

# A-TIG zavarivanje nehrđajućih čelika

---

**Vuković, Sara**

**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:122:067919>

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

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

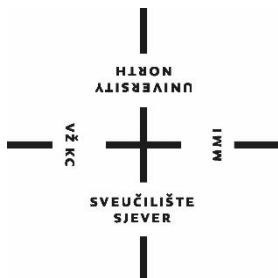


*Repository / Repozitorij:*

[University North Digital Repository](#)



**SVEUČILIŠTE SJEVER**  
**SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN**



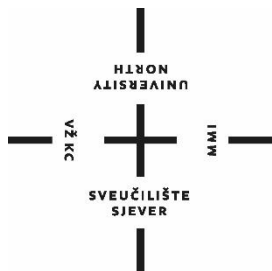
DIPLOMSKI RAD br. 125/STR/2024

**A - TIG ZAVARIVANJE NEHRĐAJUĆIH  
ČELIKA**

Sara Vuković

Varaždin, rujan 2024.

**SVEUČILIŠTE SJEVER**  
**SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN**  
**Studij strojarstva**



DIPLOMSKI RAD br. 125/STR/2024

**A - TIG ZAVARIVANJE NEHRĐAJUĆIH  
ČELIKA**

Student:

Sara Vuković , 0135245407

Mentor:

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

Varaždin, rujan 2024.

# Prijava diplomskog rada

## Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za strojarstvo

STUDIJ diplomski sveučilišni studij Strojarstvo

PRISTUPNIK Sara Vuković

MATIČNI BROJ 0135245407

DATUM 26.9.2024.

KOLEGIJ Suvremene proizvodne tehnologije

NASLOV RADA A-TIG zavarivanje nehrđajućih čelika

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU A-TIG welding of stainless steels

MENTOR dr.sc. Matija Bušić

ZVANJE docent

ČLANOVI POVJERENSTVA

- doc. dr. sc. Tomislav Veliki, predsjednik povjerenstva
- doc.dr.sc. Matija Bušić, mentor, član povjerenstva
- doc.dr.sc. Boris Jalušić, član povjerenstva
- doc.dr.sc. Zlatko Botak, zamjenski član povjerenstva
- 

## Zadatak diplomskog rada

BROJ 125/STR/2024

OPIS

U uvodnom dijelu diplomskog rada na osnovi literaturnih podataka potrebno je dati pregled svojstava, podjele i primjene nehrđajućih čelika. Obraditi označavanje nehrđajućih čelika prema važećim normama. Potrebno je proučiti i opisati specifičnosti pri zavarivanju nehrđajućih čelika različitim tehnologijama zavarivanja. Posebno detaljno proučiti ručno i automatizirano TIG zavarivanje te također izvedenicu A-TIG zavarivanje. Pojasniti određivanje sastava aktivacijskog premaza za A-TIG zavarivanje.

U eksperimentalnom dijelu rada na odgovarajućim uzorcima provesti A-TIG zavarivanje uz promjenu sastava aktivacijskog premaza prema pripremljenom planu eksperimenta. Na zavarenim uzorcima potrebno je provesti vizualno ispitivanje zavarenih spojeva i odrediti prihvatljivost geometrije zavarenog spoja. Provesti ispitivanje mehaničkih svojstava na uzorcima pripremljenim iz izvedenih zavarenih spojeva. Na temelju rezultata donijeti zaključke o utjecaju pojedinih parametara na penetraciju pri zavarivanju i čvrstoću zavarenog spoja. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

ZADATAK URUČEN

26. 09. 2024

POTPIS MENTORA

M. Bušić





### 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, SARA KUČOVIĆ (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog/specijalističkog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom A-TIG ZAVRŠNAJE METROLOŠKIH ČVILKA (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:  
(upisati ime i prezime)

Sara Kučović

(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.

## **Sažetak**

U ovom diplomskom radu obrađena je tema A-TIG zavarivanja nehrđajućih čelika uz pregled svojstava, podjele i primjene nehrđajućih čelika. Cilj rada je utvrditi kako primjena aktivacijskog premaza utječe na produktivnost TIG postupka zavarivanja nehrđajućih čelika. U teorijskom dijelu rada opisane su glavne vrste nehrđajućih čelika te njihove karakteristike. Kroz dva poglavlja detaljnije je opisana konvencionalna TIG i A-TIG tehnologija zavarivanja kao i njihovi parametri, način izvedbe i potrebna oprema.

