

# TIG zavarivanje nehrđajućih čelika

---

**Gregorinčić, Sanja**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University North / Sveučilište Sjever**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:710919>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-06**



*Repository / Repozitorij:*

[University North Digital Repository](#)





**Sveučilište  
Sjever**

**Diplomski rad br. 118/STR/2024**

**TIG zavarivanje nehrđajućih čelika**

**Sanja Gregorinčić, 0336036567**

Varaždin, rujan 2024. godine





# Sveučilište Sjever

Odjel za strojarstvo

Diplomski rad br. 118/STR/2024

## TIG zavarivanje nehrđajućih čelika

### Student

Sanja Gregorinčić, 0336036567

### Mentor

doc. dr. sc. Matija Bušić, dipl. ing. stroj.

Varaždin, rujan 2024. godine

# Prijava diplomskog rada

## Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za strojarstvo

STUDIJ diplomski sveučilišni studij Strojarstvo

PRISTUPNIK Sanja Gregorinčić

MATIČNI BROJ 0336036567

DATUM 13.09.2024.

KOLEGIJ Suvremene proizvodne tehnologije

NASLOV RADA TIG zavarivanje nehrđajućih čelika

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU TIG welding of stainless steels

MENTOR dr.sc. Matija Bušić

ZVANJE docent

ČLANOVI POVJERENSTVA

1. izv. prof. dr. sc. Sanja Šolić, predsjednica povjerenstva
2. doc. dr. sc. Matija Bušić, mentor, član povjerenstva
3. doc. dr. sc. Boris Jalušić, član povjerenstva
4. doc. dr. sc. Tanja Tomić, zamjenska članica povjerenstva
- 5.

## Zadatak diplomskog rada

BROJ 118/STR/2024

OPIS

U uvodnom dijelu diplomskog rada na osnovi literaturnih podataka potrebno je dati pregled svojstava, podjele i primjene nehrđajućih čelika. Potrebno je proučiti i opisati specifičnosti pri zavarivanju nehrđajućih čelika različitim tehnologijama zavarivanja. Posebno detaljno proučiti ručno i automatizirano TIG zavarivanje. Pojasniti određivanje parametara zavarivanja i odabira zaštitnog plina. Objasniti korozijsku otpornost nehrđajućih čelika.

U eksperimentalnom dijelu rada na odgovarajućim uzorcima provesti TIG zavarivanje uz promjenu parametara postupka prema pripremljenom planu pokusa. Na zavarenim uzorcima potrebno je provesti vizualno ispitivanje zavarenih spojeva i odrediti prihvatljivost geometrije zavarenog spoja. Provesti ispitivanje otpornosti na koroziju pomoću uzoraka pripremljenih iz izvedenih zavarenih spojeva. Na temelju rezultata donijeti zaključke o utjecaju pojedinih parametara i otpornosti na koroziju. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

ZADATAK URUČEN

16.09.2024

POTPIS MENTORA

1. 2.



### IZJAVA O AUTORSTVU

Završni/diplomski/specijalistički rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, SANJA GREGORINČIČ (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog/specijalističkog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom TIG ZAVARIVANJE NEHRDANJIVIH ŽELIŽA (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:  
(upisati ime i prezime)

Sanja Gregorinčič  
(vlastoručni potpis)

Sukladno članku 58., 59. i 61. Zakona o visokom obrazovanju i znanstvenoj djelatnosti završne/diplomske/specijalističke radove sveučilišta su dužna objaviti u roku od 30 dana od dana obrane na nacionalnom repozitoriju odnosno repozitoriju visokog učilišta.

Sukladno članku 111. Zakona o autorskom pravu i srodnim pravima student se ne može protiviti da se njegov završni rad stvoren na bilo kojem studiju na visokom učilištu učini dostupnim javnosti na odgovarajućoj javnoj mrežnoj bazi sveučilišne knjižnice, knjižnice sastavnice sveučilišta, knjižnice veleučilišta ili visoke škole i/ili na javnoj mrežnoj bazi završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice, sukladno zakonu kojim se uređuje umjetnička djelatnost i visoko obrazovanje.

## **Zahvale**

*Zahvaljujem svojoj obitelji, posebno roditeljima, sestri i šogoru, koji su mi omogućili bezbrižno školovanje ispunjeno podrškom i ljubavi. Hvala vam na svakom savjetu i razumijevanju koji su me doveli do ovog uspjeha.*

*Veliko hvala mom dečku Filipu koji sa mnom prolazi kroz sve prepreke i pomaže mi u ostvarenju mojih želja i ciljeva. Riječima ne mogu izraziti moju zahvalnost za njegovu ljubav i podršku tijekom cijelog studija.*

*Također, hvala i svim prijateljima, kolegama i profesorima koji su mi pomogli tijekom mog školovanja.*

*Od srca zahvaljujem mentoru doc. dr. sc. Matiji Bušiću za svu podršku i mentorstvo tijekom izrade mog diplomskog rada. Vaše znanje, strpljenje i stručni savjeti bili su od neprocjenjive važnosti za moj uspjeh.*

## Sažetak

U ovom diplomskom radu su obrađeni izazovi koji nastaju tijekom zavarivanja nehrđajućih čelika. Dati je detaljni pregled o svojstvima, podjeli i primjeni nehrđajućih čelika. Također, opisane su tehnologije zavarivanja nehrđajućih čelika, kao i određivanje parametara zavarivanja i odabir zaštitnog plina. Objašnjena su ispitivanja otpornosti na koroziju koja se mogu provoditi na uzorcima zavarenih spojeva nehrđajućih čelika.

U eksperimentalnom dijelu rada na odgovarajućim uzorcima provedeno je TIG zavarivanje uz promjenu parametara postupka prema pripremljenom planu pokusa i uz varijaciju brzine zavarivanja. Na zavarenim uzorcima provedeno je vizualno ispitivanje zavarenih spojeva te ispitivanje mehaničkih svojstava na uzorcima.

Cilj eksperimentalnog dijela bio je odrediti utjecaj brzine zavarivanja na izgled i geometriju zavara, usporediti duljine lica zavara i korijena zavara između uzoraka te napraviti ispitivanje na koroziju. U eksperimentalnom dijelu rada pomoću automata za pravocrtno zavarivanje, provedeno je TIG zavarivanje četiri uzoraka. Kod zavarivanja mijenjana je brzina zavarivanja, dok su ostali parametri ostali isti. Nakon provedenog eksperimenta može se zaključiti da je bolja penetracija i kvaliteta zavara kod manje brzine zavarivanja. Razlog tome je što je povećanjem brzine zavarivanja, manji unos topline po jedinici dužine. Tako uzorak broj jedan, gdje je najveća brzina zavarivanja, nije potpuno protaljen. Što se tiče ispitivanja na koroziju, došlo je do matiranja površine uzorka, ali nije došlo do klasične boje korodiranog čelika jer su uzorci bili potpuno prekriveni klorovodičnom kiselinom bez pristupa kisiku.

Ključne riječi: nehrđajući čelik, tehnologije zavarivanja, parametri zavarivanja, zaštitni plinovi, korozija.



## Abstract

This paper deals with the challenges of TIG welding materials from stainless steels. A detailed overview of the properties, classification, and applications of stainless steels is provided. Additionally, the technologies for welding stainless steels are described, along with the determination of welding parameters and the selection of shielding gas. Examinations of corrosion resistance that can be conducted on samples of welded joints of stainless steels are also explained.

In the experimental part of the work, TIG welding was performed on appropriate samples, with variations in process parameters according to a prepared experimental plan and variations in welding speed. Visual inspections of the welded joints and mechanical property tests on the samples were conducted. The aim of the experimental part was to determine the effect of welding speed on the appearance and quality of the welds. Using a straight-line welding machine, TIG welding was performed on four samples. The welding speed was varied while keeping the other parameters constant.

After conducting the experiment, it can be concluded that better penetration and weld quality occur at lower welding speeds. This is because increasing the welding speed results in a lower heat input per unit length. Thus, sample number one, which had the highest welding speed, was not fully melted through. Regarding the corrosion tests, the surface of the sample became dull, but there was no typical coloration of corroded steel, as the samples were completely covered with hydrochloric acid.

**Keywords:** stainless steel, welding technologies, welding parameters, shielding gases, corrosion.

## Popis korištenih kratica

|              |  |
|--------------|--|
| <b>TIG</b>   | Tungsten Inert Gas<br>Elektrolučno zavarivanje u zaštiti inertnog plina. |
| <b>WIG</b>   | Wolfram Inert Gas  |
| <b>GTAW</b>  | Gas Tungsten Arc Welding   |
| <b>AC-DC</b> | Izmjenična struja - istosmjerna struja                                   |

| <b>Oznaka</b> | <b>Opis</b>      |
|---------------|------------------|
| He            | helij            |
| Ar            | argon            |
| Cu            | bakar            |
| H             | vodik            |
| N             | dušik            |
| C             | ugljik           |
| Fe            | željezo          |
| Mb            | molibden         |
| Ti            | titan            |
| Ni            | nikal            |
| Si            | silicij          |
| Al            | aluminij         |
| Ta            | tantal           |
| Cr            | krom             |
| Br            | brom             |
| F             | fluor            |
| Cl            | klor             |
| Nb            | niobij           |
| TiC           | titanijev karbid |
| NbC           | niobijev karbid  |
| TaC           | tantalov karbid  |



# Sadržaj

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 1.     | Uvod.....   | 2  |
| 2.     | TIG zavarivanje .....                                   | 3  |
| 2.1.   | Povijest.....   | 3  |
| 2.2.   | Općenito .....  | 4  |
| 2.3.   | Princip rada .....                                      | 4  |
| 2.4.   | Prednosti i nedostaci TIG zavarivanja .....             | 7  |
| 2.5.   | Vrste TIG zavarivanja .....                             | 8  |
| 2.5.1. | <i>Ručno TIG zavarivanje.....</i>                       | 8  |
| 2.5.2. | <i>Poluautomatizirano TIG zavarivanje .....</i>         | 9  |
| 2.5.3. | <i>Automatizirano TIG zavarivanje .....</i>             | 10 |
| 2.6.   | Parametri kod TIG zavarivanja .....                     | 11 |
| 2.6.1. | <i>Jakost struje zavarivanja.....</i>                   | 12 |
| 2.6.2. | <i>Napon zavarivanja .....</i>                          | 13 |
| 2.6.3. | <i>Brzina zavarivanja .....</i>                         | 13 |
| 2.6.4. | <i>Protok i vrsta zaštitnog plina .....</i>             | 13 |
| 3.     | Mješavina plinova.....                                  | 16 |
| 4.     | Nehrđajući čelik .....                                  | 19 |
| 4.1.   | Podjela nehrđajućih čelika.....                         | 20 |
| 4.1.1. | <i>Feritni nehrđajući čelici.....</i>                   | 21 |
| 4.1.2. | <i>Martenzitni nehrđajući čelici .....</i>              | 22 |
| 4.1.3. | <i>Austenitni nehrđajući čelici.....</i>                | 23 |
| 4.1.4. | <i>Dupleks nehrđajući čelici.....</i>                   | 24 |
| 4.1.5. | <i>Precipitacijski očvršnuti nehrđajući čelici.....</i> | 24 |
| 5.     | Korozija.....   | 25 |
| 5.1.   | Korozija kod nehrđajućih čelika .....                   | 25 |
| 5.1.1. | <i>Rupičasta (pitting) korozija.....</i>                | 26 |
| 5.1.2. | <i>Korozija u procjepu.....</i>                         | 27 |
| 5.1.3. | <i>Interkristalna korozija.....</i>                     | 29 |
| 5.1.4. | <i>Napetosna korozija.....</i>                          | 30 |
| 6.     | Eksperimentalni dio .....                               | 32 |
| 6.1.   | Opis eksperimenta .....                                 | 32 |
| 6.2.   | Osnovni materijal .....                                 | 32 |
| 6.3.   | Zaštitni plin, gorionik i netaljiva elektroda .....     | 33 |
| 6.4.   | Izvor struje.....                                       | 36 |
| 6.5.   | Automat za zavarivanje .....                            | 38 |
| 6.6.   | Priprema i proces zavarivanja .....                     | 39 |
| 6.7.   | Rezultati zavarivanja .....                             | 40 |
| 6.8.   | Izrada uzoraka za makroanalizu .....                    | 42 |
| 6.9.   | Makroanaliza.....                                       | 45 |
| 6.10.  | Ispitivanje na koroziju .....                           | 50 |
| 7.     | Zaključak.....  | 53 |
| 8.     | Literatura.....   | 54 |

## 1. Uvod

U današnje vrijeme, nehrđajući čelici primjenjuju se u svim grama industrije. Kako bi čelik bio otporan na koroziju, treba ispunjavati dva uvjeta. Prvi uvjet je da sadrži barem 12 % kroma i to u čvrstoj otopini. Drugi uvjet korozijske postojanosti čelika je homogena monofazna mikrostruktura. Naime, korozijski postojani čelici bi teorijski morali imati potpuno feritnu, austenitnu ili martenzitnu mikrostrukturu, bez oksida, karbida ili drugih intermetalnih faza. Dakle, korozijski postojani čelici moraju sadržavati što veći udio kroma i što manji udio ugljika [1].

TIG postupak zavarivanja je elektrolučni postupak zavarivanja netaljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina, argona ili helija, ili rjeđe smjese plinova. Skraćenica imena postupka dolazi od punog naziva „Tungsten Inert Gas“, a često se naziva i WIG (Wolfram Inert Gas) ili GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) [2].

U ovom diplomskom radu, obrađeno je TIG zavarivanje nehrđajućeg čelika. Razrađena je podjela i primjena nehrđajućih čelika, opisano ručno i automatizirano TIG zavarivanje, podjela i primjena zaštitnih plinova kod TIG zavarivanja te ispitana otpornost na koroziju koja se provela na uzorcima zavarenih spojeva nehrđajućih čelika.

Eksperimentalni dio rada sastoji se od zavarivanja pločica iz nehrđajućeg čelika u četiri slučaja koji se međusobno razlikuju po brzini zavarivanja. Također, eksperimentalni dio se sastoji od makroanalize čelika te ispitivanja otpornosti na koroziju i usporedbe dobivenih rezultata.

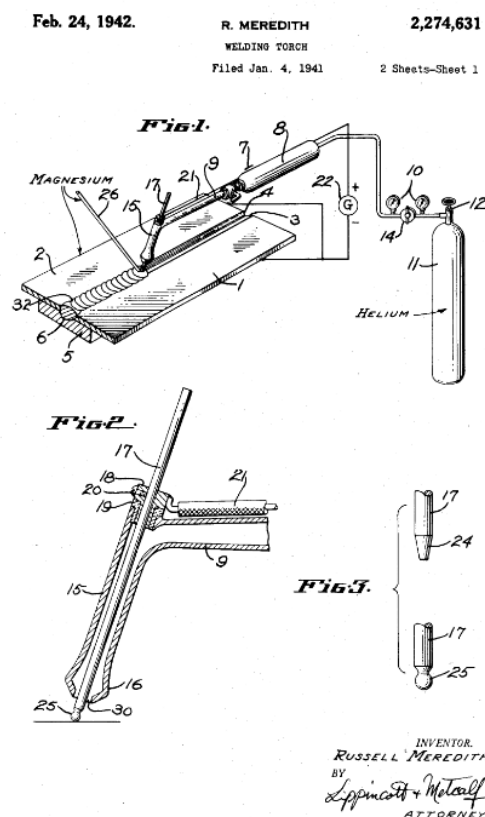
## 2. TIG zavarivanje

### 2.1. Povijest

TIG postupak zavarivanja je elektrolučni postupak zavarivanja netaljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina, argona ili helija, ili rjeđe smjesi plinova. Skraćenica imena postupka dolazi od punog naziva „Tungsten Inert Gas“, a često se naziva i WIG (Wolfram Inert Gas) ili GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) [2].

Razvoj TIG zavarivanja povezuje se sa Drugim svjetskim ratom, 1941. godina. Razlog zbog kojeg je došlo do istraživanja i razvoja TIG zavarivanja je problematika zavarivanja legura na bazi magnezija koje su se koristile u avionskoj industriji. Russell Meredith je patentirao postupak pod nazivom “Heli-Arc Welding“, te se on danas smatra pretečom današnjeg TIG zavarivanja. [3] Tvrtka Linde je otkupila taj patent zbog upotrebe inertnih plinova u postupku, te se time nastavio sam razvoj TIG zavarivanja, a njegova primjena se sve više širila. Komercijalna primjena TIG zavarivanja započela je oko 1950. godine [4].

Slika 2.1.1. prikazuje patent gorionika za Heli-Arc postupak Russella Mereditha iz 1942. godine.



Slika 2.1.1. Patent Russella Mereditha [5]

## 2.2. Općenito

TIG postupak zavarivanja se u početku koristio u zrakoplovnoj industriji, a kasnije se primjena širila prema kemijskoj i procesnoj industriji za zavarivanje bakra, bakrenih legura, aluminija te nehrđajućih čelika [4].

TIG postupak zavarivanja je najčešći ručni postupak zavarivanja, a sama kvaliteta zavara uveliko ovisi o vještinama zavarivača. Zbog tog razloga, sve se više uvodi poluautomatizacija ili potpuna automatizacija postupka. Kod ručnog postupka zavarivanja, zavarivač pomiče pištolj i s prednje strane taline dodaje dodatni materijal u pravilnim vremenskim intervalima. Kod poluautomatiziranog procesa, proces dodavanja dodatnog materijala se izvodi pomoću elektromotora. Automatizirani proces TIG zavarivanja koristi robotsku ruku koja je numerički programirana i na nju se postavlja pištolj poluautomata i upravlja pomoću CAD/CAM sučelja sa upravljačkog računala [6].



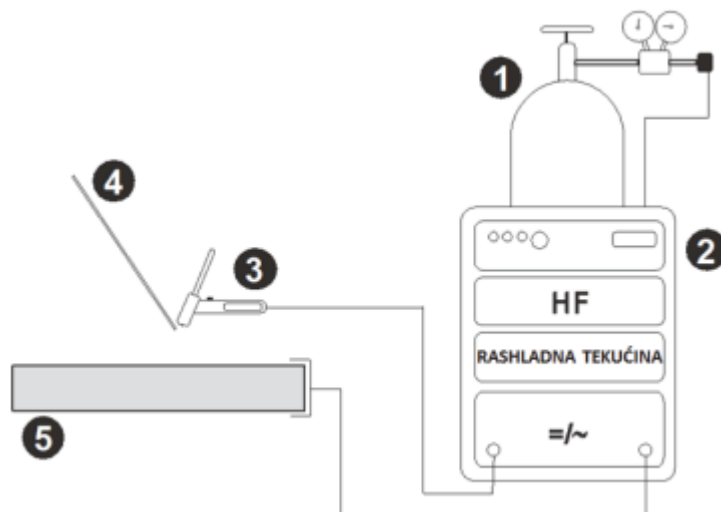
*Slika 2.2.1 Ručno TIG zavarivanje [7]*

## 2.3. Princip rada

Razlika između TIG zavarivanja i ostalih procesa zavarivanja je ta da se prijenos kapljice metala ne odvija kroz električni luk, nego se dodatni materijal dodaje u prednji rub taline gdje se tali pod električnim lukom i spaja sa talinom zavara [8].

