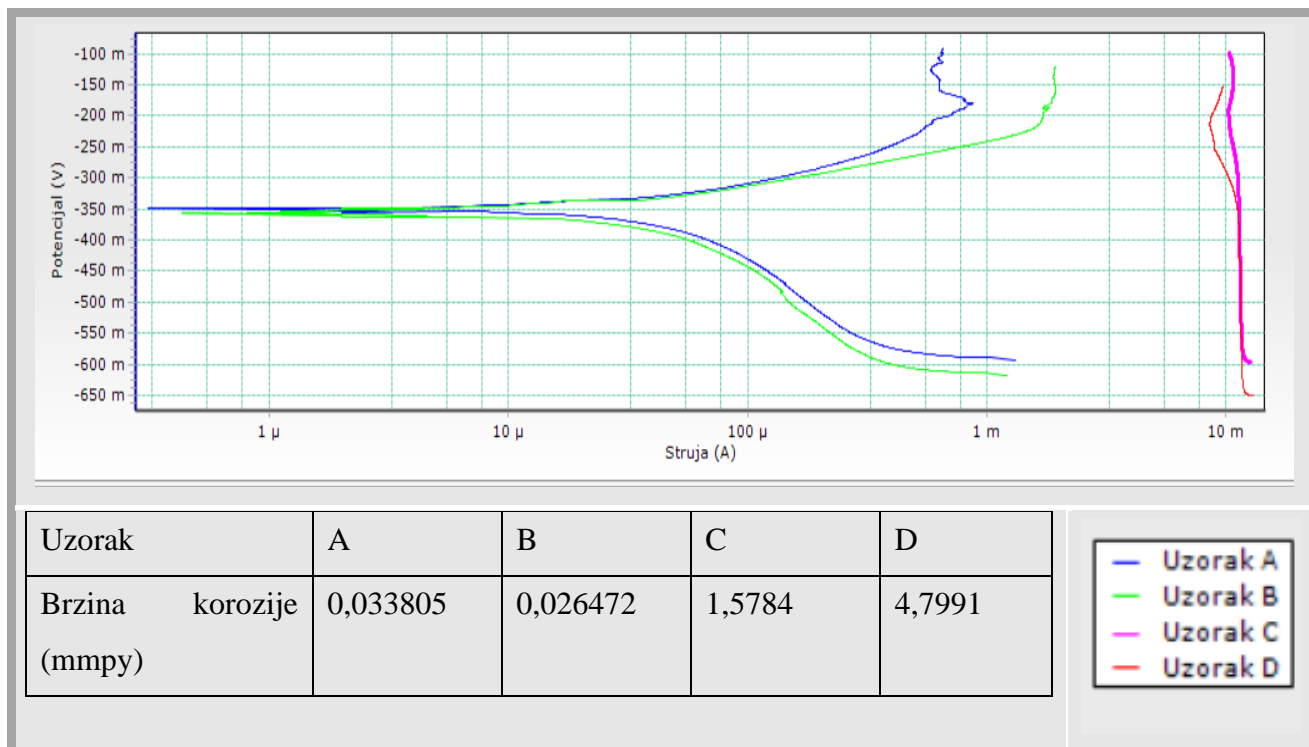
Rezultati linearne polarizacije konzistentni su s raspadom pasivnog filma i vizualno primijećene oksidacije nakon zavarivanja.

- Uzorak A s najmanje pobojanosti ima i najveći polarizacijski otpor, tj. otpor oksidaciji.
- Uzorak B ima manji polarizacijski otpor od uzorka A, više oksidira, ali sukladno prijašnjim rezultatima, manje oksidira od uzoraka C i D napravljene s Inoxline H5 zaštitnim plinom.
- Uzorak C ima manji polarizacijski otpor, tj. veću oksidaciju od uzoraka A i B, dok ima iste vrijednosti puno veće od uzorka D.
- Uzorak D ima najveću oksidaciju i više od dva puta manji polarizacijski otpor. Time se ponovno potvrđuje destruktivan utjecaj kisika u kombinaciji s Inoxline H5 zaštitom

5.7.3. Tafel metoda

Treći test proveden na svim uzorcima je Tafel test. Tafel metoda, tj. ispitivanje potenciodinamičke polarizacije, nakon primjene daje rezultate I_{corr} (struja korozije) i E_{corr} (korozijski napon) kojim se primjenom Tafel formule može izračunati brzina korozije.