U eksperimentalnom dijelu, u laboratoriju Sveučilišta Sjever, proveo se postupak zavarivanja na uzorcima nehrđajućih čelika s oba TIG postupka. Nakon provedenog zavarivanja radilo se ispitivanje svojstava uzoraka te se nakon analize dobivenih rezultata došlo do zaključka da A-TIG postupak omogućava dublju penetraciju ako je pravilno izveden.

**Ključne riječi:** TIG, A - TIG, zavarivanje nehrđajućih čelika, aktivacijski premaz

## **Summary**

In this thesis, the topic of A-TIG welding of stainless steels is covered, along with an overview of the properties, classification, and applications of stainless steels. The aim of the study is to determine how the application of an activation coating affects the productivity of the TIG welding process for stainless steels. The theoretical part describes the main types of stainless steels and their characteristics. Over two chapters, conventional TIG and A-TIG welding technologies are explained in more detail, including their parameters, execution methods, and required equipment.

In the experimental part, conducted in the laboratory of the University North, the welding process was carried out on stainless steel samples using both TIG methods. After welding, the properties of the samples were tested, and the analysis of the results led to the conclusion that the A-TIG process allows deeper penetration if performed correctly.

**Key words:** TIG, A – TIG, stainless steel welding, activation coating

## **POPIS KORIŠTENIH KRATICA**

<b>HRN</b>	Hrvatski registar normi
<b>DIN</b>	Njemački institut za normizaciju
<b>AISI</b>	American Iron and Steel Institute (Američki institut za željezo i čelik)
<b>PH</b>	Precipitation Hardening (precipitacijsko očvršćivanje)
<b>ZUT</b>	Zona utjecaja toplina
<b>TIG</b>	Tungsten inert gas (elektrolučno zavarivanje volframovom elektrodom u inertnoj atmosferi zaštitnog plina)
<b>A - TIG</b>	Activated Tungsten Inert Gas (TIG postupak zavarivanja aktivirajućim premazom)
<b>WIG</b>	Wolfram Inert Gas
<b>GTAW</b>	Gas Tungsten Arc Welding
<b>AC/DC</b>	Alternating Current (izmjenična struja)/Direct Current (istosmjerna struja)
<b>DCEN</b>	Direct Current Electrode Negative
<b>DCEP</b>	Direct Current Electrode Positive
<b>TKPN</b>	Toplinski koeficijent površinske napetosti taline
<b>FB - TIG</b>	Flux – Bonded TIG



# Sadržaj

1.	<b>UVOD</b> .....	1
2.	<b>NEHRĐAJUĆI ČELICI</b> .....	2
2.1.	Vrste nehrđajućih čelika .....	2
2.1.1.	Feritni nehrđajući čelici.....	3
2.1.2.	Austenitni nehrđajući čelici.....	3
2.1.3.	Martenzitni nehrđajući čelici.....	4
2.1.4.	Duplex nehrđajući čelici.....	5
2.1.5.	Precipitacijski očvrnuti čelici.....	6
2.2.	Proces proizvodnje nehrđajućih čelika .....	7
2.3.	Zavarljivost nehrđajućih čelika.....	8
2.3.1.	Zavarljivost austenitnih nehrđajućih čelika.....	9
2.3.2.	Zavarljivost feritnih nehrđajućih čelika.....	10
2.3.3.	Zavarljivost dupleks nehrđajućih čelika.....	10
2.3.4.	Zavarljivost martenzitnih nehrđajućih čelika .....	11
2.4.	Označavanje nehrđajućih čelika prema europskoj normi .....	11
3.	<b>TIG POSTUPAK ZAVARIVANJA</b> .....	14
3.1.	Osnovni princip TIG postupka zavarivanja .....	15
3.2.	Izvor struje .....	18
3.3.	Zaštitni plinovi.....	19
3.4.	Netaljive elektrode.....	21
3.5.	Prednosti i nedostaci TIG postupka zavarivanja.....	24
4.	<b>A-TIG POSTUPAK ZAVARIVANJA</b> .....	26
4.1.	Vrste aktivacijskih premaza .....	27
4.2.	Princip zavarivanja A-TIG postupkom .....	28
4.3.	Mehanizmi utjecaja aktivacijskog premaza na zavar.....	29
4.4.	Prednosti i primjena A-TIG zavarivanja.....	31
5.	<b>ESPERIMENTALNI DIO</b> .....	33
5.1.	Opis zadatka .....	33
5.2.	Osnovni materijal u eksperimentu .....	33
5.3.	Korištena oprema u eksperimentu .....	34
5.3.1.	Izvor struje .....	34
5.3.2.	Zaštitni plin .....	35
5.3.3.	Pištalj za zavarivanje .....	36