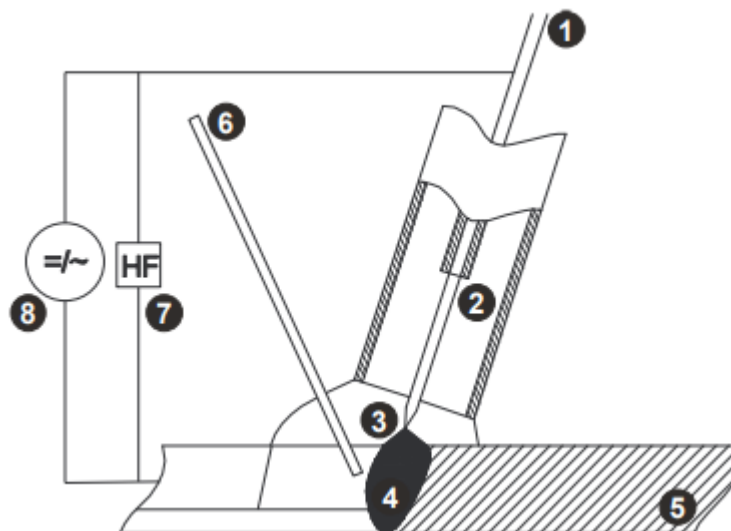
U procesu TIG zavarivanja, zona utjecaja topline sastoji se od osnovnog materijala i dodatnog materijala. Zona utjecaja topline se tijekom zavarivanja štite inertni plinovi kroz keramičku sapnicu. Kao zaštitni inertni plin koriste se helij (He), argon (Ar) ili mješavina tih plinova.

Slika 2.3.1 prikazuje shematski prikaz standardne opreme za TIG zavarivanje koja se sastoji od zaštitnog plina (broj 1), izvora struje za zavarivanje (broj 2), gorionika (broj 3), dodatnog materijala (broj 4) te osnovnog materijala (broj 5) [4].



Slika 2.3.1 Shematski prikaz standardne opreme za TIG zavarivanje [4]

Slika 2.3.2. prikazuje shematski prikaz procesa TIG zavarivanja koji se sastoji od netaljive elektrode (broj 1), sapnice gorionika (broj 2), električnog luka (broj 3), rastaljenog materijala (broj 4), osnovnog materijala (broj 5), dodatnog materijala (broj 6), visokofrekventnog generatora (broj 7) te izvora struje (broj 8) [4].



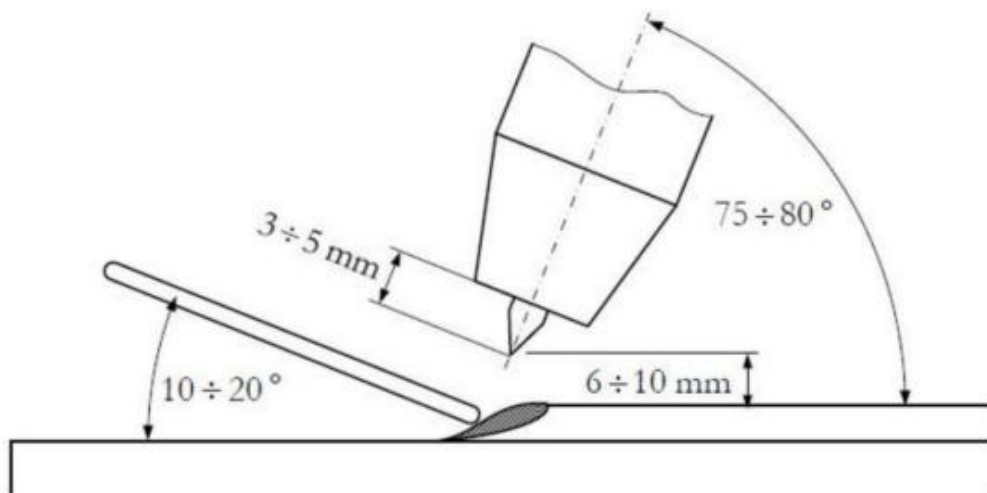
Slika 2.3.2 Shematski prikaz procesa TIG zavarivanja [4]

Sam proces ručnog TIG zavarivanja započinje pritiskom prekidača na pištolju za zavarivanje ili nožnog prekidača. U tom trenutku započinje cirkulacija rashladnog sredstva, a zaštitni plin počinje istjecati kroz sapnicu. Pištolj se mora dovesti blizu mjesta zavarivanja na točno određenoj udaljenosti (2 - 5 mm). U tom trenutku, upravljačka elektronika šalje visokofrekventnu struju koja lako ionizira takvu atmosferu u inertnom plinu, omogućavajući uspostavu električnog luka.



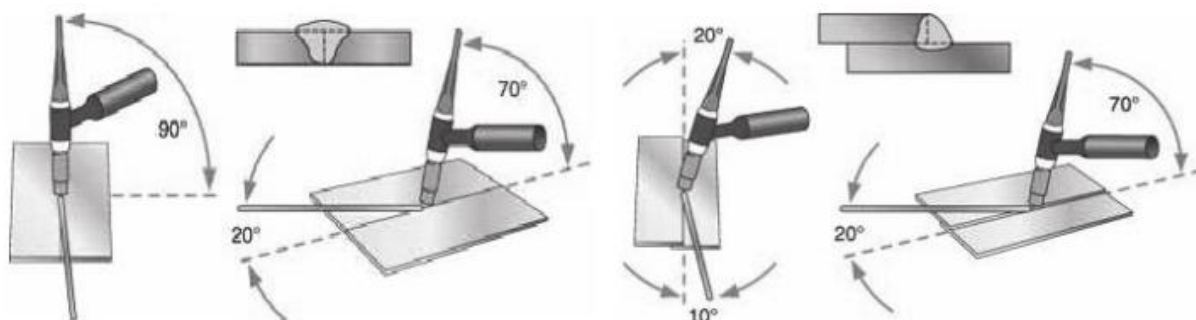
U točno definiranim vremenskim intervalima, zavarivač dodaje dodatni materijal koji se tali na prednjem rubu taline osnovnog materijala i spaja se s osnovnim materijalom i formira metal zavara. U nekim slučajevima nije potrebno dodavati dodatni materijal, jer se osnovni materijal tali i tvori metal zavara. Tijekom procesa, zavarivač pomiče pištolj i dodaje dodatni materijal određenom brzinom ovisno o kvaliteti pripreme spoja i uz određenu tehniku rada. Nakon puštanja prekidača pištolja, električni luk se prekida, dok zaštitni plin još nastavlja istjecati određeno vrijeme kako bi zaštitio talinu od naglog hlađenja i vrh elektrode, zbog čega pištolj mora ostati iznad radnog komada. Postupno gašenje električnog luka najpovoljnije je kako bi se spriječilo stvaranje udubljenja praćenih malim pukotinama u završnom krateru. Ako postupno gašenje nije moguće, električni luk može se prekinuti smanjenjem struje zavarivanja i nježnim pomicanjem pištolja unatrag do već skrućenog i vrućeg dijela zavara gdje se električni luk prekida [8,9],

Na slici 2.3.3 prikazan je pravilan položaj elektrode i dodatnog materijala. Prikazana je lijeva tehnika zavarivanja koja se izvodi na način da dodatni materijal prethodi luku i pištolju u smjeru zavarivanja, a kod desne tehnike prvo se prolazi pištoljem koji za sobom „vuče“ luk, prati ga talina i dodatni materijal. Kako bi zavarivanje bilo optimalnije, kut pištolja treba biti od  $70^\circ$  do  $80^\circ$ , dok kut dodavanja dodatnog materijala mora bi od  $10^\circ$  do  $20^\circ$ . Razmak između radnog komada i vrha elektrode je od 6 mm do 10 mm, dok je vrh volframove elektrode iznad keramičke sapnice istaknut od 3 mm do 5 mm [8].

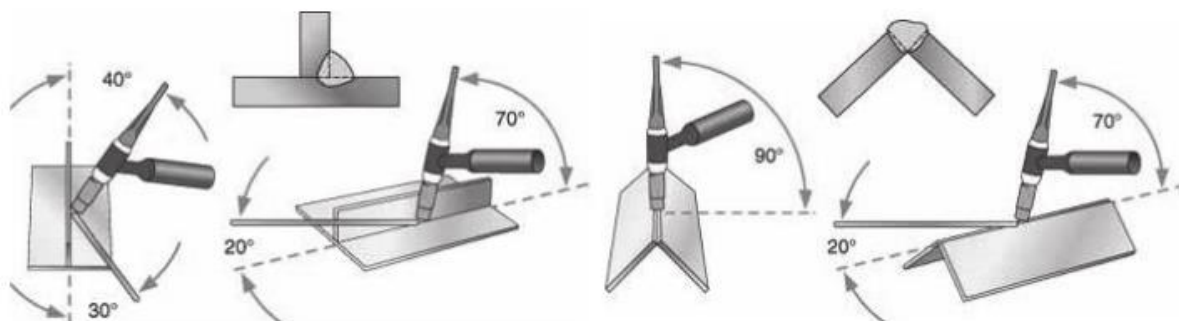


Slika 2.3.3 Položaj elektrode i dodatnog materijala u odnosu na radni komad [8]

Na slikama 2.3.4 te 2.3.5 prikazani su postupci izvođenja različitih spojeva.



Slika 2.3.4 Izvođenje sučeonog i preklopnog spoja [3]



Slika 2.3.5 Izvođenje kutnog i rubnog spoja [3]

## 2.4. Prednosti i nedostaci TIG zavarivanja

Prednosti TIG zavarivanja [2,8,9]:

- koncentrirani električni luk - manja zona utjecaja topline,
- nema troske i prskanja,
- minimalna količina štetnih plinova,
- zavarivanje raznorodnih materijala,
- zavarivanje pozicija male debljine,
- zavarivanje širokog spektra metala i njihovih legura,
- zavarivanje u svim položajima rada,
- moguće izvođenje reparaturnih radova,
- odličan izgled zavarenog spoja,
- pravilno izveden spoj spada u najkvalitetnije zavarene spojeve izvedene elektrolučnim postupkom.

Nedostaci TIG zavarivanja [2,8,9]:

- mala brzina zavarivanja,
- mali depozit dodatnog materijala,
- viša cijena opreme za zavarivanje i zaštitnih plinova,
- zahtjevnost izvođenja TIG zavarivanja- duža izobrazba zavarivača,
- neekonomičnost kod zavarivanja debljih pozicija (> 6 mm),
- zahtjeva se precizna priprema zavarenog spoja,
- pojačana svijetlost i UV zračenje,
- otežan rad na otvorenom,
- potreba za prisilnom ventilacijom zraka kod zavarivanja u skućenim prostorima.

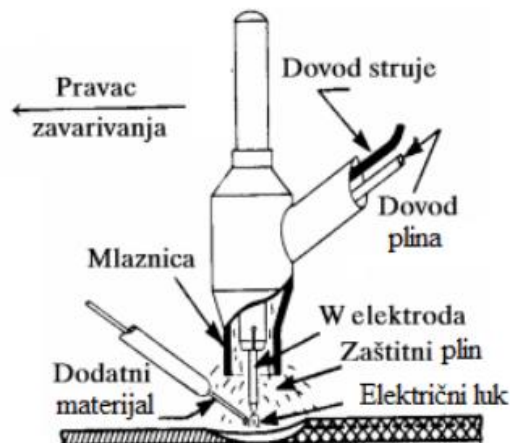
## **2.5. Vrste TIG zavarivanja**

Kako bi se smanjili troškovi zavarivanja te povećala produktivnost i visoke razine kvalitete zavarivanja, uvedene su nove vrste TIG zavarivanja. Pa tako, prema stupnju automatizacije postoje poluatomatizirana i automatizirana TIG zavarivanja. Faktor koji utječe na to koja će se vrsta TIG zavarivanja koristiti jest vrsta proizvodnje, tj. da li je proizvodnja maloserijska ili velikoserijska.

### **2.5.1. Ručno TIG zavarivanje**

Kod ručnog TIG zavarivanja, električna struja dolazi iz izvora struje koji je priključen na električnu mrežu. Električna struja dolazi iz dva kabla, jednim kabelom u pištolj za zavarivanje, a drugim na radni komad. Pritiskom prekidača na pištolju za zavarivanje, počinje istjecanje zaštitnog plina i sredstva za hlađenje. Zaštitni plin se do mjesta zavarivanja dovodi preko gumenog crijeva, a do radnog komada preko sapnice u pištolju. Zavarivač u jednoj ruci drži pištolj za zavarivanje, dok drugom rukom dodaje dodatni materijal u prednju rub taline osnovnog materijala. Dodatni se materijal, zajedno sa osnovnim materijal skrućuje te tvori zavareni spoj. Električni luk se uspostavlja između radnog komada i pištolja, prilikom približavanja pištolja radnom komadu u razmaku od 2 mm do 5 mm. Nedostatak ručnog TIG zavarivanja je sama kvaliteta zavara koja ovisi o vještinama zavarivača [10,11].

Slika 2.5.1.1 prikazuje shematski prikaz ručnog TIG zavarivanja.



Slika 2.5.1.1 Shematski prikaz ručnog TIG zavarivanja [11]

## 2.5.2. Poluautomatizirano TIG zavarivanje

Poluautomatizirano TIG zavarivanje radi na isti princip kao i ručno TIG zavarivanje, a razlika između ta dva zavarivanja je ta da se pritiskom prekidača na pištolju za zavarivanje uključuje i elektromotorni sustav za dovod dodatnog materijala. Sustav za dovod dodatnog materijala se nalazi u komandnom ormariću, a brzina dovoda dodatnog materijala se može regulirati. Glavna razlika između pištolja za zavarivanje kod poluautomatiziranog i ručnog TIG zavarivanja je u tome da kod poluautomatiziranog zavarivanja pištolj ima dodatni uređaj s prednje strane pištolja. Taj uređaj služi za dodavanje dodatnog materijala te je uz njega potrebna i dodatna oprema, kao što je crijevo za dovod žice i kolut sa žicom s mehanizmom dodavanja žice [11].

Primjer pištolja za poluautomatizirano TIG zavarivanje je na slici 2.5.2.1.



Slika 2.5.2.1. Pištolj za poluautomatizirano TIG zavarivanje [12]

### 2.5.3. Automatizirano TIG zavarivanje

Automatizacija TIG zavarivanja moguća je sa ili bez upotrebe robota za zavarivanje. Kod automatiziranog TIG zavarivanja, zavar je moguće postići bez ljudskog utjecaja, što omogućava bolju produktivnost i ujednačenu kvalitetu zavara. Automatizirano zavarivanje ima niz prednosti u odnosu na konvencionalno zavarivanje, ali postoje i ograničenja koje je potrebno uzeti u obzir tijekom projektiranja tehnologije zavarivanja [13].

Prednosti automatiziranog TIG zavarivanja [14]:

- ujednačena kvaliteta zavara,
- veća brzina zavarivanja,
- veća iskoristivost dodatnog materijala,
- veća produktivnost,
- bolja kontrola unosa topline,
- manje dodatne obrade nakon zavarivanja.

Nedostaci automatiziranog TIG zavarivanja [14]:

- skupa oprema,
- veliki zahtjevi za održavanje opreme,
- potrebni zavarivač za nedostupna mjesta,
- otežan rad na otvorenom.

## 2.6. Parametri kod TIG zavarivanja

Parametri kod TIG zavarivanja uveliko utječu na kvalitetu zavara nakon zavarivanja, te je iz tog razloga potrebno obratiti veliku pozornost na njihov odabir. Utjecajni faktori na kvalitetu zavara koji se mogu regulirati su [16]:

- jakost struje zavarivanja,
- napon zavarivanja,
- polaritet elektrode,
- vrsta i promjer volframove elektrode,
- brzina zavarivanja,
- protok i vrsta zaštitnog plina,
- položaj pištolja i dodatnog materijala,
- tehnika rada - dodavanje žice i gibanje pištolja.

Tablica 2.6.1 prikazuje orijentacijske podatke za TIG zavarivanje nehrđajućih čelika.

*Tablica 2.6.1. Orijetacijski podaci za TIG zavarivanje nehrđajućih čelika [16]*

| Debljina lima , mm | Oblik spoja    | Promjer elektrode , mm | Promjer žice, mm | Jakost struje, A | Protok argona , l/mm |
|--------------------|----------------|------------------------|------------------|------------------|----------------------|
| 1,5                | I-spoj         | 1,6                    | 1,6              | 40-60            | 7                    |
|                    | Preklopni spoj |                        |                  | 50-70            |                      |
|                    | Kutni spoj     |                        |                  | 50-70            |                      |
| 3,0                | I-spoj         | 2,4                    | 2,5              | 65-85            | 7                    |
|                    | Preklopni spoj |                        |                  | 90-110           |                      |
|                    | Kutni spoj     |                        |                  | 90-110           |                      |
| 5,0                | I-spoj         | 3,2                    | 3,0              | 100-125          | 10                   |
|                    | Preklopni spoj |                        |                  | 125-150          |                      |
|                    | Kutni spoj     |                        |                  | 125-150          |                      |
| 6,0                | I-spoj         | 3,2                    | 3,0              | 135-160          | 10                   |
|                    | Preklopni spoj |                        |                  | 160-180          |                      |
|                    | Kutni spoj     |                        |                  | 160-180          |                      |

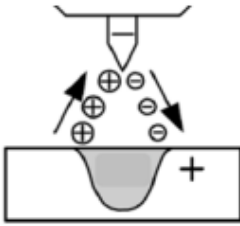
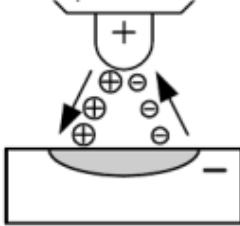
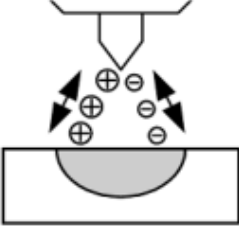
## 2.6.1. Jakost struje zavarivanja

Jakost struje zavarivanja ovisi o vrsti i debljini materijala koji se zavaruje. Također, jakost struje zavarivanja ovisi o obliku i dimenziji spoja, te položaju zavarenog spoja. Kod ručnog TIG zavarivanja nehrđajućih čelika za sučeljeni spoj u vodoravnom položaju, jakost struje zavarivanja za svaki milimetar debljine materijala iznosi približno 30 A. Prilikom zavarivanja u prisilnom položaju, jakost struje je manja 25 %. Automatizirano TIG zavarivanja ima veću jakost struje zavarivanja nego ručno TIG zavarivanje, i to za onoliko koliko se može povećati brzina zavarivanja [8].