Tablica 11. Rezultati Tafel analize



- Uzorak A nakon Tafel analize ima veću brzinu korozije od uzorka B. Brzine korozije su im jako blizu u vrijednostima što govori kako oksidi na površini B uzorka nisu puno ubrzali koroziju s obzirom na bez oksida. Oksidi na površini metala koji se nalazi u elektrolitu otopine NaCl nemaju za rezultat pretjerano ubranu koroziju s obzirom na uzorke s ispod 100ppm kisika i uzorak s do 5% kisika.
- Uzorak C i D imaju puno bržu brzinu korozije od uzoraka A i B. Time zaključujemo kako je korištenje zaštitnog plina s udjelom vodika (Inoxline H5) štetno za korozijska svojstva zavara koji se nalazi u elektrolitu NaCl otopine. Preporučuje se korištenje Argona 5.0, koji pokazuje dobru korozijsku zaštitu, čak i s njezinom lošijom primjenom, tj. većim udjelom kisika u atmosferi prilikom zavarivanja.

5.7.4. Vizualna kontrola nakon korozijskog ispitivanja

Tablica 12. Rezultati nakon elektrokemijske korozije

	Argon 5.0	Inoxline H5
<100ppm O ₂	<p>A</p> 	<p>C</p> 
<5% O ₂	<p>B</p> 	<p>D</p> 

- Pri vizualnom pregledu dolazi do nekonzistentnosti rezultata s rezultatima ispitivanja na koroziju. Uzorci A i B naizgled su više korodirali od uzoraka C i D, dok su pri ispitivanjima na koroziju uzorci A i B imali sporiju brzinu korozije, stabilniji pasivni film i veći otpor polarizaciji. Razlozi tomu mogu biti brojni kao što su mikrostruktura čelika, parametri zavarivanja, itd. Stoga se za precizne rezultate preporučuje daljnja ispitivanja na koroziju ovih uzoraka.
- Iako je došlo do nekonzistentnosti rezultata između uzoraka napravljenih s Inoxline H5 (uzorci C i D) i Argonom 5.0 (uzorci A i B), rezultati su konzistentni uzimajući u obzir udio kisika. Tako u uzorku B puno su veći učinci korozije, nego kod uzorka A, koji je napravljen s istim zaštitnim plinom, ali s manjim udjelom kisika. Isto tako uzorak C pokazuje puno manje znakove korozije od uzorka D, koji je također napravljen Inoxline H5 plinom. Time se može zaključiti očiti porast brzine korozije na uzorcima koji imaju veći udio kisika između uzoraka napravljenih s istim zaštitnim plinom.
- Uzorak B najbolji je primjer štetnosti povećanja udjela kisika. Na lijevom rubu (5% kisika) područje oko zavara je primjetno tamnije i oštećenije korozijom. Udaljavanjem od lijevog ruba na desno primjetan je pad intenziteta djelovanja korozije. Isti efekt je primjetan na uzorku D, ali u puno slabijem omjeru.

Na navarima uzoraka B i D (sa većim udjelom kisika) mogu se primijetiti početne formacije točkastih oksida. Oksidi u tim oblicima potencijalna su lokalizirana područja na kojima može doći do pojave rupičaste korozije. Preporučuje se daljnje ispitivanje na rupičastu koroziju kako bi se istražilo jesu li u ovom slučaju oksidi uzrokovali spomenuti tip korozije. Na slici ispod mogu se vidjeti formacije oksida koje se mogu vidjeti bez mikroskopa. U praksi okside sa slike potrebno je izbjegavati.



Slika 20. Točkaste formacije oksida

6. ZAKLJUČAK

TIG zavarivanje je odlična metoda za zavarivanje austenitnih čelika zbog kontroliranog unosa topline koji ima velik utjecaj na oksidaciju površine. Tokom TIG zavarivanja treba imati na umu zaštitne plinove, a posebno korijenske zaštite. U usporedbi argona i mješavine argona s 5% vodika, mješavina daje bolje rezultate u izgledu zavara, brzini zavarivanja i produktivnosti. Međutim, čisti argon postaje bolji izbor u uvjetima kada kisik nije moguće minimizirati iz zaštitne atmosfere zavara. Mješavina s vodikom i argonom u tom slučaju ima puno veću sklonost prema elektrokemijskoj koroziji. Oksidaciju je teško izbjeći i samim time i korozijske mehanizme koje su inicirane reakcijom oksidacije. Argon kao inertan plin onemogućuje toliko intenzivne reakcije u dodiru s kisikom i prema tome se preporučuje.

Ispitivanja na koroziju potvrdila su utjecaj kisika i razlučila prednosti i manje korištenja dva plina (Argon 5.0 i Inoxline H5) kao korijensku zaštitu. Međutim, vizualnom kontrolom nakon izlaganja korozivnom mediju 4% NaCl otopini primjetna su veća korozivna oštećenja na uzorcima s čistim argonom. Uzorke je potrebno poslati na daljnju analizu kako bi se utvrdio uzrok.