5.3.4.	Elektroda i sapnica.....	37
5.3.5.	Aktivacijski premaz .....	38
5.3.6.	Automatsko vođenje pištolja za zavarivanje.....	38
5.4.	Parametri zavarivanja .....	39
5.5.	Rezultati zavarivanja .....	40
6.	<b>ANALIZA REZULTATA</b> .....	43
6.1.	Priprema uzoraka za makroanalizu.....	43
6.2.	Brušenje uzoraka za makroanalizu .....	44
6.3.	Elektrokemijsko nagrizanje uzoraka za makroanalizu .....	45
6.4.	Makroanaliza .....	46
7.	<b>ZAKLJUČAK</b> .....	55
8.	<b>LITERATURA</b> .....	57
	POPIS SLIKA .....	60
	POPIS TABLICA.....	62

# 1. UVOD

Nehrđajući čelici predstavljaju jednu od najvažnijih skupina materijala u modernoj industriji zbog svoje otpornosti na koroziju, dugovječnosti i otpornosti na visoke temperature. Upravo zbog navedenih karakteristika nehrđajući čelici idealni su za primjenu u različitim sektorima, kao što su prehrambena, kemijska, farmaceutska, naftna industrija, energetika, građevinarstvo itd. Međutim, iako su nehrđajući čelici izuzetno otporni na koroziju, zavarivanje ovih materijala uključuje neke izazove. Tijekom zavarivanja dolazi do promjene mikrostrukture čelika, što može utjecati na otpornost na koroziju, mehanička svojstva i cjelokupnu kvalitetu zavarenog spoja. Zbog toga je bitna primjena pravih tehnika zavarivanja kako bi se osigurala visoka kvaliteta zavarenih spojeva, a upravo je TIG zavarivanje jedno od najpopularnijih tehnika zbog svoje preciznosti i kontrole nad procesom. TIG zavarivanje omogućava postizanje vrlo čistih zavara bez unosa nečistoća u spoj, što je posebno važno kod zavarivanja nehrđajućih čelika. Ipak, unatoč brojnim prednostima, ovaj postupak može biti spor i zahtjeva visoku razinu vještine zavarivača. Kako bi se poboljšala produktivnost i kvaliteta zavara, razvijen je napredni oblik ove metode A-TIG zavarivanje. A-TIG postupak koristi aktivacijske premaze na površini zavara, koji omogućavaju dublju penetraciju i brži proces zavarivanja.

Cilj ovog diplomskog rada je istražiti kako aktivacijski premaz kod A-TIG zavarivanja utječe na produktivnost TIG postupka zavarivanja nehrđajućih čelika. Eksperimentalni dio rada fokusirat će se na usporedbu konvencionalnog TIG i A-TIG zavarivanja u pogledu dubine penetracije, mehaničkih svojstava i ukupne kvalitete zavara. Teorijski dio rada obuhvatit će pregled glavnih vrsta nehrđajućih čelika, njihovih svojstava i podjele, te osnovne principe TIG i A-TIG zavarivanja, uključujući ključne parametre poput struje, napona, brzine zavarivanja i vrste plinova koji se koriste. Također će se analizirati potrebna oprema i načini izvedbe ovih postupaka.