O primijenjenoj vrsti struje zavarivanja ovisi raspodjela topline u električnom luku, tj. raspodjela topline između netaljive elektrode i radnog komada. Slijedom toga, moguća su tri slučaja [2]:

1. istosmjerna struja- elektroda na “-“ polu (DCEN)
2. istosmjerna struja- elektroda na “+“ polu (DCEP)
3. izmjenična struja (AC)

Slika 2.6.1.1 prikazuje tri slučaja upotrebe pojedine vrste struje kod zavarivanja. Također na slici su prikazani podaci o raspodjeli toplina, obliku penetracije te kapacitetu elektrode.

| Vrsta struje        | DC  | DC   | AC  |
|---------------------|---|--|---|
| Polaritet           | -   | +  |   |
|                     |  |  |  |
| Čišćenje oksida     | NE  | DA   | DA<br>(pola ciklusa)  |
| Raspodjela topline  | 1/3 na elektrodi<br>2/3 na materijalu   | 2/3 na elektrodi<br>1/3 na materijalu  | 1/2 na elektrodi<br>1/2 na materijalu   |
| Penetracija         | uska, duboka  | plitka, široka   | srednje široka<br>srednje duboka  |
| Kapacitet elektrode | odličan<br>npr: Ø3,2/400A   | loš<br>npr: Ø6,4/120A  | dobar<br>npr: Ø3,2/255A   |

Slika 2.6.1.1 Tri slučaja primjene određene vrste struje kod zavarivanja [2]

## 2.6.2. Napon zavarivanja

Napon zavarivanja proporcionalan je visini električnog luka, a visina električnog luka približno je jednaka iznosu promjera elektrode. Kod TIG zavarivanja, napon zavarivanja iznosi od 15 V do 35 V [8].

## 2.6.3. Brzina zavarivanja

Brzina zavarivanja iznosi od 100 do 250 mm/min, za ručno TIG zavarivanje. Najpovoljnija brzina zavarivanja je kada je dužina taline dva-tri puta veća od promjera elektrode. Kod zavarivanja u prisilnom položaju, brzina zavarivanja je znatno manja jer bi u suprotnom došlo do curenja taline zbog djelovanja gravitacijske sile. Brzina zavarivanja utječe na penetraciju te na izgled zavara [8].

## 2.6.4. Protok i vrsta zaštitnog plina

Najčešći zaštitni plinovi koji se koriste kod TIG zavarivanja su plemeniti plinovi argona (Ar) i helija (He). Iako se u izvornom obliku TIG zavarivanja se koristio helij, danas je argon taj koji dominira u primjeni [2].

Helij i argon su inertni plinovi te daju zaštitnu atmosferu u kojoj ne dolazi do kemijskih reakcija između osnovnog materijala i zaštitnog plina. Primarna zadaća zaštitnih plinova je da zaštite talinu od utjecaja atmosfere. Osim toga, zaštitni plinovi utječu na stabilnost električnog luka, geometrijske karakteristike zavarenog spoja, konačni izgled zavarenog spoja te na količinu para koje se oslobađaju tijekom procesa zavarivanja [3].

Na slici 2.6.4.1 prikazan je utjecaj sastava zaštitnih plinova na penetraciju i geometriju zavarenog spoja uz konstantne ostale parametre zavarivanja (struja, vrsta i promjer elektrode i sl.).



Slika 2.6.4.1 Utjecaj vrste plina na penetraciju i oblik zavara [17]



### 2.6.4.1. Argon

Argon je najjeftiniji inertni plin koji se koristi kod TIG zavarivanja. Njegova prednost je niski ionizacijski potencijal, tj. energija potrebna za uzimanje jednog elektrona atoma plina da ga pretvori u ion. Ionizacijski potencijal za argon iznosi 15,7 eV te on olakšava uspostavu i stabilnost električnog luka. Također, prednost argona je da je teži od zraka, i to 1,4 puta, te izlaskom iz sapnice potiskuje zrak i dobro štiti talinu. Kod usporedbe argona i helija, argon ima nižu toplinsku vodljivost što rezultira kompaktnijim električnim lukom te se dobiva manja penetracija i protaljivanje. Minimalna potrebna čistoća argona iznosi 99,95 % te se ona koristi za zavarivanje većine metala. Kod zavarivanja vatrootpornih i reaktivnih metala (titan, molibden, tantal), minimalna čistoća argona je 99,9977 % [3].

U tablici 2.6.4.1 prikazani su preporučeni parametri zavarivanja za pojedine metale, uz korištenje argona kao zaštitnog plina.

Tablica 2.6.4.1.1. Preporučeni parametri zavarivanja argonom [2]

| Metal            | Debljina   | Struja        | Netaljiva elektroda                | Zaštitni plin |
|------------------|------------|---------------|------------------------------------|---------------|
| Al               | Sve        | AC            | zelena<br>siva<br>crvena<br>zlatna | Ar            |
|                  | Sve        | AC Squarewave | siva<br>crvena<br>zlatna           | Ar            |
|                  | Iznad 5 mm | AC            | siva<br>crvena<br>zlatna           | Ar            |
| Cu i legure      | Sve        | DCEN          | siva<br>crvena<br>zlatna           | Ar            |
| Mg i legure      | Sve        | AC            | siva<br>crvena<br>zlatna           | Ar            |
| Čelik            | Sve        | DCEN          | siva<br>crvena<br>zlatna           | Ar            |
| Nehrđajući čelik | Sve        | DCEN          | siva<br>crvena<br>zlatna           | Ar            |

#### **2.6.4.2. Helij**

Helij je plin male mase, 10 puta manja od argona, zbog čega protok helija mora biti i do tri puta veća u odnosu na protok argona. Također, helij ima viši ionizacijski potencijal, 24,5 eV, što otežava uspostavu električnog luka. Prednost helija je dobra toplinska vodljivost te daje širi električni luk. Toplina se brže prenosi na radni komad, daje veću penetraciju i unos topline, što omogućava zavarivanje pozicija većih debljina te materijala s dobrom toplinskom vodljivošću kao što je bakar. Kod helija je vidljivo povećanje napona električnog luka pri nižim strujama, između 50 A i 100 A, što je nepovoljno kod zavarivanja tanjih materijala. Minimalna potrebna čistoća helija iznosi 99,99 % [3].

### 3. Mješavina plinova

Mješavine plinova se kod zavarivanja često koriste u različitim omjerima, kako bi se kombinirala njihova povoljna svojstva.

Neke od mješavina zaštitnih plinova koje se koriste kod TIG zavarivanja [18]:

- Alumix He sastoji se od 70 % Ar i 30 % He. Pogodan je za sve tipove TIG zavarivanja te se koristi za zavarivanje aluminija, bakra, nikla i njihovih legura
- 75 % He i 25 % Ar- koristi se za deblje pozicije aluminija, bakra i njihovih legura
- Ar i 1 % - 3 % vodika- koristi se za zavarivanje austenitnih nehrđajućih čelika, nikla i niklovih legura
- Ar i 5 % vodika- koristi se za zavarivanje austenitnih nehrđajućih čelika. Pogodan za sve tipove TIG zavarivanja.
- Formir plin- mješavina N<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>, koristi se za zaštitu korijena kod visoko i nisko legiranih čelika

U tablici 3.1. prikazan je pregled karakteristika zavarivanja kod upotrebe različitih zaštitnih plinova.

Tablica 3.1. Usporedba Ar, He i mješavine plinova [3]

| Karakteristike     | Ar             | Mješavina Ar//He          | He                     |
|--------------------|----------------|---------------------------|------------------------|
| Brzina zavarivanja | Smanjena       | Veća nego kod 100 % Ar    | Veća                   |
| Penetracija        | Smanjena       | Veća nego kod 100 % Ar    | Povećana               |
| Čišćenje oksida    | Dobro          | Sličnije kao kod 100 % Ar | Loše                   |
| Uspostava luka     | Laka           | Bolja nego kod 100 % He   | Otežana                |
| Stabilnost luka    | Dobro          | Bolja nego kod 100 % He   | Niža kod manjih struja |
| Oblik luka         | Uži, fokusiran | Uži nego kod 100 % He     | Širi                   |
| Napon luka         | Manji          | Srednja                   | Veći                   |
| Protok             | Manji          | Veća nego kod 100 % Ar    | Povećan                |
| Cijena             | Niža           | Veća nego 100 % Ar        | Veća nego 100 % Ar     |

Zaštitni plinovi koji se koriste kod TIG zavarivanja prikazani su u tablici 3.2. Standardni zaštitni plinovi koji se koriste kod TIG zavarivanja nehrđajućih čelika zaokruženi su plavom bojom.

Tablica 3.2. Standardni zaštitni plinovi i njihova primjena kod TIG zavarivanja [19]

| Proizvod   | Komponente mješavina<br>s Ar  | Grupa po<br>HRN ISO 14175 | Primjena   |
|--|---|---------------------------|--|
| Argon  |   | I1                        | Visoko legirani i nelegirani čelici, aluminijski materijali, ostali neželjezni metali        |
| Inoxmix H  | 2 % H <sub>2</sub><br>5 % H <sub>2</sub><br>7,5 % H <sub>2</sub>                                      | R1<br>R1<br>R1            | Austenitni CrNi-čelici<br>(5 % i 7,5 % H <sub>2</sub> potpuno mehanizirani)                  |
| Inoxmix N  | 1,25 % N <sub>2</sub><br>2,5 % N <sub>2</sub><br>15 % He, 1,25 % N <sub>2</sub>                       | S11<br>S11<br>S13         | Duplex, super-duplex, potpuno austenitni CrNi-čelici   |
| Helij 4.6  |   | I2                        | Aluminij (minus pol-zavarivajne), čelici (orbitalno zavarivanje)                             |
| Alumix He  | 30 % He<br>50 % He<br>70 % He<br>90 % He  | I3<br>I3<br>I3<br>I3      | Aluminij, bakar, nikal, čelici (orbitalno zavarivanje), TIG-zavarivanje istosmjernom strujom |
| Alumix N   | 0,015 % N <sub>2</sub>  | S11                       | Aluminijski materijali i legure  |
| Alumix He N  | 15 % He, 0,015 % N <sub>2</sub><br>30 % He, 0,015 % N <sub>2</sub><br>50 % He, 0,015 % N <sub>2</sub> | S13<br>S13<br>S13         | Aluminijski materijal i legure   |
| Argon 4.8  |   | I1                        | Materijal osjetljiv na plinove kao što su titan, niob, molibden, tantal; zaštita korijena    |
| Formir plin<br>(N <sub>2</sub> H <sub>2</sub> mješavina) | 5 % H <sub>2</sub><br>10 % H <sub>2</sub><br>15 % H <sub>2</sub>                                      | F2                        | Zaštita korijena kod visoko i nisko legiranih čelika   |

Za proces zavarivanja jako je potrebno obratiti pozornost na protok zaštitnog plina. Kod prevelikog protoka zaštitnog plina stvaraju se nemirna strujanja koja vrtlože izlazni plin te to stvara ulazak zraka, koji negativno utječe na mehanička svojstva zavara. Kod premalog protoka zaštitnog plina, plin se lako otklanja s mjesta zavara, te time mjesto zavara nije dovoljno zaštićeno, što rezultira lošim mehaničkim svojstvima zavara [8].

Protok zaštitnog plina kreće od 4 l/min do 20 l/min. Kod zavarivanja aluminijske legure, količina zaštitnog plina argona iznosi oko 6 l/min na 100 A, a povećanjem jakosti struje za svakih sljedećih 100 A, količina zaštitnog plina iznosi oko 4 l/min. Pri zavarivanju nehrđajućih čelika potrošnja plina je za otprilike 25 % manja i iznosi oko 4,5 l/min na 100 A [19].

## 4. Nehrđajući čelik

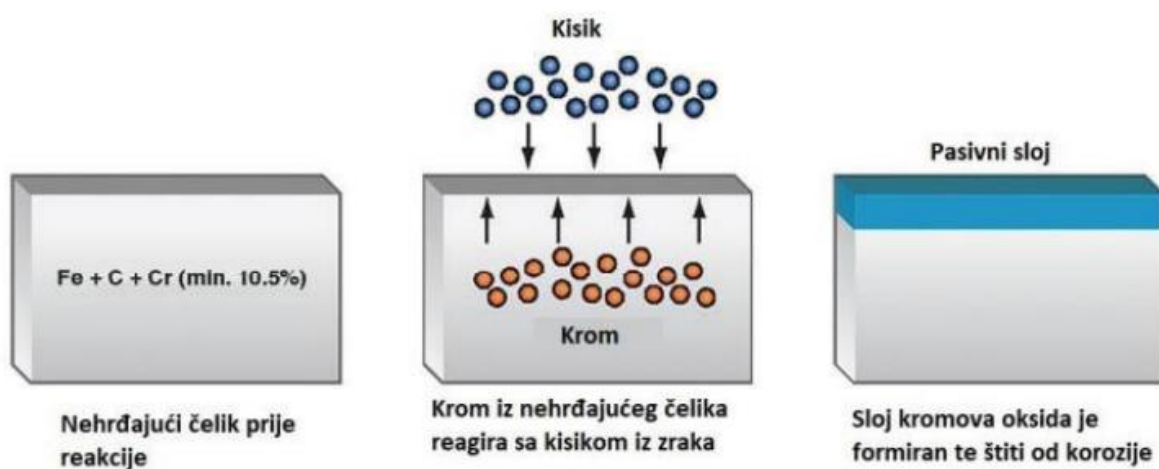
Naziv nehrđajući čelik (eng. stainless steel) koristi se od početka 20. stoljeća kada je započelo razdoblje razvijanja ovog tipa čelika. Drugi sinonimi za slitinu čelika s minimalnim udio kroma od 10,5 % su korozijski postojani čelik, inox i prokrom. Osim kroma, nehrđajući čelici sadrže i ostale legirajuće elemente koji mogu biti metalni (molibden, titan, nikal, bakar) i nemetalni (dušik, ugljik). Pomoću legirajućih elemenata se modificiraju njihova struktura i postižu svojstva veće korozijske postojanosti, poboljšana obradivost, čvrstoća i žilavost pri nižim temperaturama [20].

Nehrđajući čelici su kemijski složeniji od ostalih čelika. Zbog većeg broja legirajućih elemenata, veći je raspon mogućih faza i osnovnih kristalnih struktura. Negativna strana velikog broja legirajućih elemenata je povećano odstupanje od ponašanja čistog željeza, te je teško predvidjeti koja će faza nastati. Postoje tri osnovne faze nehrđajućeg čelika, a to su feritna, martenzitna i austenitna. Široka raznolikost legura koja postoje temelje se na [21]:

- kombinaciji osnovnih faza,
- mijenjanju sastava osnovnih faza,
- dodavanju sekundarnih faza za određene svrhe.

Nehrđajući čelici svoju korozijsku postojanost pripisuju stvaranju pasivnog sloja oksida na samoj površini metala. Taj sloj je bogat kromovim oksidima te se uz prisustvo kisika sam obnavlja te se taj proces naziva pasivizacija. Nastali pasivni sloj je nevidljiv, netopljiv, kompaktan te jako dobro pričvršćen na površinu štiteći metal na kojem se nalazi, a sastoji se od oksida  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  [22].

Na slici 4.1 prikazan je proces pasivizacije te nastali pasivni sloj na površini metala.

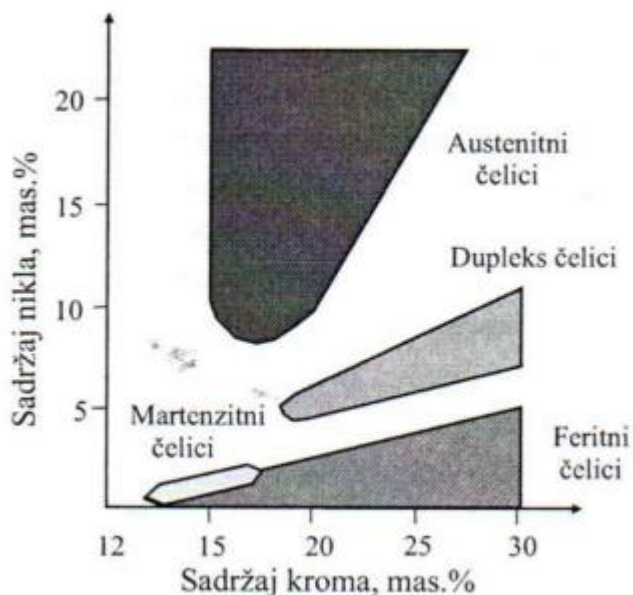


Slika 4.1 Proces pasivizacije [23]

## 4.1. Podjela nehrđajućih čelika

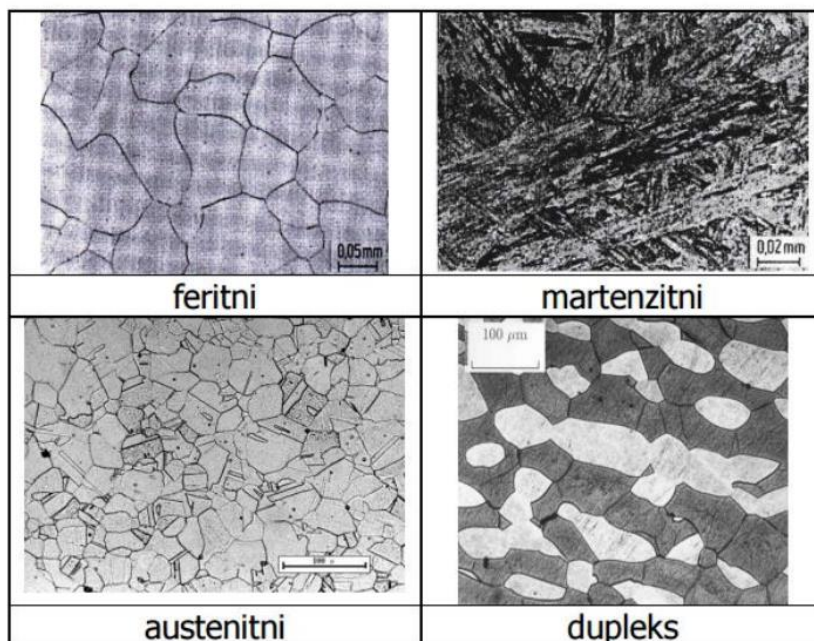
Nehrđajući čelici se prema mikrostrukтури dijele na: feritne, martenzitne, austenitne, dupleks te precipitacijski očvršnute čelike. Određivanje strukture zavarenog spoja nehrđajućih čelika, može se odrediti pomoću Cr i Ni ekvivalenta iz Schaefflerovog dijagrama [24].

Na slici 4.1.1 prikazana su područja osnovnih vrsta nehrđajućih čelika ovisno o sadržaju kroma i nikla.



Slika 4.1.1 Područja osnovnih vrsta nehrđajućih čelika ovisno o sadržaju kroma i nikla [24]

Na slici 4.1.2 prikazana je karakteristična mikrostruktura za svaku od grupa nehrđajućih čelika.



Slika 4.1.2 Mikrostruktura pojedine grupe nehrđajućih čelika [25]

### 4.1.1. Feritni nehrđajući čelici

Feritni nehrđajući čelici sadrže 11 – 17 % kroma i manje od 0,1 % ugljika, te druge legirne elemente poput molibdena, silicija, aluminijsa, niobija i sl.. Kako bi se poboljšala strojna obradivost dodaje se sumpor i selen. Kod feritnih čelika ne dolazi do faznih pretvorbi, tj. kod hlađenja ne dolazi do zakaljivanja, te se zbog toga ne mogu očvrnuti postupcima toplinske obrade. Granica razvlačenja kreće se 275 – 350 MPa, vlačna čvrstoća 415 – 585 MPa, a duktilnost je 20 – 35 %. Zbog male čvrstoće i osjetljivosti na senzibilizaciju, obradivost i upotreba feritnih nehrđajućih čelika je ograničena. Feritni nehrđajući čelici su jeftini, feromagnetični te otporni na koroziju i oksidaciju. Iz tog razloga, njihova primjena je u uvjetima izloženosti dušičnoj kiselini, u obradi voda, preradi hrane i arhitekturi. Koriste se u postrojenjima gdje je otvorena opasnost od pojave napetosne korozije, gdje ne mogu zadovoljiti austenitni čelici. Također, feritni nehrđajući čelici kao npr. 409 i 405, koriste se u auspusima, ispušnim sustavima te kuhinjskim sudoperima [26].