Iz priloženog se može zaključiti kako je prilikom zavarivanja potrebna detaljna priprema kako bi se osigurala tražena svojstva materijala. Rezultati su pokazali koliko je zavarivanje osjetljiv proces, a posebnu pažnju treba pridati svim elementima koji se u procesu koriste, u mikrostrukturi čelika ili u zaštitnim plinovima i atmosferi. Jako malo odstupanje može uzrokovati složene korozijske procese.

LITERATURA

- [1] Olsson, C.O.A., Landolt, D. , Passive films on stainless steels - Chemistry, structure and growth,. *Electrochimica Acta*, travanj 2003., 1093-1104
- [2] Gooch T.G., , Corrosion Behaviour of Welded Stainless Steel, dodatak za the *Welding Journal*, svibanj 1996., 135-154
- [3] Rede V., Nehrđajući čelici, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2017. godine u Zagrebu
- [4] Juraga I., Alar V., Stojanović I., Korozija i zaštita premazima, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2014. godine u Zagrebu
- [5] Juraga I., Visokolegirani čelici i njihova zavarljivost, 3.dio, Zavarivanje, Časopis za zavarivanje i srodne tehnologije, Zagreb, rujan-prosinac, 2018., 157-161
- [6] Juraga I., Visokolegirani čelici i njihova zavarljivost, 1.dio, Zavarivanje, Časopis za zavarivanje i srodne tehnologije, Zagreb, siječanj-travanj, 2018., 20-26
- [7] Lipold J. C., Kotecki D., J., *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*, John Wiley & Sons, 2005. u Sjedinjenim američkim državama i Kanadi
- [8] Juraga I., Ljubić K., Živčić M., Garašić I., Pogreške u zavarenim spojevima, četvrto izdanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2015. u Zagrebu
- [9] A. F. Rowcliff, R. B. Nicholson, Quenching defects and precipitation in a phosphorus containing austenitic stainless steels, *Acta Metallurgica*, vol.20, 1972, 143-155
- [10] I. Garašić – Kolegij Zavarivanje, FSB, nastavni materijali
- [11] I. Juraga, Šimunović V., Šipaniček Đ., Contribution To The Study Of Effects Of Surface State Of Welded Joints In Stainless Steel Upon Resistance Towards Pitting Corrosion, *Metalurgija*, srpanj 2007., 185-189
- [12] Horvat M., Kondić V., Brezovečki D. Teorijske i praktične osnove tig postupka zavarivanja, *Technical journal* 8, 2014., 426-432
- [13] A.A. Sagüés, H. Schroeder W. Kesternich And H. Ullmaier The Influence Of Helium On The High Temperat~E ~Ec~~Cal Properties Of An Austenitic Stainless Steel, *Journal of Nuclear Materials* 78, 1978., 289-298
- [14] Panmongkol P., Phung-on I., Effect of backing gas mixtures on corrosion properties of stainless steel grade 304 weld metal by autogenous GTAW, *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 11, 2021, 968-976
- [15] P. Rozenak, Eliezer D., Phase Changes Related To Hydrogen-Induced Cracking In Austenitic Stainless Steel, *Acta metal/*. Vol. 35, No. 9, pp. 2329-2340, 1987

- [16] HRN EN 1011-1:2009, Zavarivanje - Preporuke za zavarivanje metalnih materijala - 1. dio: opće smjernice za elektrolučno zavarivanje
- [17] Kah, Paul & Martikainen, J., Influence of shielding gases in the welding of metals. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 64. 10.1007/s00170-012-4111-6., 2012.
- [18] Kojundžić D., Krnić N., Samardžić I., Konjatić P., Influence of Purging Gas on 316L Stainless Steel Fusion Zone in Autogenous Stationary TIG Welding, Tehnički vjesnik 29, lipanj 2022., 1080-1088
- [19] <https://www.messer.hr/formir-plinovi> , pristupljeno 5.9.2023.
- [20] Katavić T., Sigurnjak I., Duspara M., Pribor i oprema za zavarivanje cijevi, “Suvremeni proizvodni postupci, oprema i materijali za zavarene konstrukcije i proizvode“ Slavonski Brod 23-25.10.2013, 169-173
- [21] <https://www.forensicsdetectors.com/blogs/articles/how-are-oxygen-analyzers-used-in-welding>, pristupljeno 5.9.2023.
- [22] S. Kralj, Z. Kožuh, Š. Andrić, Priručnik, Zavarivanje i srodni postupci, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [23] Juraga I., Visokolegirani čelici i njihova zavarljivost, 2.dio, Zavarivanje, Časopis za zavarivanje i srodne tehnologije, Zagreb, svibanj-kolovoz, 2018., 79-85
- [24] <https://www.ameteks.com/products/software/versastudio-software>, pristupljeno 5.9.2023.