Eksperimentalni dio rada provest će se u laboratoriju Sveučilišta Sjever, gdje će se na uzorcima nehrđajućeg čelika provesti proces zavarivanja koristeći obje tehnologije, TIG i A-TIG. Nakon toga, uzorci će se podvrgnuti makroanalizi u kojoj će se mjeriti geometrija zavarenih spojeva. Rezultati će biti analizirani kako bi se utvrdilo na koji način primjena aktivacijskog premaza i korištenje A-TIG tehnologije utječu na kvalitetu zavara u usporedbi s konvencionalnim TIG postupkom. Očekuje se da će rezultati istraživanja pokazati kako A-TIG tehnologija omogućava dublju penetraciju i bolja mehanička svojstva zavarenih spojeva, što bi moglo dovesti do poboljšanja produktivnosti i učinkovitosti zavarivanja u industrijskoj primjeni.

## 2. NEHRĐAJUĆI ČELICI

Zbog svoje izvrsne otpornosti na koroziju, visoke čvrstoće i atraktivnog izgleda upravo su nehrđajući čelici jedna od najvažnijih skupina konstrukcijskih čelika. Otkriveni su 1913. godine, kada je Harry Brearley pokušao riješiti problem erozije u cijevima oružja u Prvom svjetskom ratu. Nakon toga dogodila su se velika poboljšanja i danas je nehrđajući čelik jedna od najraširenijih legura u svijetu. Da bi čelik bio nehrđajući potrebno je da legura čelika ispuni dva uvjeta:

- minimalno 12 % kroma,
- homogena monofazna feritna, austenitna ili martenzitna mikrostruktura.

Monofazna mikrostruktura pridonosi izbjegavanju opasnosti od nastanka područja koja imaju različiti elektropotencijal od potencijala osnovne mase. Osim kromom, postojanost (pasivnost) im se može povećati dodavanjem nikla, molibdena, titanija, niobija i ugljika. Nabrojani elementi daju pasivan oksidni sloj koji pomaže odupiranju stvaranja korozije. Povećanjem udjela kroma, molibdena, nikla, ugljika i titanija povećava se i njihova otpornost na koroziju. Osim otpornosti na koroziju, ovi udjeli elemenata također utječu i na ostala svojstva nehrđajućih čelika kao što su tvrdoća, talište, modul elastičnosti itd. [1, 2].

### 2.1. Vrste nehrđajućih čelika

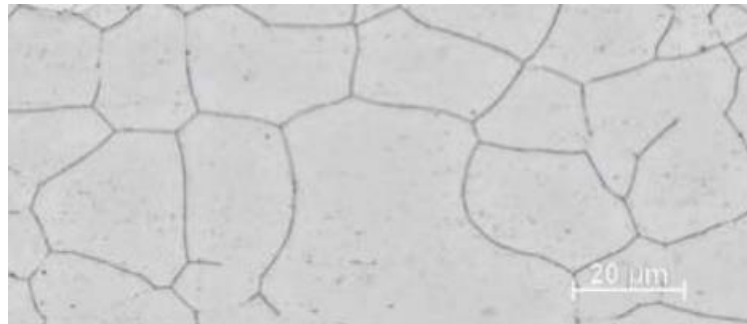
Nehrđajući čelici se zbog svojih raznolikih svojstava mogu koristiti u različitim primjenama. Za razliku od ostalih materijala, gdje je klasifikacija napravljena na temelju njihovog sastava, kod nehrđajućih čelika klasifikacija se radi na temelju metalurgijske faze koja prevladava. Tri moguće faze u nehrđajućim čelicima su austenit, ferit i martenzit. Stoga, nehrđajuće čelike možemo podijeliti u 5 osnovnih razreda [2]:

1. Feritni nehrđajući čelici
2. Austenitni nehrđajući čelici
3. Martenzitni nehrđajući čelici
4. Duplex nehrđajući čelici
5. Precipitacijski očvrnuti nehrđajući čelici

Nehrđajući čelici su definirani nacionalnim standardima (HRN, DIN, AISI), a vjerojatno zbog utjecaja brodogradnje u našem se okruženju ustalila upotreba oznaka za nehrđajuće čelike prema američkom standardu AISI [4].