*Slika 4.1.1.1 Primjer upotrebe feritnog nehrđajućeg čelika*

Neke od svojstva feritnih nehrđajućih čelika su [26, 27]:

- slaba deformabilnost,
- magnetičnost,
- relativno mekani,
- skloni lomu pri niskim temperaturama,
- ekonomski najprihvatljiviji nehrđajući čelici,
- dobra obradivost odvajanjem čestica,
- postojanost u oksidirajućim kiselinama,
- loša postojanost u kloridnim otopinama (morska voda),
- dodatkom molibdena veća otpornost od rupičaste korozije,
- skloni stvaranju krhke sigma faze (520 – 850 °C).



#### 4.1.2. Martenzitni nehrđajući čelici

Martenzitni nehrđajući čelici sadrže 11 – 13 % kroma i do 1,2 % ugljika, te su najmanja skupina nehrđajućih čelika. Povećani udio ugljika pomaže kod kaljenja kako bi se povećala čvrstoća i tvrdoća čelika. Za razliku od feritnih nehrđajućih čelika, martenzitni nehrđajući čelici mogu očvrnuti postupcima toplinske obrade, te su feromagnetični. Kako bi se poboljšala korozijska postojanost dodana je mala količina nikla, a za poboljšanje obradivost tu su sumpor i selen. Nedostatak martenzitnih nehrđajućih čelika je osjetljivost prema vodikovoj krhkosti, te loša otpornost na udarni rad loma pri niskim temperaturama. Koriste kod izrade pribora za jelo, elemenata kugličnih ležaja, kirurškog i zubarskog pribora, turbinskih lopatica [26].



*Slika 4.1.2.1 Primjer upotrebe martenzitnog nehrđajućeg čelika*

Martenzitni nehrđajući čelici se dijele na dvije podskupine [28]:

- Konstrukcijski čelici
  - sadrže do 0,25 % ugljika, korozijski postojani, poboljšavaju se.
- Alatni čelici
  - sadrže > 0,3 % ugljika, otporni na abrazijsko trošenje, nakon kaljenja se nisko popuštaju.

Neke od svojstva martenzitnih nehrđajućih čelika su [26, 27]:

- mogu se kaliti zbog transformacije  $\gamma \leftrightarrow \alpha$ ,
- poboljšana granica razvlačenja,
- otporni na puzanje pri povišenim temperaturama,
- loša otpornost na udarni rad loma pri niskim temperaturama,
- osjetljivost prema vodikovoj krhkosti,
- u odnosu na feritne i austenitne nehrđajuće čelike imaju veću tvrdoću i čvrstoću,
- koriste u poboljšanom stanju .

### 4.1.3. Austenitni nehrđajući čelici

Austenitni nehrđajući čelici sadrže 15 – 20 % kroma, 0,02 – 0,15 % ugljika te 7 – 20 % nikla, uz moguće dodavanje određene količine molibdena, titanija, tantala i dušika. To je najveća i najkorištenija skupina nehrđajućih čelika zbog dobre korozijske postojanosti, izvrsne zavarljivosti, mehaničkih svojstava i estetskih karakteristika. Nedostatak austenitnih nehrđajućih čelika je sniženje čvrstoće i granice razvlačenja zbog manjeg udjela ugljika, dok je prednost ove skupine nehrđajućih čelika otpornost na senzibilizaciju, odnosno interkristalnu koroziju. Primjena austenitnih nehrđajućih čelika je jako široka, od prehrambene industrije, pivovara, mljekara pa sve do ortopedije [25].

Osnovni potrebni zahtjevi da se postigne austenitna mikrostruktura nehrđajućih čelika [26]:

- što niži maseni udio ugljika, < 0,15 % - karbid  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ , otpornost interkristalnoj koroziji,
- što viši maseni udio kroma, > 18 % - povećana antikorozivnost,
- što viši maseni udio nikla, > 8 % - austenitna mikrostruktura,
- dodatno legiranje s molibdenom, titanom, niobijem i/ili tantalom – nastanak 5 – 10 % delta ferita, otpornost interkristalnoj koroziji,
- povišeni udio dušika, 0,2 – 0,4 % - veća čvrstoća i otpornost na napetosnu i rupičastu koroziju.

Neke od svojstva austenitnih nehrđajućih čelika su [26, 27]:

- visok odnos čvrstoća / masa,
- dobra svojstva pri niskim temperaturama,
- nemagnetičnost,
- nema mogućnosti usitnjavanja zrna,
- nisu skloni povećanju kristalnog zrna u zoni utjecaja topline tijekom zavarivanja,
- visoka žilavost, oksidacija i korozijska otpornost,
- veće su napetosti i deformacije tijekom zavarivanja, u odnosu na feritne čelike,
- visoka otpornost na rupičastu koroziju, napetosnu i interkristalnu koroziju,
- visoka deformabilnost – kubična plošno centrirana kristalna rešetka (FCC),
- postojana austenitna struktura od „solidus“ temperature do ispod sobne temperature,
- koeficijent toplinske vodljivosti oko 60 % manji – slabo odvođenje topline iz područja zavarivanja,
- koeficijent toplinskog rastezanja 50 % veći u odnosu na ostale čelike – pojava deformacija i zaostalih naprezanja tijekom i nakon zavarivanja.

#### 4.1.4. Dupleks nehrđajući čelici

Dupleks čelici ili austenitno – feritni čelici imaju dvofaznu mikrostrukturu s 40 – 60 % ferita. Također dupleks čelici sadrže 22 – 24 % kroma i 6 – 8 % nikla pri sobnoj temperaturi. Razvoj dupleks čelika započinje 1930. godine, ali zbog problema sa zavarivanjem i korozijskom postojanošću, njegova masovna upotreba počinje 1970-ih godina. Navedeni problemi sa dupleks čelicima riješen je dodavanjem dušika. Dupleks čelici, zbog miješanja austenitne i feritne mikrostrukture, ostvaruju dobra mehanička i korozivna svojstva te imaju široku primjenu. Visok udio ferita, dupleks čeliku daje višu toplinsku vodljivost i nižu toplinsku rastezljivost [25].

]Primjena dupleks nehrđajućih čelika je široka, a primjenjuje se u industriji nafte i plina (ventili, pumpe, crpke), brodogradnji (kormila, grijači, ležajevi), posude pod tlakom, izmjenjivači topline itd. [13].

Neke od svojstva dupleks nehrđajućih čelika su [26, 27]:

- povećana otpornost na napetosnu, opću i rupičastu koroziju,
- teže se stvara karbid  $\text{Cr}_2\text{C}_6$ ,
- temperatura primjene u rasponu od  $-50\text{ }^\circ\text{C}$  do  $350\text{ }^\circ\text{C}$  – „krhkost 475“,
- magnetični su,
- veća čvrstoća u odnosu na austenitne nehrđajuće čelike.

#### 4.1.5. Precipitacijski očvrnuti nehrđajući čelici

Precipitacijski očvrnuti nehrđajući čelici su krom-nikal čelici koji sadrže. Postoje tri vrste precipitacijskih nehrđajućih čelika, a to su austenitni, poluaustenitni i martenzitni. Kako bi se dobila željena svojstva čelika, mora se osigurati nastanak potrebnih faza i precipitata. Također, za postizanje željenih svojstava bitna je optimalna ravnoteža kemijskog sastava. Kako bi došlo di reakcije precipitacijskog očvrstnuća, dodaju se elementi poput bakra, titana i molibdena. Precipitacijski očvrnuti čelici imaju slična ili bolja mehanička svojstva od martenzitnih i austenitnih nehrđajućih čelika. Martenzitni precipitacijski očvrnuti nehrđajući čelici se primjenjuju u zrakoplovnoj, kemijskoj i petrokemijskoj industriji, te u prehrambenoj industriji [29].

## 5. Korozija

Korozijom se može smatrati proces razaranja konstrukcijskih materijala, a uslijed fizikalnih, kemijskih ili bioloških čimbenika. Korozija dolazi od latinske riječi *corrodare*, što znači nagristi. Korozija se prvenstveno odnosi na metalne materijale pa se stoga može definirati i prema normi HRN EN ISO 8044:2015 kao fizikalno-kemijsko međudjelovanje metala i njegovog okoliša koje uzrokuje promjenu uporabnih svojstava metala te može dovesti do oštećenja funkcije metala, okoliša ili tehničkog sustava koji on čini [30].

Trajnost same konstrukcije uveliko ovisi o koroziji. Kako bi se spriječila pojava koruzijskog razaranja, potrebno je pravilno odabrati odgovarajuće vrste materijala ovisno o tome u kojima će se uvjetima nalaziti, te tehnološki ispravno provesti tehnologiju zavarivanja [31].

### 5.1. Korozija kod nehrđajućih čelika

Kriteriji za klasifikaciju koruzijskih procesa mogu biti razni, ali najčešće se uzimaju slijedeći [30]:

- podjela prema mehanizmu procesa koruzije,
- prema razdiobi na površini materijala ,
- prema mediju u kojem se odvija,
- prema vezi s drugim razarajućim utjecajima,
- prema materijalu koji korodira.

Osam je osnovnih tipova koruzije [13]:

- opća,
- galvanska,
- koruzija u procjepu,
- rupičasta (pitting),
- interkristalna,
- selektivna,
- erozijska,
- napetosna.

Kod nehrđajućih čelika najčešća su četiri oblika koruzije, a to su [13]:

- rupičasta (pitting),
- koruzija u procjepu,
- interkristalna,
- napetosna.

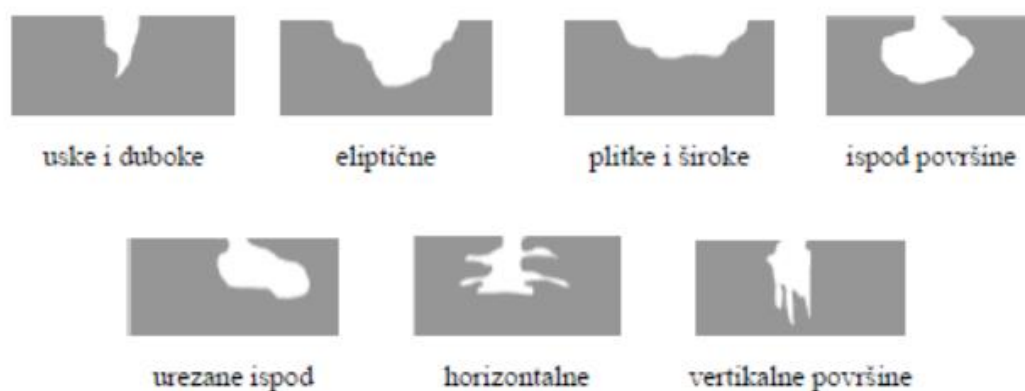
### 5.1.1. Rupičasta (pitting) korozija

Rupičasta korozija je vrlo česti oblik elektrokemijske korozije tehničkih materijala. Sinonimi za rupičastu koroziju su točkasta, jamičasta te pitting korozija. Pojavljuje se na usko lokaliziranim žarištima kružnog presjeka, tj. nastajanje rupičastih oštećenja, šupljina, koja se protežu od površine prema dubini. Uzrok rupičaste korozije su lokalne nehomogenosti u strukturi ili kemijskom sastavu materijala. Uz postojanje elektrolita dolazi do pokretanja autokatalitičkog mehanizma oštećenja i nastajanja lokalnih korozijskih članaka s izrazitim razlikama potencijala [30].



Slika 5.1.1.1 Primjer oštećenja nastalog zbog rupičaste korozije [30]

Rupičasta korozija se često veže za materijale kao što su nehrđajući čelici, tj. za materijale koji se nalaze u pasivnom stanju. Razaranja pasivnog filma kod nehrđajućih čelika izazivaju kloridni ioni, ali i ostali halogenidni ioni kao što je  $\text{Br}^-$  i  $\text{F}^-$ . Kloridi su relativno mali anioni s velikom moći difuzije, te takvi ometaju proces pasivacije [30].



Slika 5.1.1.2 Mogući pojavni oblici rupica nastali korozijskim procesom [32]

Sa pojavom rupičaste korozije nehrđajućih čelika često se veže i pojava obojenosti uslijed toplinskog ciklusa, tj. zavarivanja. Obojenost se identificira kao područje oksida različitog kemijskog sastava i debljine, takozvana zona toplinskih nijansi. S obzirom na prirodu kemijske postojanosti nehrđajućih čelika, koja se zasniva na spontano formiranom pasivnom sloju kromovih oksida, ovakva područja obojenosti negativno utječu na korozijsku otpornost zavarenog spoja [30].



*Slika 5.1.1.3 Rupičasta korozija- zone toplinskih nijansi i korozijska oštećenja [30]*

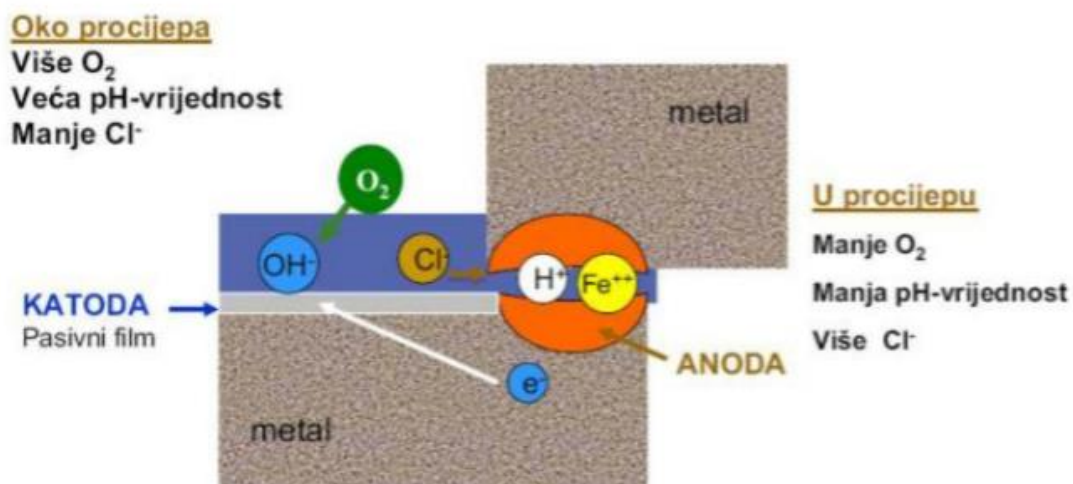
Smanjenje sklonosti rupičastoj koroziji može se postići [30]:

- povećanjem otpornosti materijala,
- smanjenjem agresivnosti korozijskog okoliša,
- inhibicijom,
- katodnom zaštitom,
- smanjenjem hrapavosti površine.

### **5.1.2. Korozija u procjepu**

Korozija u procjepu je korozijski sličan proces rupičastoj koroziji, a razlika je u tome da se inicijacija javlja u procjepu. Korozija u procjepu javlja se u blizini pukotine, procjepa ili razmaka između površina, a može biti inicirana i nakupljanjem korozijskog medija u toj pukotini makar je okolna površina uglavnom suha. Između dva elementa u elektrolitu, a koji čine procjep, nastaje razlika u koncentraciji elektrolita, te se kao rezultat elektrokemijske reakcije u unutrašnjom dijelu pukotine povećava kiselina otopine, smanjuje se pH vrijednost, te se povećava koncentracija agresivnih čimbenika [30].

Mehanizam korozije u procjepu je prikazano na slici 5.1.2.1.



Slika 5.1.2.1 Mehanizam korozije u procjepu [33]

Uzroci korozije u procjepu su povezani sa lošim konstrukcijsko-tehnološkim rješenjima, tj. oblikovanjem konstrukcija. Također, može se javljati ispod nečistoća, naslaga i slično [30].

Smanjenje sklonosti koroziji u procjepu može se postići [30]:

- odgovarajućim konstrukcijsko-tehnološkim rješenjima,
- korištenjem čelika s većim udjelom Cr, Mo, N i Cu,
- drenažom,
- katodnom zaštitom,
- izbjegavanjem naslaga.

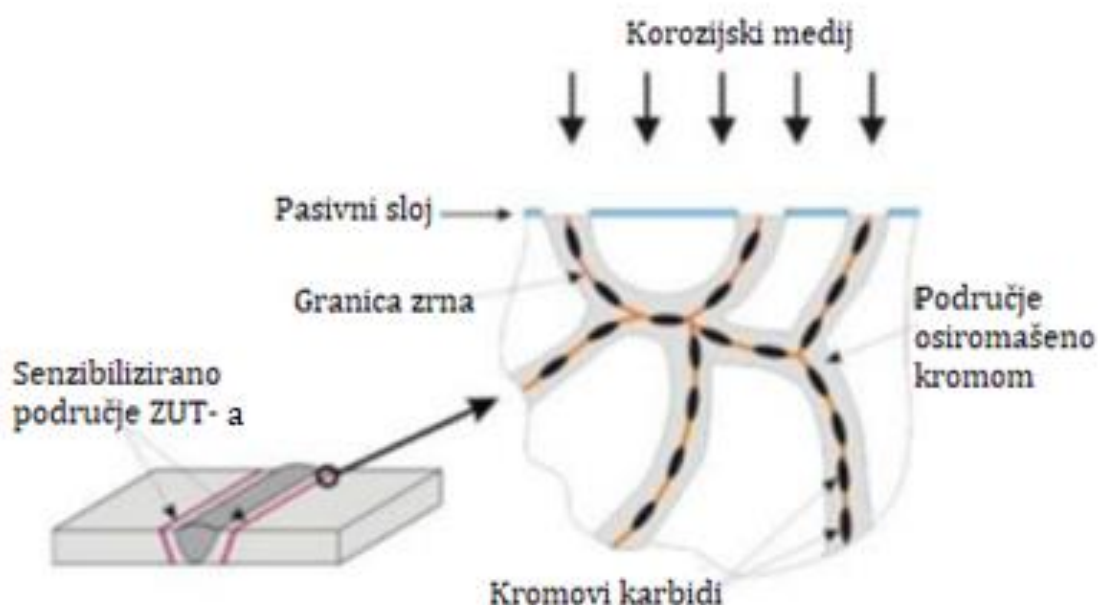


Slika 5.1.2.2 Primjer oštećenja uzrokovana korozijom u procjepu [30]

### 5.1.3. Interkristalna korozija

Interkristalna korozija je najopasniji oblik korozijskih procesa kod materijala. Interkristalna korozija nevidljivo razara materijal duž granice zrna, propagira u dubinu i izaziva smanjenje čvrstoće i žilavosti, a u konačnici i na lom materijala [30].

Interkristalna korozija se često veže uz proces senzibilizacije, tj. proces kod kojeg uslijed unosa topline dolazi do nastanka različitih precipitata, nečistoća ili segregata, te do njihovog izlučivanja na granice zrna. Takvi nastali spojevi imaju različiti potencijal u odnosu na čvrstu otopinu te se stvaraju pogodni uvjeti za nastanak korozijskog procesa. Kod austenitnih Cr-Ni čelika uslijed difuzijskih procesa i velikog afiniteta ugljika prema kromu, u temperaturnom intervalu od 550°C do 800°, dolazi do senzibilizacije austenita, tj. do stvaranja uvjeta za formiranje Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> karbida po granicama zrna nakon hlađenja iz tog temperaturnog intervala. Proces mehanizma interkristalne korozije kod Cr-Ni čelika je prikazan na slici 5.1.3.1. [30].



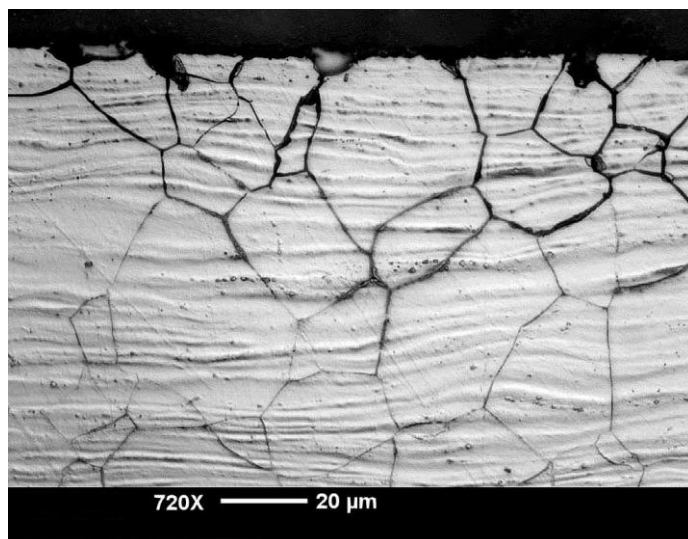
Slika 5.1.3.1 Shematski prikaz mehanizma interkristalne korozije Cr-Ni čelika [30]

Takvi spojevi u sebi sadrže visoki postotak kroma, 70 %, a okružuju ih područja osiromašena kromom, koji imaju manje od 12 % kroma. Tako nastaju anodna mjesta, čvrsta otopina osiromašena kromom, koja se nalaze uz granicu zrna i katodna mjesta, što je preduvjet za nastanak korozijskog procesa. Time se gube dva preduvjeta korozijske postojanosti, a to su monofazna struktura i minimalno 12 % kroma u čvrstoj otopini [30].



Smanjenje sklonosti interkristalnoj koroziji postiže se [30]:

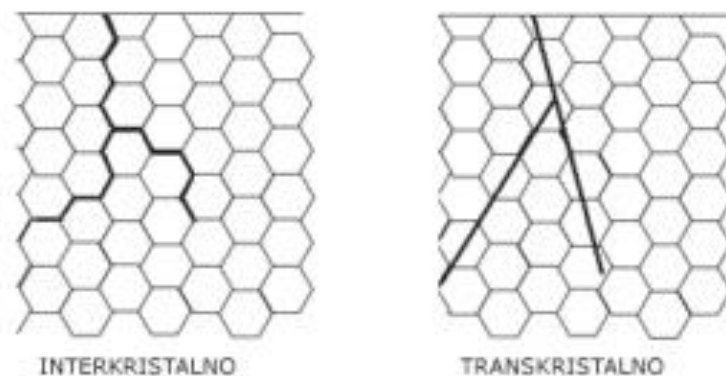
- žarenjem (1050 °C-1100 °C , 10-40 min), pri čemu se  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  otapa + gašenje u vodi,
- stabilizacija karbidotvornim metalima: Ti, Nb, Ta; grijanjem se između zrna izlučuju TiC, NbC, TaC,
- snižavanjem udjela C < 0.03 % što onemogućuje izlučivanje karbida.



Slika 5.1.3.2 Primjer oštećenja uzrokovana interkristalnom korozijom [34]

#### 5.1.4. Napetosna korozija

Napetosna korozija je oblik korozivnog procesa koji nastaje zbog istodobnog djelovanja agresivnog okruženja, mehaničkih naprezanja i korozijskih reakcija. Napetosnu koroziju izazivaju unutarnja vlačna naprezanja, a uglavnom su posljedica zaostalih naprezanja zbog hladne deformacije ili zavarivanja u okolini povišene temperature, tlaka i opasnih otopina. Pukotine nastale napetosnom korozijom napreduju okomito na smjer vlačnog naprezanja, a šire se interkristalno i transkristalno [35].



Slika 5.1.4.1 Načini širenja pukotina kod napetosne korozije [35]

Napetosna korozija kod nehrđajućih čelika je lokalni korozijski proces koji interkristalno ili transkristalno razara strukturu materijala. Ovaj oblik korozije je teško predvidjeti i otkriti prije njene završne faze, tj. loma. Kod nehrđajućih čelika se napetosna korozija najčešće javlja u elektrolitima koji sadrže  $\text{Cl}^-$  i  $\text{H}^-$ , visoki pH vrijednosti, ili  $\text{H}_2\text{S}$ . Na pojavu napetosne korozije utječu zaostala unutarnja naprezanja koja su posljedica plastične deformacije materijala, zavarivanja ili drugih tehnoloških procesa. Osim unutarnjih naprezanja, kod nehrđajućih čelika na napetosnu koroziju utječe i temperatura, pa se tako ispod  $55\text{ }^\circ\text{C}$  ne pojavljuje napetosna korozija. Transkristalni lom se kod nehrđajućih čelika javlja na temperaturama iznad  $80\text{ }^\circ\text{C}$ , dok se na temperaturama nižim od  $80\text{ }^\circ\text{C}$  pojavljuje interkristalni lom [35].

Smanjenje sklonosti napetosnoj koroziji postiže se [30]:

- sniženjem vlačnog naprezanja toplinskom obradom ili konstrukcijskom izmjenom,
- inhibicijom,
- katodnom zaštitom,
- zamjenom metala, npr. austenitnog čelika feritnim čelikom,
- deaktivacijom medija.

## 6. Eksperimentalni dio

### 6.1. Opis eksperimenta

Eksperimentalni dio diplomskog rada proveden je u laboratorijima Sveučilišta Sjever u Varaždinu. Cilj rada bio je odrediti utjecaj brzine zavarivanja na izgled i kvalitetu zavara. U eksperimentalnom dijelu rada pomoću automata za pravocrtno zavarivanje, provedeno je TIG zavarivanje četiri uzoraka. Kod zavarivanja mijenjana je brzina zavarivanja, dok su ostali parametri ostali isti.

Eksperimentalni dio se sastoji od:

- zavarivanje,
- izrezivanje uzoraka tračnom pilom,
- brušenje i poliranje,
- elektrokemijsko nagrivanje,
- makroanaliza uzorka.

### 6.2. Osnovni materijal

Kao osnovni materijal korišten je austenitni krom-nikal nehrđajući čelik 1,4301 također poznat kao AISI 304, nehrđajući čelik 304 ili X5CrNi18-10. Osnovni materijal je u obliku pločice dimenzije (duljina × širina × debljina) 200 mm × 80 mm × 3 mm. Mehanička svojstva osnovnog materijala prikazana su u tablici 6.2.1., dok je kemijski sastav u tablici 6.2.2..

Tablica 6.2.1. Mehanička svojstva čelika AISI 304 [36]

| Oznaka čelika |      | Mehanička svojstva               |                                  |                  |               |              |               |                               |
|---------------|------|----------------------------------|----------------------------------|------------------|---------------|--------------|---------------|-------------------------------|
| EN            | AISI | $R_m$ , min<br>N/mm <sup>2</sup> | $R_p$ , min<br>N/mm <sup>2</sup> | $A_5$ , min<br>% | $HB$ ,<br>max | $E$ ,<br>GPa | $T_m$ , °C    | Gustoća,<br>g/cm <sup>3</sup> |
| X5CrNi18-10   | 304  | 520-750                          | 215-505                          | 40               | 201           | 193          | 1400-<br>1455 | 7,9                           |

Tablica 6.2.2. Kemijski sastav AISI 304 [36]

| Element | C    | Mn   | Si   | Cr        | N    | S    | Ni     | Fe i ostalo |
|---------|------|------|------|-----------|------|------|--------|-------------|
| Udio, % | 0,07 | 2,00 | 0,75 | 17.5-19.5 | 0,10 | 0,30 | 8-10.5 | 66-72       |



*Slika 6.2.1. Pločica AISI 304 dimenzija 200 mm × 80 mm × 3 mm*

### **6.3. Zaštitni plin, gorionik i netaljiva elektroda**

Kao zaštitni plin koristio se Argon 4.8 proizvođača Messer. Radi se o inertnom plinu čistoće 99,998% te je idealan za MIG i TIG zavarivanje. Na slici 6.3.1 prikazana je boca plina.



*Slika 6.3.1. Argon 4.8*

Za zavarivanje gorionik korišten je gorionik ABITIG GRIP 450 W. Sam gorionik se sastoji od tri dijela, a to su sapnica sa navojem, držač elektrode i stražnji poklopac. Dijelovi gorionika u sklopu su prikazani na slici 6.3.2., dok su sapnica i držač elektrode prikazani na slici 6.3.3.

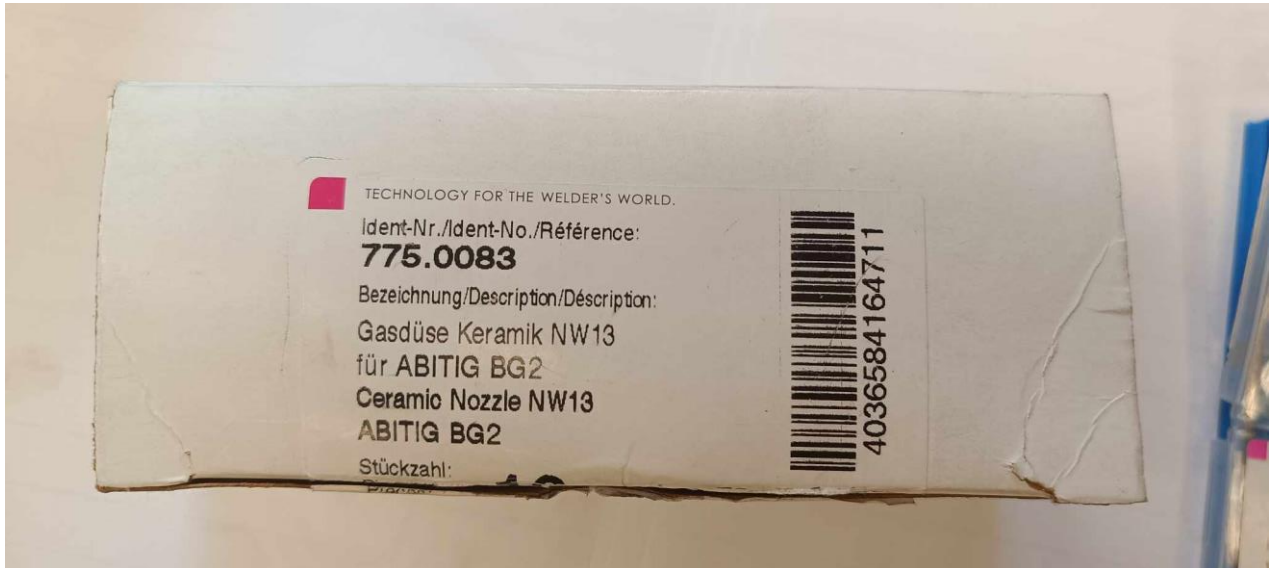


*Slika 6.3.2. Gorionik*



*Slika 6.3.3. Sapnica i držač elektrode*

Koristila se keramička sapnica NW13, a detalji o samoj sapnici se nalaze na slici 6.3.4.



*Slika 6.3.4. Sapnica*

U gorioniku se nalazi WLa15 zlatna volfram elektroda dimenzija 3,2 mm × 175 mm. Ova vrsta elektrode se može koristiti za izmjeničnu i istosmjernu struju, te je prekrivena lantanovim oksidom koji omogućuje lakše stvaranje električnog luka. Na slici 6.3.5. prikazana je WLa15 elektroda.



*Slika 6.3.5. WLa15 elektroda*

## 6.4. Izvor struje

Za izvor struje koristio se uređaj Varstroj VARTIG 2005 AC/DC koji je namijenjen za TIG zavarivanje. Neke od prednosti uređaja su [37]:

- dvotaktno i četverotaktno zavarivanje,
- digitalni prikaz svih funkcija,
- odlična kvaliteta zavara,
- HF-visokofrekventno paljenje bez kontakta,
- HOT START- povećana struja zavarivanja pri početku zavarivanja,
- ANTI STICKING- automatsko isključivanje struje zavarivanja nakon lijepljenja elektrode.

Tehnički podaci samog uređaja su prikazani u tablici 6.4.1.

Tablica 6.4.1. Tehnički podaci za VARTIG 2005 AC/DC uređaj [37]

| TIP                            | VARTIG 2005 AC/DC  |
|--------------------------------|--|
| Priključni napon               | 1 x 230 V  |
| Osigurač (spori)               | 20 A   |
| Područje zavarivanja TIG DC    | 5 – 170 A  |
| Područje zavarivanja TIG AC/DC | 5 – 200 A  |
| Područje zavarivanja REL       | 5 – 170 A  |
| Intermitencija TIG AC/DC       | 40% - 200 A<br>60% - 160 A / 170 A<br>100% - 130 A / 130 A |
| Napon zavarivanja REL/TIG      | 20–26,8V / 10–16,8V  |
| Promjer elektrode              | ∅ 1,5 – 4 mm   |
| Hlađenje izvora                | prisilno - ventilator                                      |
| Masa                           | 18 kg  |
| Dimenzije (mm)                 | 440 x 222 x 480  |

Neke od funkcije uređaja koje se nalaze na kontrolnoj ploči su prikazane su na slici 6.4.1., a one su [37]:

1. prikaz trenutno korištene struje za zavarivanje (DC-),
2. tipka za spajanje za rad na daljinsko upravljanje,
3. tipka za odabir vrste struje,
4. potenciometar regulaciju parametara zavarivanja,
5. tipka za mijenjanje vrste zavarivanja,
6. prikaz uključenja TIG standardnog zavarivanja,
7. 2-taktni rad + HF paljenje,
8. prikazivač za prikaz parametara zavarivanja.



Slika 6.4.1. Kontrolna ploča sa funkcijama



## 6.5. Automat za zavarivanje

Zavarivanje se izvodilo pomoću automata za zavarivanje Rail Bull Promotech. Uređaj je namijenjen za vertikalno i horizontalno pravocrtno zavarivanje. Dijelovi automata nalaze se na slici 6.5.1.



Slika 6.5.1. Dijelovi Rail Bull automata [38]



Slika 6.5.2. Rail Bull automat

## 6.6. Priprema i proces zavarivanja

Prije samog procesa zavarivanja uzorci su sučeono učvršćeni sa obje strane kako bi se lakše izvodilo zavarivanje.

U tablici 6.6.1. pobrojani su parametri zavarivanja.

Tablica 6.6.1. Parametri zavarivanja

| Broj uzorka | Dimenzija pločice, mm | Visina luka, mm | Protok plina, l/min | Jakost struje, A | Brzina zavarivanja, cm/min | Unos topline $Q$ , kJ/cm |
|-------------|-----------------------|-----------------|---------------------|------------------|----------------------------|--------------------------|
| 1           | 200×80×3              | 3               | 12                  | 120              | 24                         | 2,66                     |
| 2           | 200×80×3              | 3               | 12                  | 120              | 16                         | 3,99                     |
| 3           | 200×80×3              | 3               | 12                  | 120              | 10                         | 6,39                     |
| 4           | 200×80×3              | 3               | 12                  | 120              | 13                         | 4,92                     |

Unos topline definiran je u normi HRN EN 1011-1 i izračunava prema formuli:

$$Q = k \cdot \frac{U \cdot I}{v} \cdot \frac{60}{1000}, \text{ kJ/cm}$$

Gdje su:

$Q$ -unešena toplina, kJ/cm

$k$ - koeficijent iskoristivosti topline električnog luka postupka zavarivanja, za TIG  $\rightarrow k = 0,6$

$U$ - napon zavarivanja, V, za TIG  $\rightarrow U = 10 + 0,04 \cdot I$

$I$ -struja zavarivanja, A

$v$ - brzina zavarivanja, cm/min

Na slici 6.6.1 prikazan je pozicioniran uzorak prije zavarivanja.



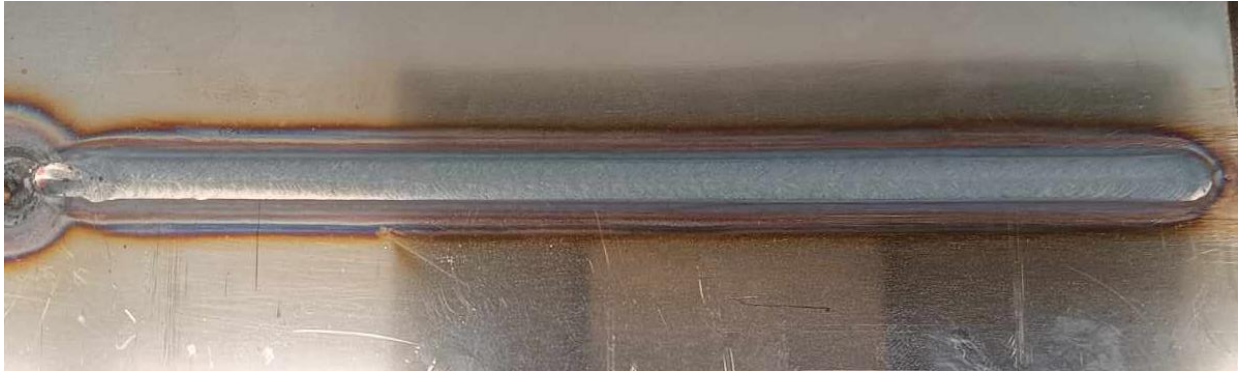
Slika 6.6.1. Pozicioniran uzorak prije zavarivanja

## 6.7. Rezultati zavarivanja

Nakon zavarivanja dobiveni su različiti rezultati koji su prikazani na sljedećim slikama.

### 1. UZORAK

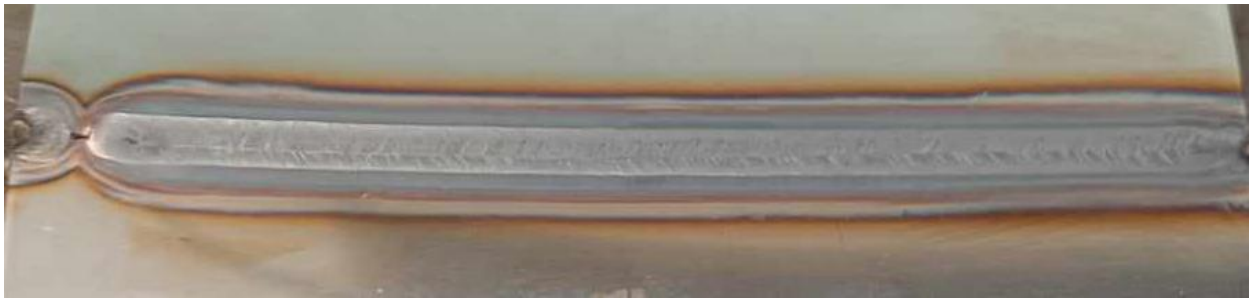
Kod uzorka broj jedan jakost struje je 120 A, protok plina 12 l/min, brzina zavarivanja **24 cm/min.**



*Slika 6.7.1. Lice zavara prvog uzorka*

### 2. UZORAK

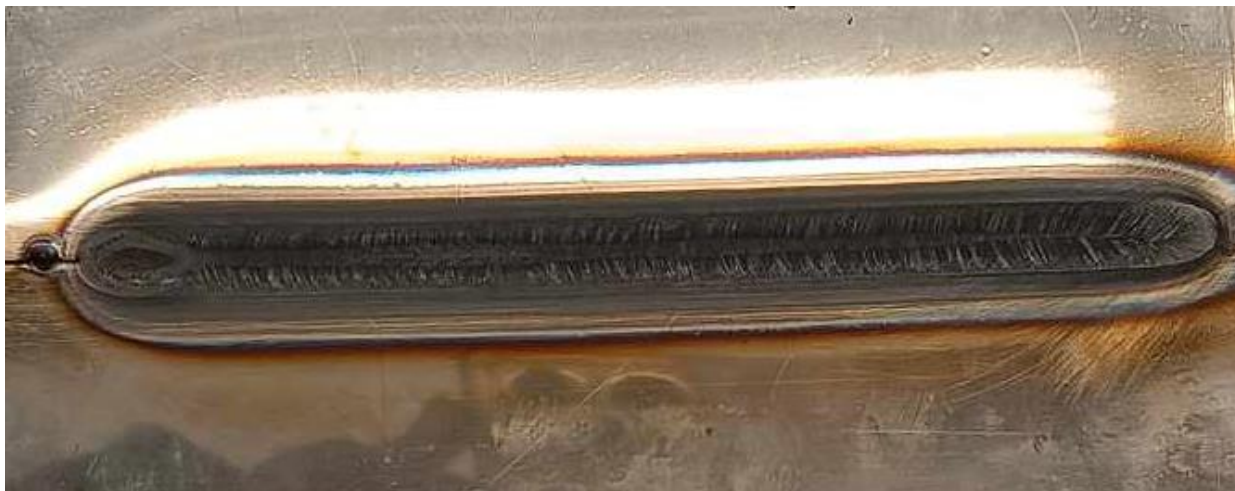
Kod uzorka broj dva jakost struje je 120 A, protok plina 12 l/min, brzina zavarivanja **16 cm/min.**



*Slika 6.7.2. Lice zavara drugog uzorka*

### 3. UZORAK

Kod uzorka broj tri jakost struje je 120 A, protok plina 12 l/min, brzina zavarivanja **10 cm/min.**



*Slika 6.7.3. Lice zavara trećeg uzorka*

### 4. UZORAK

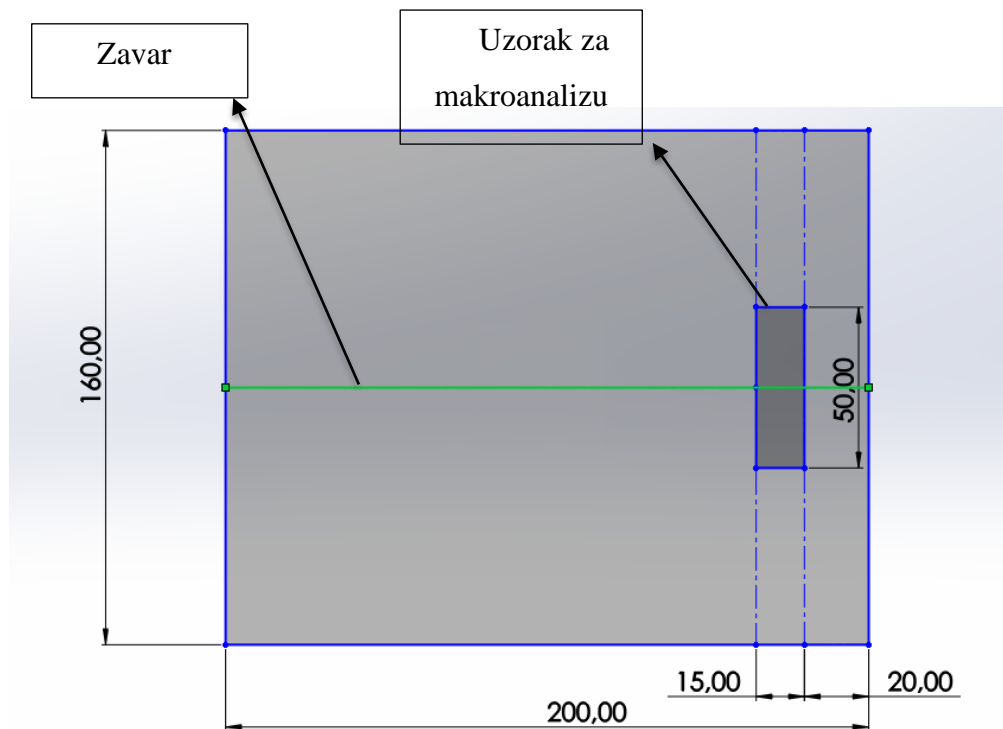
Kod uzorka broj jedan jakost struje je 120 A, protok plina 12 l/min, brzina zavarivanja **13 cm/min.**



*Slika 6.7.4. Lice zavara četvrtog uzorka*

## 6.8. Izrada uzoraka za makroanalizu

Uzorci su nakon zavarivanja obrađeni na tračnoj pili. Novi uzorci za makroanalizu izrezani su 20 mm od početka zavora na dimenziju (duljina × širina) 50 mm × 15 mm. Vizualna skica dobivanja uzoraka za makroanalizu prikazana je na slici 6.8.1.



Slika 6.8.1. Uzorak za mikroanalizu

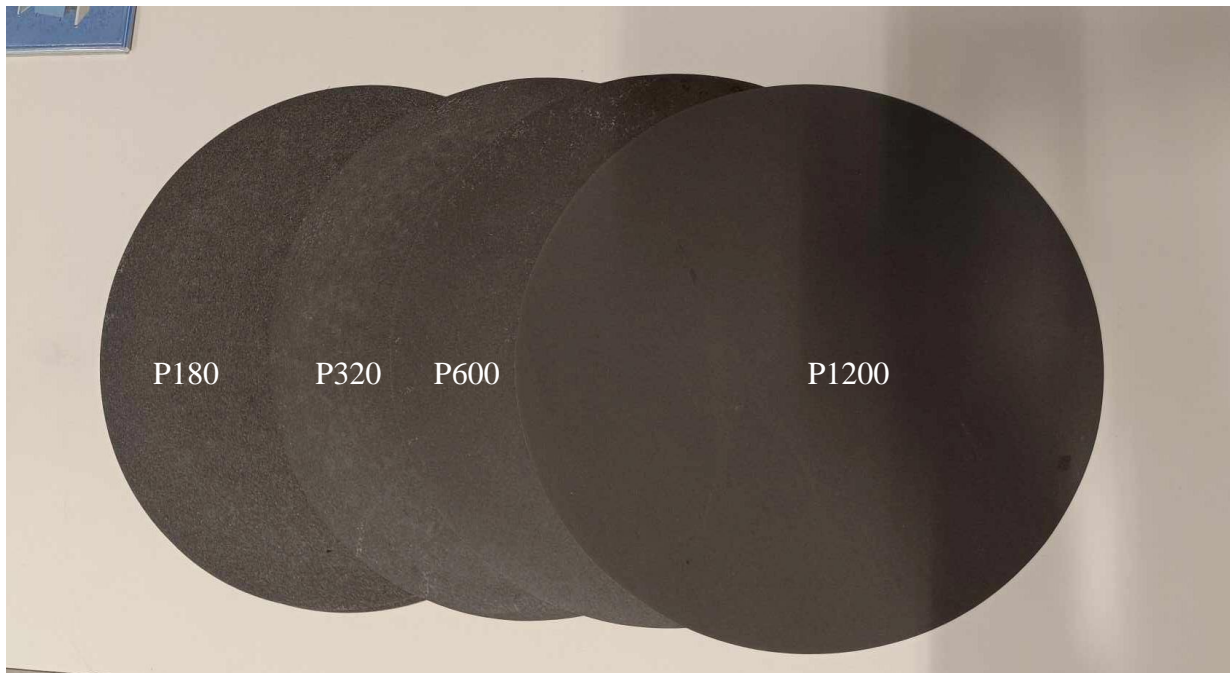
Nakon što su uzorci izrezani, tračna pila je ostavila grubu površinu te je slijedio proces brušenja. Uzorci su brušeni na uređaju Presi Minitech 250 SP1.



Slika 6.8.2. Presi Minitech 250 SP1

Brušenje se odvijalo na četiri brusna papira različite granulacije od grublje prema finijoj. Redosljed korištenja brusnih papira bio je:

- P180,
- P320,
- P600,
- P1200.



*Slika 6.8.3. Brusni papiri različite granulacije*

Brušenje površina primjenom ručnog pritiska trajalo je otprilike tri sata od čega je najviše utrošenog vremena na grubo brušenje. Uzorci nakon brušenja prikazani su na slici 6.8.4.



*Slika 6.8.4. Uzorci nakon brušenja*

Prije same makroanalize, potrebno je provesti elektrokemijsko nagrivanje, tj. izazivanje strukture ispitnog uzorka za makrostrukturna ispitivanja. Za elektrokemijsko nagrivanje potrebno je:

- 19% klorovodična (solna) kiselina- HCl,
- voda,
- bakrena pločica,
- baterija od 9 V,
- pol kleme,
- petrijeva zdjelica,
- laboratorijska čaša,
- podesiva kliješta,
- zaštitna oprema- rukavice i naočale.

Proces elektrokemijskog nagrivanja uzorka prikazan je na slici 6.8.5.



*Slika 6.8.5. Elektrokemijsko nagrivanje uzorka*

Kod procesa elektrokemijskog nagrizanja pozitivni (+) pol baterije povezan je sa ispitnim uzorkom, dok je minus (-) pol povezan sa bakrenom pločicom. Vrijeme izazivanja strukture površine trajalo je otprilike 90 sekundi. Nagrizale su se obje strane ispitnih uzoraka. Nakon što se uzorak izvadio iz klorovodične kiseline, prebačen je u vodu kako bi došlo do prekida reakcije, te se nakon toga premjestio na ubrus kako bi se osušio.

## 6.9. Makroanaliza

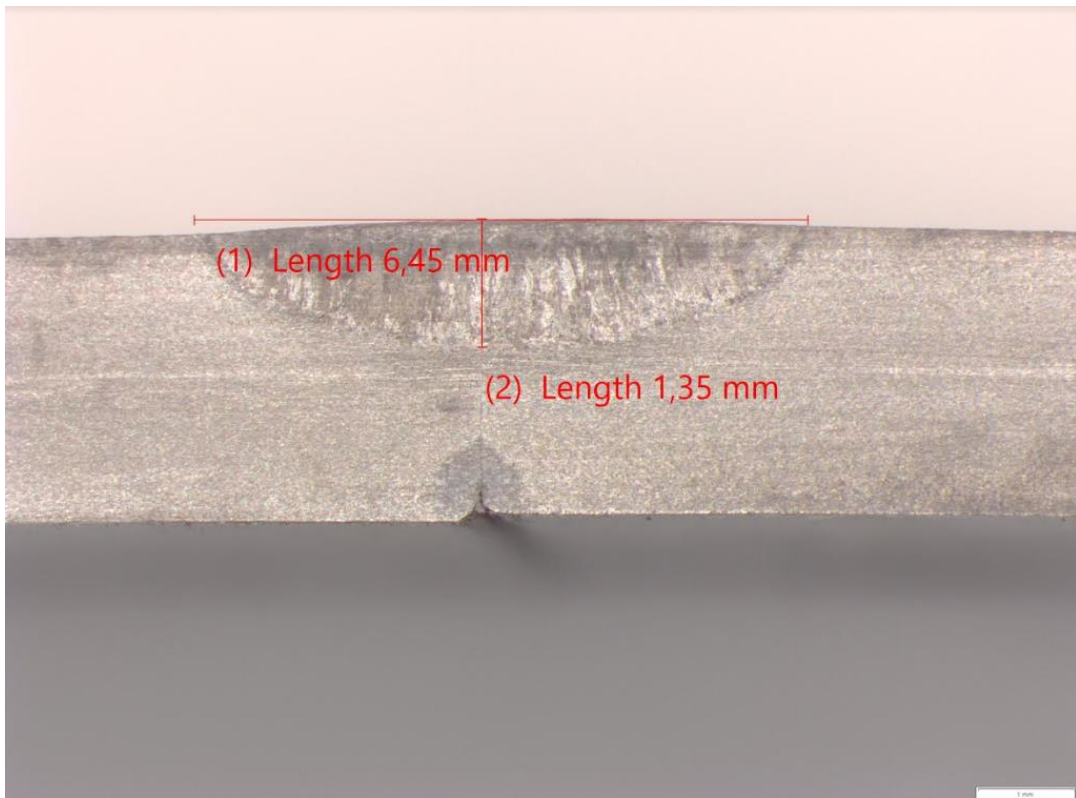
Makroanaliza radila se pomoću stereomikroskopa Olympus SZX10, povećanje  $1,6 \times 10$ , a pomoću računalnog programa OLYMPUS Stream Essentials 2.5.2 omogućena je izrada i obrada slika ispitnog uzorka. Na svakom uzorku se mjerila širina lica, širina korijena te penetracija sa obje strane uzorka. Prva strana uzorka je strana bliža početku zavara.



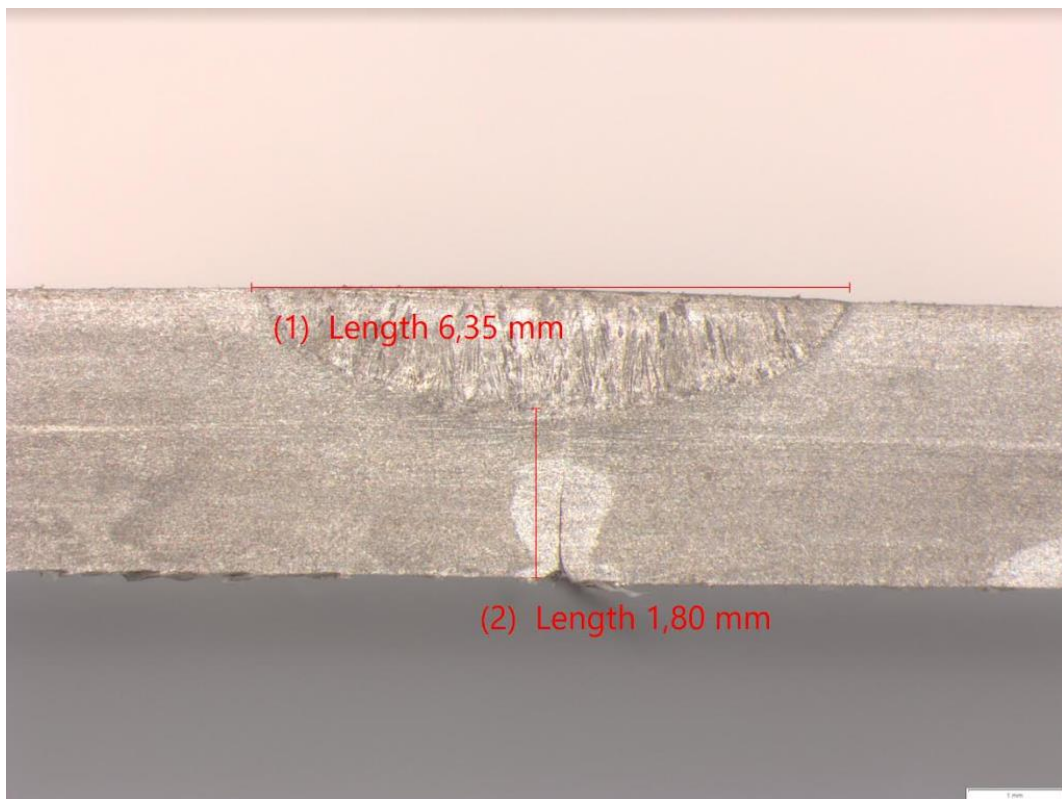
*Slika 6.9.1. Olympus SZX10*



# 1. UZORAK

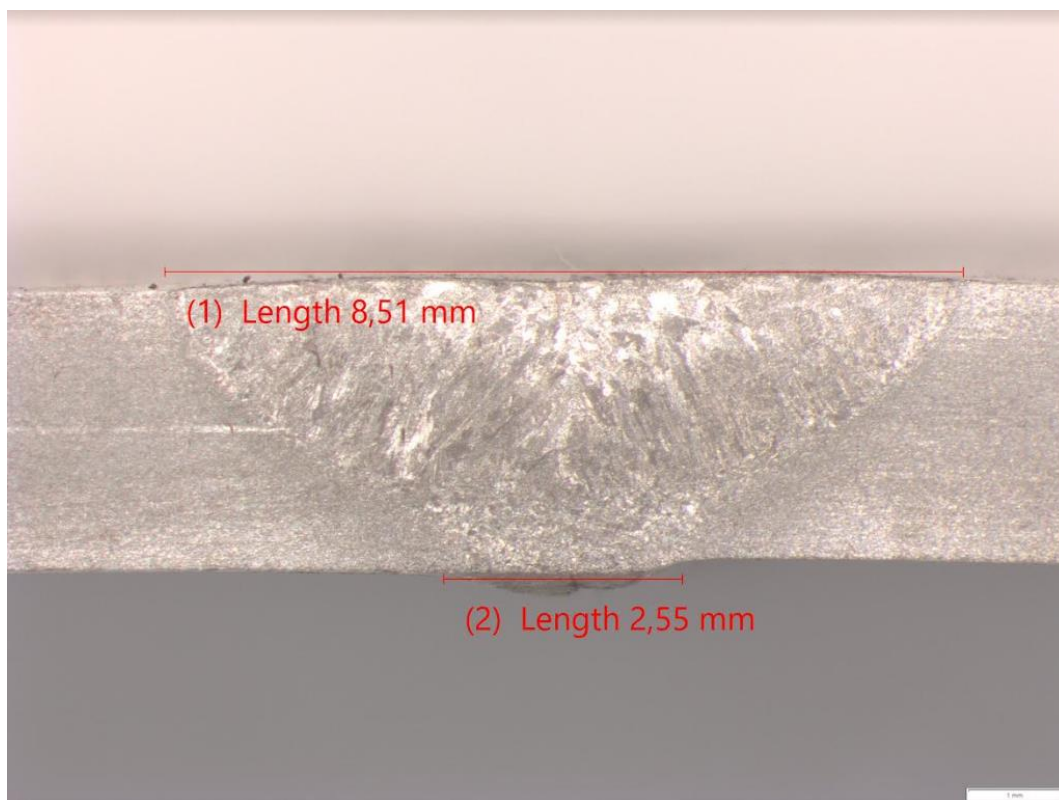


*Slika 6.9.2. Prva strana uzorka broj 1*

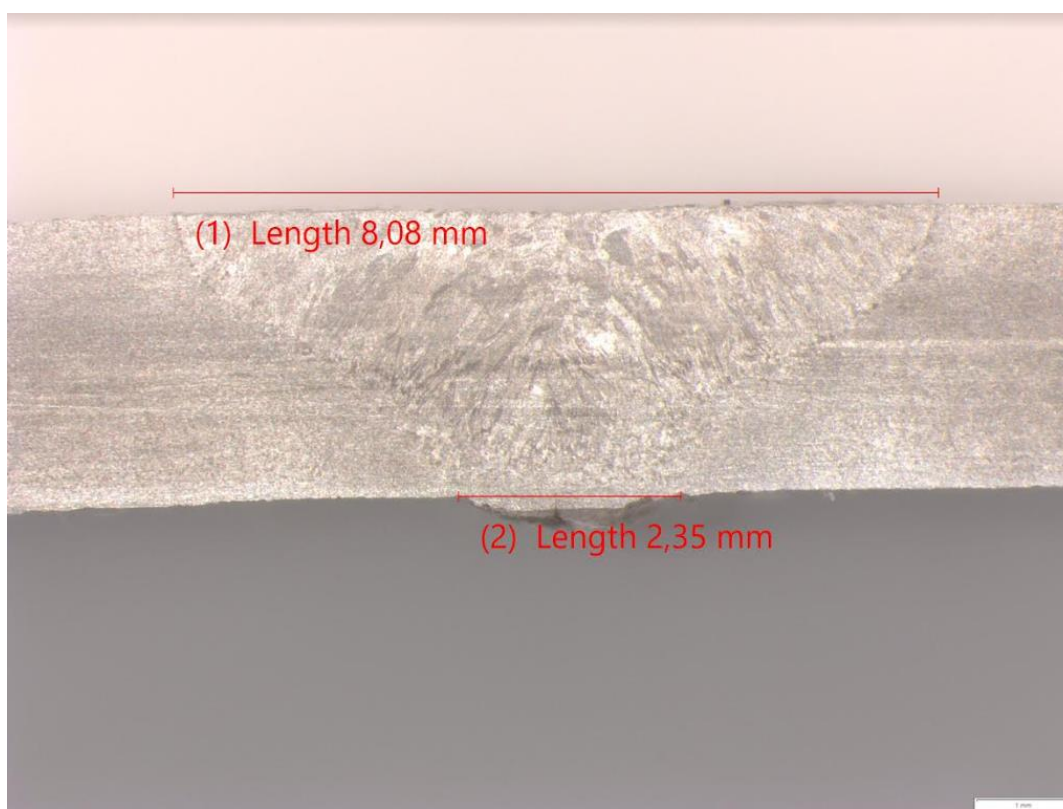


*Slika 6.9.3. Druga strana uzorka broj 1*

## 2. UZORAK

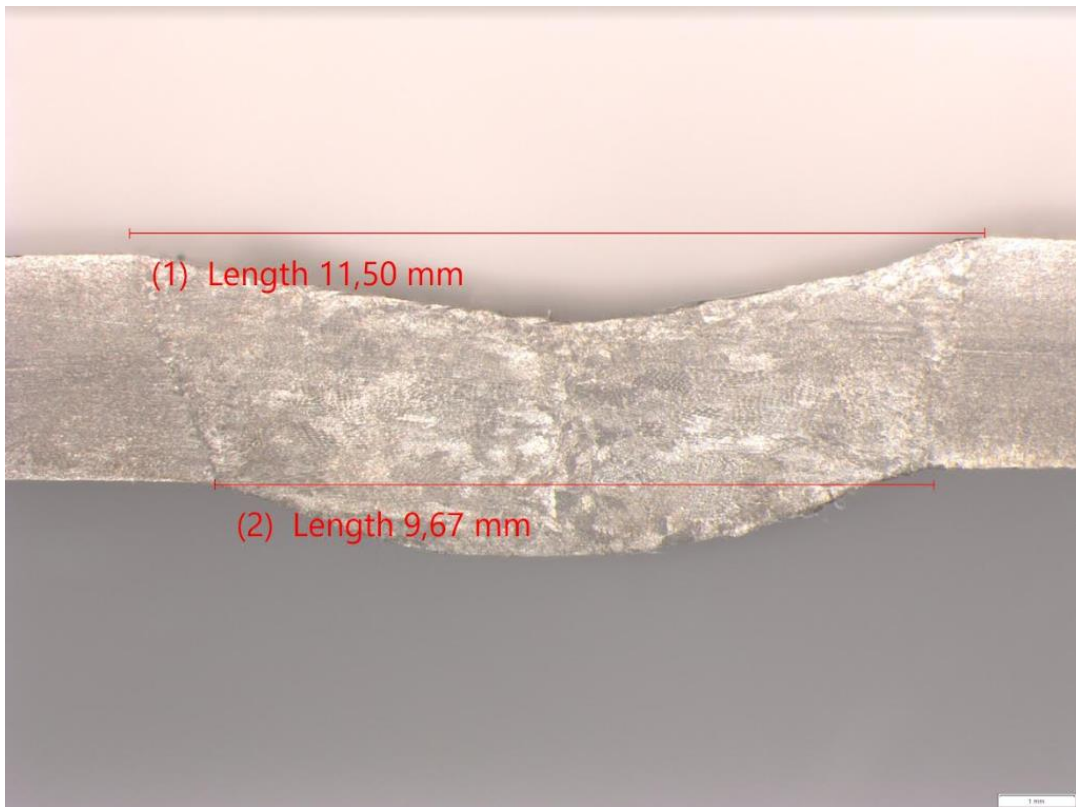


*Slika 6.9.4. Prva strana uzorka broj 2*

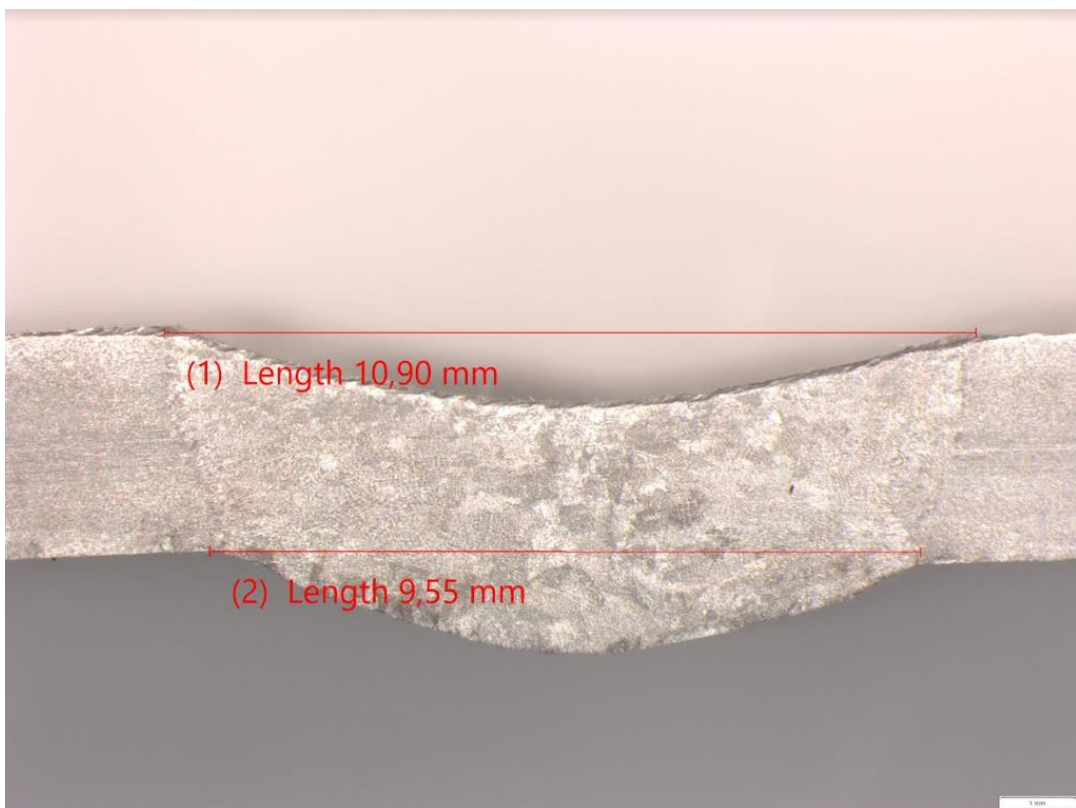


*Slika 6.9.5. Druga strana uzorka broj 2*

### 3. UZORAK

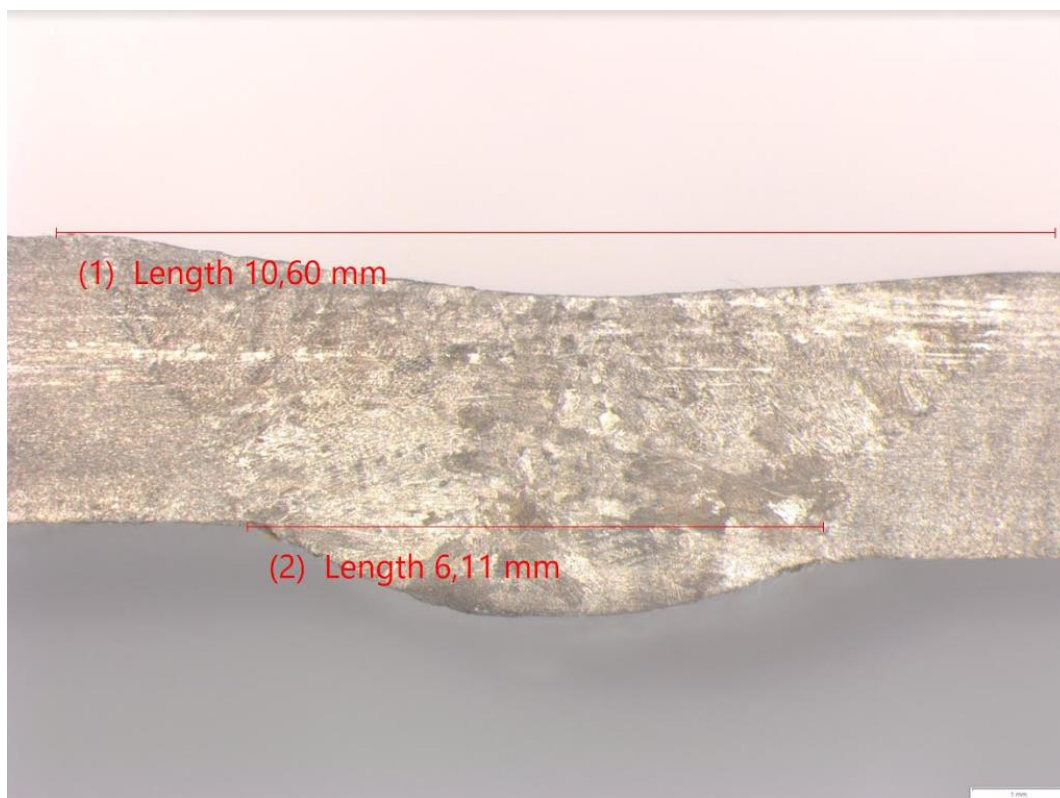


*Slika 6.9.6. Prva strana uzorka broj 3*

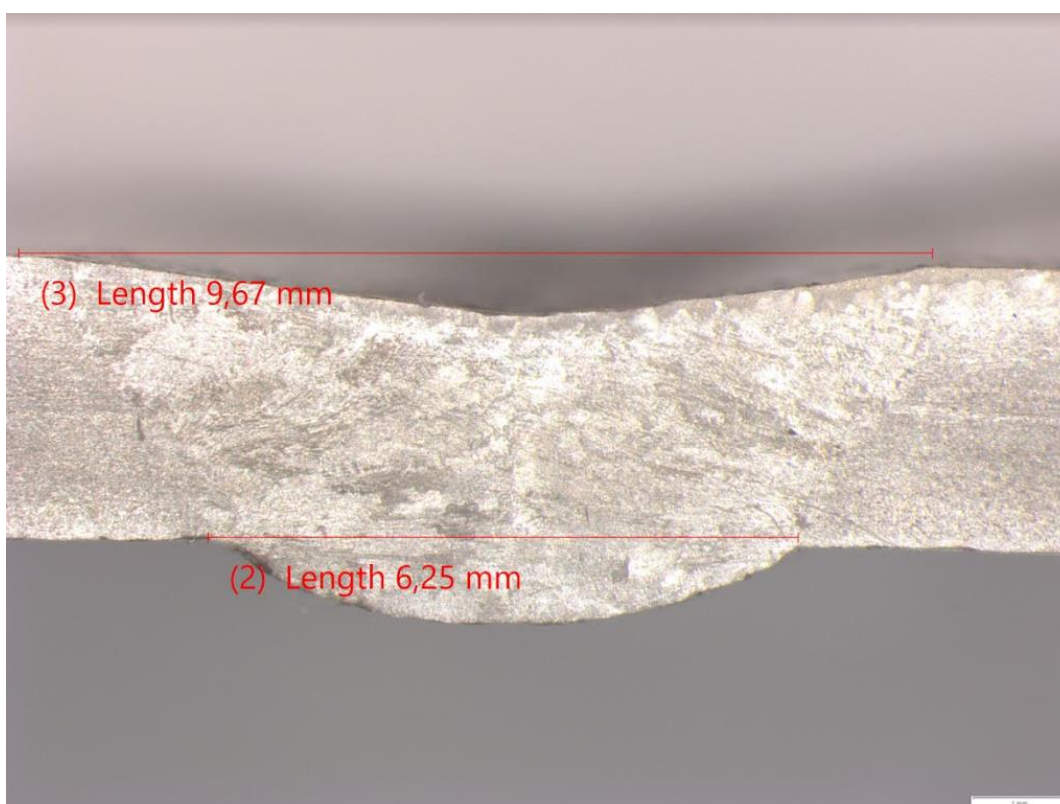


*Slika 6.9.7. Druga strana uzorka broj 3*

#### 4. UZORAK



*Slika 6.9.8. Prva strana uzorka broj 4*



*Slika 6.9.9. Druga strana uzorka broj 4*

U tablici 6.9.1. dan je pregled geometrijskih značajki zavara koje su se dobile makroanalizom.

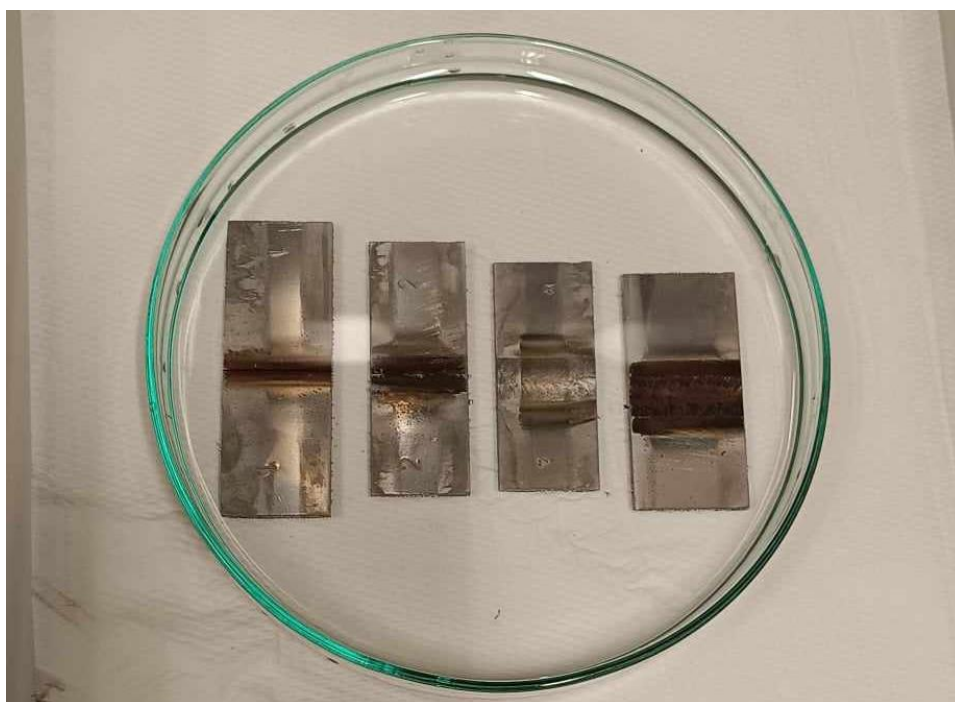
Tablica 6.9.1. Pregled geometrijskih značajki zavara

| Broj uzorka |              | Širina lica,<br>mm | Širina korijena,<br>mm | Penetracija, mm | Ulegnuće |
|-------------|--------------|--------------------|------------------------|-----------------|----------|
| 1.          | Prva strana  | 6,45               | -                      | 1,35            | -        |
|             | Druga strana | 6,35               | -                      | 1,20            | -        |
| 2.          | Prva strana  | 8,51               | 2,55                   | Potpuna         | -        |
|             | Druga strana | 8,08               | 2,35                   | Potpuna         | -        |
| 3.          | Prva strana  | 11,50              | 9,67                   | Potpuna         | +        |
|             | Druga strana | 10,90              | 9,55                   | Potpuna         | +        |
| 4.          | Prva strana  | 10,60              | 6,11                   | Potpuna         | +        |
|             | Druga strana | 9,67               | 6,25                   | Potpuna         | +        |

Kod sva četiri uzoraka nije vidljiva nikakva nehomogenost po poprečnom presjeku. Kod uzorka broj 1 vidljiva je nedovoljna penetracija te da nije došlo do provarivanja korijenja, što je vidljivo na slikama 6.9.2 i 6.9.3. Kod uzoraka broj 3 i 4 je došlo do ulegnuća što može biti razlog nekorištenje dodatnog materijala.

## 6.10. Ispitivanje na koroziju

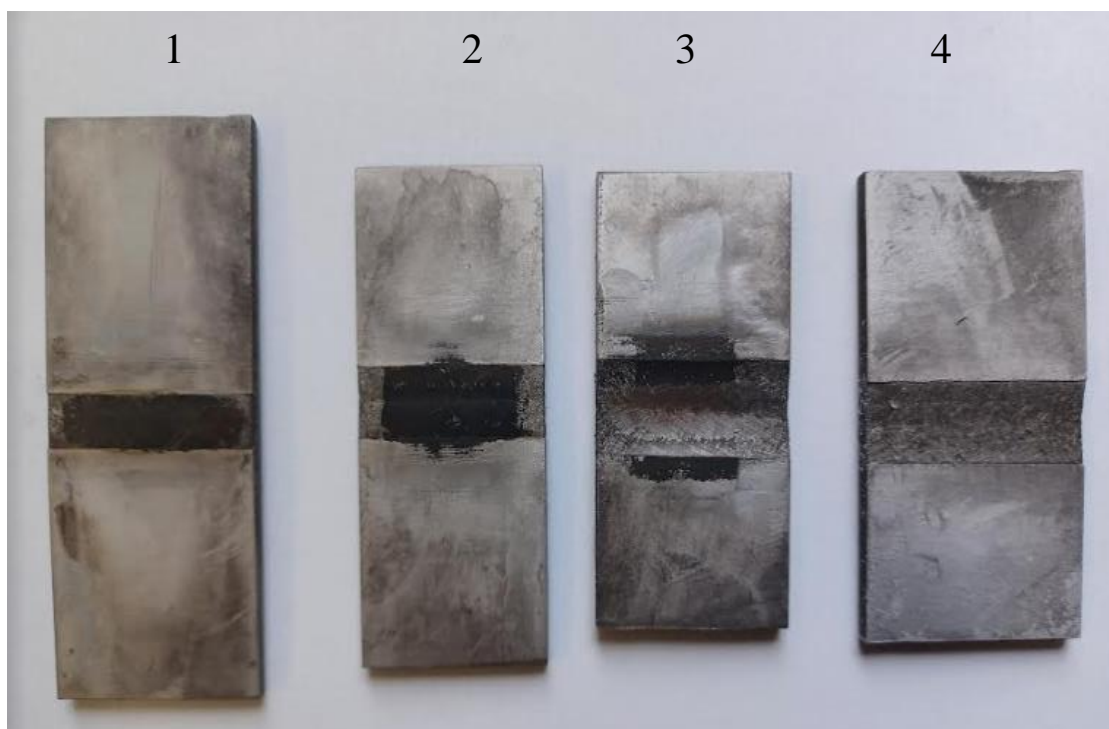
Korozijsko ispitivanje uzoraka se provodilo na način da su se usporedili uzorci prije i poslije izlaganja 19%- tnoj klorovodičnoj kiselini. Uzorci su bili izloženi 96 sati na sobnoj temperaturi.



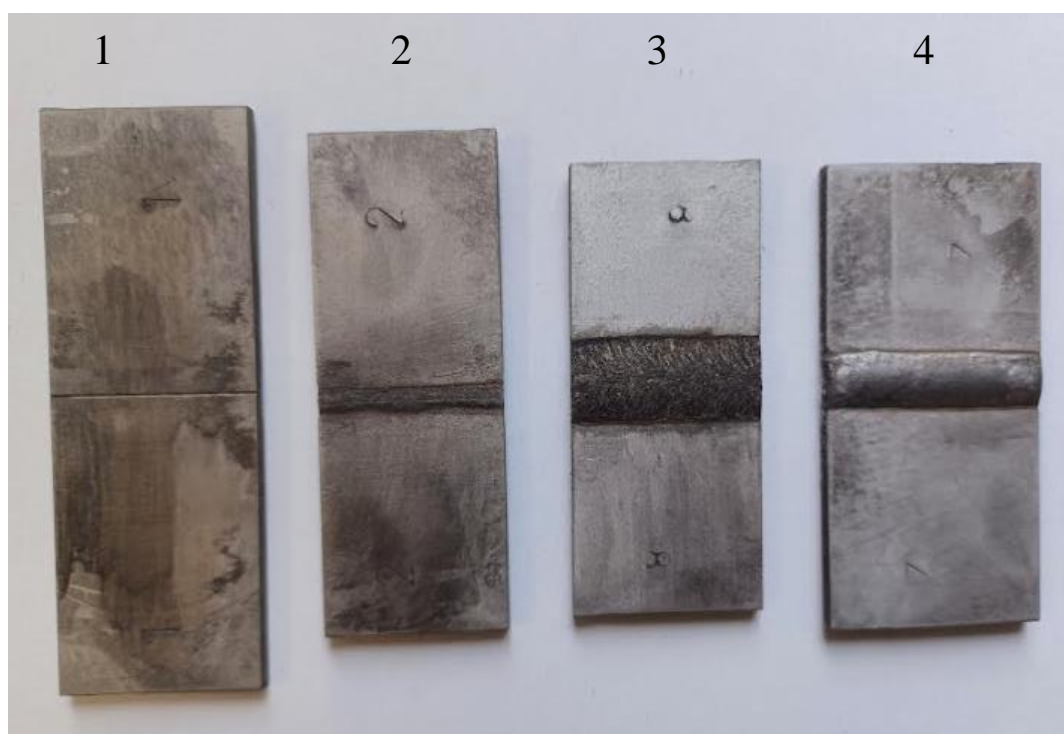
Slika 6.10.1. Uzorci u klorovodičnoj kiselini nakon uranjanja

Nakon 96 sati uzorci su izvađeni, oprani u vodi i osušeni. Klorovodična kiselina je nakon 96 sati poprimila zelenu boju, što ukazuje na uspješnu reakciju. Uzorci su nakon 96 sati nagriženi, s time da je uklonjen oksidni sloj.

Na slikama 6.10.2 te 6.10.3 su prikazani uzorci nakon 96 sati u kiselini.



*Slika 6.10.2. Uzorci u klorovodičnoj kiselini nakon 96 sati-lice zavara*



*Slika 6.10.3. Uzorci u klorovodičnoj kiselini nakon 96 sati-korijen zavara*

Kiselina je nagrizla uzorke, a pošto su oni bili potpuno uronjeni u kiselinu bez pristupa kisiku, nije došlo do klasične boje korodiranog, oksidiranog, čelika. Klasična boja oksidiranog čelika će nastati kad uzorci ostanu neko vrijeme na zraku. Također, površina uzorka je matirana i izgubila sjaj koji je imala prije korozijskog ispitivanja.

## 7. Zaključak

TIG postupak zavarivanja je najčešći ručni postupak zavarivanja, a sama kvaliteta zavara uveliko ovisi o vještinama zavarivača. Zbog tog razloga, sve se više uvodi poluautomatizacija ili potpuna automatizacija postupka.

Najčešći zaštitni plinovi koji se koriste kod TIG zavarivanja su plemeniti plinovi argona (Ar) i helija (He). Iako se u izvornom obliku TIG zavarivanja se koristio helij, danas je argon taj koji dominira u primjeni. Također se kod TIG zavarivanja koriste i mješavine plinova u različitim omjerima, kako bi se kombinirala povoljna svojstva plinova.

Nehrđajući čelici imaju široku primjenu zbog korozijske postojanosti. Nehrđajući čelici svoju korozijsku postojanost pripisuju stvaranju pasivnog sloja oksida na samoj površini metala. Kako bi se postigla željena korozijska postojanost zavarenog spoja potrebno je tijekom cijelog procesa zavarivanja uvažiti zahtjeve materijala te prilagoditi parametre zavarivanja. Iako se radi o korozijski postojanim čelicima, mogućnost pojave korozijskih oštećenja nije isključeno. Kod nehrđajućih čelika najčešća su četiri oblika korozije, a to su rupičasta (pitting), korozija u procjepu, interkristalna te napetosna korozija.

U eksperimentalnom dijelu diplomskog rada provedeno je zavarivanje pločica iz nehrđajućeg čelika AISI 304 uz primjenu različite brzine zavarivanja. Nakon zavarivanja, provedena je makroanaliza te ispitivanje na koroziju.

Cilj eksperimentalnog dijela bio je odrediti utjecaj brzine zavarivanja na izgled i geometriju zavara, usporediti duljine lica zavara i korijena zavara između uzoraka te napraviti ispitivanje na koroziju. U eksperimentalnom dijelu rada pomoću automata za pravocrtno zavarivanje, provedeno je TIG zavarivanje četiri uzoraka. Kod zavarivanja mijenjana je brzina zavarivanja, dok su ostali parametri ostali isti. Nakon provedenog eksperimenta može se zaključiti da je bolja penetracija i kvaliteta zavara kod manje brzine zavarivanja. Razlog tome je što je povećanjem brzine zavarivanja, manji unos topline po jedinici dužine. Tako uzorak broj jedan, gdje je najveća brzina zavarivanja, nije potpuno protaljen. Što se tiče ispitivanja na koroziju, došlo je do matiranja površine uzorka, ali nije došlo do klasične boje korodiranog, oksidiranog, čelika jer su uzorci bili potpuno prekriveni klorovodičnom kiselinom bez pristupa kisiku.



## 8. Literatura

- [1] T. Kostadin: Čelici i željezni ljevovi, Karlovac, 2017.
- [2] M. Horvat: Zavarivanje i srodni postupci, nastavni materijal, Sveučilište Sjever, Varaždin, 2020.
- [3] M. Horvat, V. Kondić, D. Brezovečki: Teorijske i praktične osnove TIG postupka zavarivanja, Stručni članak, Technical journal 8, 2014.
- [4] S. Kralj, Š. Andrić: Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka, Sveučilište u Zagrebu, fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1992
- [5] <https://patents.google.com/patent/US2274631?q=227> , dostupno 10.7.2024.
- [6] L. Čolić: Robotizirano zavarivanje nehrđajućih čelika A – TIG postupkom, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015
- [7] <https://gavricmontaza.hr/2024/01/07/koji-se-plinovi-koriste-u-zavarivanju-i-kako-odabrati-pravi-plin/> , dostupno 10.7.2024.
- [8] M. Živčić: TIG zavarivanje – osnovne karakteristike postupka, Zavarivanje, 1985.
- [9] Priručnik za zavarivanje, Elektroda Zagreb, Zagreb 1987.
- [10] M. Gojić: Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Metalurški fakultet, Sisak, 2003.
- [11] M. Milotić: Priručnik za zavarivače 2, Saobraćajni fakultet, Doboj, 2008
- [12] <https://www.industrysearch.com.au/directory>, dostupno 11.7.2024.
- [13] F. Bionda: Automatizirano TIG zavarivanje cijevi iz nehrđajućih čelika, FSB, Zagreb, 2018.
- [14] S. Kralj, B. Radošević, Z. Kožuh, I. Garašić: Strojevi i oprema za zavarivanje, FSB, 2013.
- [15] <https://www.therobotreport.com/abb-acquiring-ab-rotech-robotic-welding/>, dostupno 11.7.2024.
- [16] I. Juraga, M. Živčić, M. Gracin: Reparturno zavarivanje, vlastita naklada, Zagreb, 1994
- [17] D. Čordaš: Orbitalno zavarivanje nehrđajućih čelika TIG postupkom, Čelici otporni na koroziju (nehrđajući čelici), Pula, 2007.
- [18] Handbook for GTAW – Gas Tungsten Arc Welding, AWS, 1987.
- [19] D. Pongrac: Utjecaj aktivacijskog premaza na mehanička i korozijska svojstva zavarenog spoja, Diplomski rad, FSB, Zagreb, 2015.
- [20] RT3000, „Nehrđajući dodatni materijali - izazov ili klasika“, 23.02.2018.
- [21] M. F. McGuire: Stainless Steels for design engineers, USA, 2008.
- [22] EN 10088-1:2014, Stainless steels - Part 1: List of stainless steels
- [23] D. Herman: Dodatni materijali za zavarivanje nehrđajućih čelika, Završni rad, Sveučilište Sjever, Varaždin, 2022.
- [24] M. Horvat: Zavarljivost čelika, nastavni materijal, Sveučilište Sjever, Varaždin, 2021.
- [25] I. Juraga, V. Šimunović, I. Stojanović: Zavarivanje Cr-Ni čelika, korozijska postojanost, rukovanje“, Pula, 2007
- [26] T. Filetin, F. Kovačićek, J. Indorf: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2013.
- [27] I. Juraga,.: Zavarivanje čelika otpornih na koroziju, Časopis Zavarivanje, siječanj 1994.
- [28] S. Kožuh: Specijalni čelici, skripta, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Sisak, 2010.
- [29] <https://www.scribd.com/document/372705781/Steel-Metallurgy> , dostupno 20.7.2024.
- [30] M. Horvat: Korozija i zaštita, nastavni materijal, Sveučilište Sjever, Varaždin, 2019.
- [31] D. Kreković: Korozijska otpornost zavarenih spojeva dupleks čelika, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
- [32] M. G. Fontana: Corrosion Engineering (third edition), McGraw Hill 1987.

- [33] <https://www.slideserve.com/nhung/korozija-2> , dostupno 25.7.2024.
- [34] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Nehr%C4%91aju%C4%87i\\_%C4%8Delik#/media/Datoteka:Intergranular\\_corrosion.JPG](https://hr.wikipedia.org/wiki/Nehr%C4%91aju%C4%87i_%C4%8Delik#/media/Datoteka:Intergranular_corrosion.JPG) , dostupno 28.7.2024.
- [35] M. Horvat, I. Samardžić, V. Kondić: Napetosa korozija, 1 Veleučilište u Varaždinu, Varaždin, 2009.
- [36] <https://proinstal.hr/nehrdajuci-celik-aisi-304-nehrdajuci-celik-18-8-cinjenice-koje-trebate-znati/> , dostupno 15.9.2024.
- [37] [https://servus.hr/wp-content/uploads/2017/10/Vartig\\_1705-2005.pdf](https://servus.hr/wp-content/uploads/2017/10/Vartig_1705-2005.pdf), dostupno 16.9.2024.
- [38] [https://www.promotech.eu/en/wp-content/uploads/Rail-Bull\\_Track-Welding-Tractor-with-Oscillator\\_21.02.pdf](https://www.promotech.eu/en/wp-content/uploads/Rail-Bull_Track-Welding-Tractor-with-Oscillator_21.02.pdf) , dostupno 15.9.2024.

## Popis slika

|   |    |
|---|----|
| Slika 2.1.1. Patent Russella Mereditha [5] .....  | 3  |
| Slika 2.2.1 Ručno TIG zavarivanje [7] .....   | 4  |
| Slika 2.3.1 Shematski prikaz standardne opreme za TIG zavarivanje [4] .....                       | 5  |
| Slika 2.3.2 Shematski prikaz procesa TIG zavarivanja [4] .....                                    | 5  |
| Slika 2.3.3 Položaj elektrode i dodatnog materijala u odnosu na radni komad [8] .....             | 6  |
| Slika 2.3.4 Izvođenje sučeonog i preklopnog spoja [3] .....                                       | 7  |
| Slika 2.3.5 Izvođenje kutnog i rubnog spoja [3] .....   | 7  |
| Slika 2.5.1.1 Shematski prikaz ručnog TIG zavarivanja [11] .....                                  | 9  |
| Slika 2.5.2.1. Pištolj za poluautomatizirano TIG zavarivanje [12] .....                           | 9  |
| Slika 2.6.1.1 Tri slučaja primjene određene vrste struje kod zavarivanja [2] .....                | 12 |
| Slika 2.6.4.1 Utjecaj vrste plina na penetraciju i oblik zavara [17] .....                        | 13 |
| Slika 4.1 Proces pasivizacije [23] .....  | 19 |
| Slika 4.1.1 Područja osnovnih vrsta nehrđajućih čelika ovisno o sadržaju kroma i nikla [24] ..... | 20 |
| Slika 4.1.2 Mikrostruktura pojedine grupe nehrđajućih čelika [25] .....                           | 20 |
| Slika 4.1.1.1 Primjer upotrebe feritnog nehrđajućeg čelika .....                                  | 21 |
| Slika 4.1.2.1 Primjer upotrebe martenzitnog nehrđajućeg čelika .....                              | 22 |
| Slika 5.1.1.1 Primjer oštećenja nastalog zbog rupičaste korozije [30] .....                       | 26 |
| Slika 5.1.1.2 Mogući pojavni oblici rupica nastali korozijskim procesom [32] .....                | 26 |
| Slika 5.1.1.3 Rupičasta korozija- zone toplinskih nijansi i korozijska oštećenja [30] .....       | 27 |
| Slika 5.1.2.1 Mehanizam korozije u procjepu [33] .....  | 28 |
| Slika 5.1.2.2 Primjer oštećenja uzrokovana korozijom u procjepu [30] .....                        | 28 |
| Slika 5.1.3.1 Shematski prikaz mehanizma interkristalne korozije Cr-Ni čelika [30] .....          | 29 |
| Slika 5.1.3.2 Primjer oštećenja uzrokovana interkristalnom korozijom [34] .....                   | 30 |
| Slika 5.1.4.1 Načini širenja pukotina kod napetosne korozije [35] .....                           | 30 |
| Slika 6.2.1. Pločica AISI 304 dimenzija 200 mm × 80 mm × 3 mm .....                               | 33 |
| Slika 6.3.1. Argon 4.8 .....  | 33 |
| Slika 6.3.2. Gorionik .....   | 34 |
| Slika 6.3.3. Sapnica i držač elektrode .....  | 34 |
| Slika 6.3.4. Sapnica .....  | 35 |
| Slika 6.3.5. WLa15 elektroda .....  | 35 |
| Slika 6.4.1. Kontrolna ploča sa funkcijama .....  | 37 |
| Slika 6.5.1. Dijelovi Rail Bull automata [38] .....   | 38 |
| Slika 6.5.2. Rail Bull automat .....  | 38 |

|   |    |
|---|----|
| Slika 6.6.1. Pozicioniran uzorak prije zavarivanja .....                        | 39 |
| Slika 6.7.1. Lice zavara prvog uzorka .....                                     | 40 |
| Slika 6.7.2. Lice zavara drugog uzorka .....                                    | 40 |
| Slika 6.7.3. Lice zavara trećeg uzorka.....                                     | 41 |
| Slika 6.7.4. Lice zavara četvrtog uzorka .....                                  | 41 |
| Slika 6.8.2. Presi Minitex 250 SP1 .....  | 42 |
| Slika 6.8.3. Brusni papiri različite granulacije .....                          | 43 |
| Slika 6.8.4. Uzorci nakon brušenja.....   | 43 |
| Slika 6.8.5. Elektrokemijsko nagrizanje uzoraka .....                           | 44 |
| Slika 6.9.1. Olympus SZX10.....   | 45 |
| Slika 6.9.2. Prva strana uzorka broj 1 .....                                    | 46 |
| Slika 6.9.3. Druga strana uzorka broj 1 .....                                   | 46 |
| Slika 6.9.4. Prva strana uzorka broj 2.....                                     | 47 |
| Slika 6.9.5. Druga strana uzorka broj 2 .....                                   | 47 |
| Slika 6.9.6. Prva strana uzorka broj 3 .....                                    | 48 |
| Slika 6.9.7. Druga strana uzorka broj 3 .....                                   | 48 |
| Slika 6.9.8. Prva strana uzorka broj 4.....                                     | 49 |
| Slika 6.9.9. Druga strana uzorka broj 4 .....                                   | 49 |
| Slika 6.10.1. Uzorci u klorovodičnoj kiselini nakon uranjanja .....             | 50 |
| Slika 6.10.2. Uzorci u klorovodičnoj kiselini nakon 96 sati-lice zavara .....   | 51 |
| Slika 6.10.3. Uzorci u klorovodičnoj kiselini nakon 96 sati-korijen zavara..... | 51 |

## Popis tablica

|  |    |
|--|----|
| Tablica 2.6.1. Orijentacijski podaci za TIG zavarivanje nehrđajućih čelika [16] .....      | 11 |
| Tablica 2.6.4.1.1. Preporučeni parametri zavarivanja argonom [2] .....                     | 14 |
| Tablica 3.1. Usporedba Ar, He i mješavine plinova [3] .....                                | 16 |
| Tablica 3.2. Standardni zaštitni plinovi i njihova primjena kod TIG zavarivanja [19] ..... | 17 |
| Tablica 6.2.1. Mehanička svojstva čelika AISI 304 [36] .....                               | 32 |
| Tablica 6.2.2. Kemijska svojstva AISI 304 [36] .....                                       | 32 |
| Tablica 6.4.1. Tehnički podaci za VARTIG 2005 AC/DC uređaj [37] .....                      | 36 |
| Tablica 6.6.1. Parametri zavarivanja .....   | 39 |
| Tablica 6.9.1. Pregled geometrijskih značajki zavara .....                                 | 50 |