### 2.1.1. Feritni nehrđajući čelici

Feritni nehrđajući čelik sadrži 11 – 27 % kroma i manje od 0,1 % ugljika. Feritni čelici imaju prostorno centriranu kubičnu kristalnu strukturu poznatu kao BCC strukturu. Uz krom sadrže i feritne stabilizatore kao što su niobij i titan. Njihova mikrostruktura prikazana je na slici 1. Feromagnetsko ponašanje pokazuju do temperature koja je poznata kao Curiejeva točka čiji je interval temperature od 650 °C do 750 °C, preko tih temperatura materijali gube svoja trajna magnetska svojstva. Razlog njihove magnetske prirode leži u prostorno centriranoj kubičnoj kristalnoj rešetki. Imaju izvrsnu otpornost na vibracije, dobro su obradivi odvajanjem čestica, neosjetljivi su na napetosnu koroziju te imaju povećana otpornost na jamičastu koroziju koja se dobiva dodavanjem molibdena u sastav. Također su teži za savijanje te su skloni lomu pri niskim temperaturama. Promjene njihovih svojstava mogu se postići povećanjem udjela kroma, smanjenjem udjela ugljika ili legiranjem s molibdenom i niklom. Koriste se kao korozijski postojani pribor za jelo, dijelovi kućanskih aparata, u prehrambenoj i petrokemijskoj industriji itd. [5, 6].

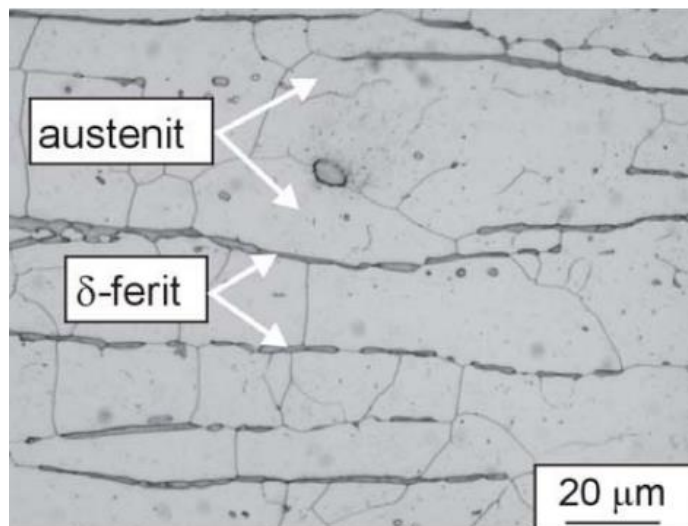


*Slika 1. Mikrostruktura feritnih nehrđajućih čelika [7]*

### 2.1.2. Austenitni nehrđajući čelici

Austenitni nehrđajući čelici su najveća a i najčešće korištena skupina nehrđajućih čelika. Oni uglavnom sadrže 0,02 - 0,15 % ugljika, 16 – 30 % kroma i 2 – 20 % nikla. Mikrostruktura austenitnih nehrđajućih čelika je FCC, odnosno plošno centrirana kubična rešetka, koja se dobiva kada se leguri željeza i kroma doda dovoljna količina austenitizirajućih elemenata kao što su nikal, mangan, dušik i ugljik. U usporedbi s feritnim nehrđajućim čelicima oni mogu zadržati svoju duktilnost na niskim temperaturama i čvrstoću na visokim temperaturama. Unatoč njihovoj superiornosti među nehrđajućim čelicima, austenitni čelici imaju slabiju otpornost na cikličku oksidaciju u usporedbi s feritnim nehrđajućim čelicima. Granica

izdržljivosti austenitnih čelika niža je od feritnih čelika što znači da su skloniji lomu uslijed zamora. Oni su s dodatkom nikla prikladni za niske temperature ili kriogenu primjenu. Mogu se dodati i drugi elementi kao što su silicij, aluminij i niobij kako bi poprimili određena svojstva npr. otpornost na oksidaciju. Sumpor ili selen mogu se dodati određenim vrstama čelika kako bi se poboljšala njihova obradivost. Glavna prednost ove vrste čelika je otpornost na interkristalnu koroziju, dok je glavni nedostatak smanjena granica razvlačenja zbog nižeg sadržaja ugljika. Koriste se u prehrambenoj, kemijskoj, farmaceutskoj, tekstilnoj, industriji celuloze i papira, proizvodnji kućanskih aparata, proizvodnji ugostiteljske opreme, proizvodnji kirurških i medicinskih instrumenata itd. Na slici 2 prikazana je mikrostruktura austenitnih nehrđajućih čelika s mali udjelom  $\delta$ -ferita, koji je nužan kako bi se osigurala otpornost prema pojavi toplih pukotina [8].

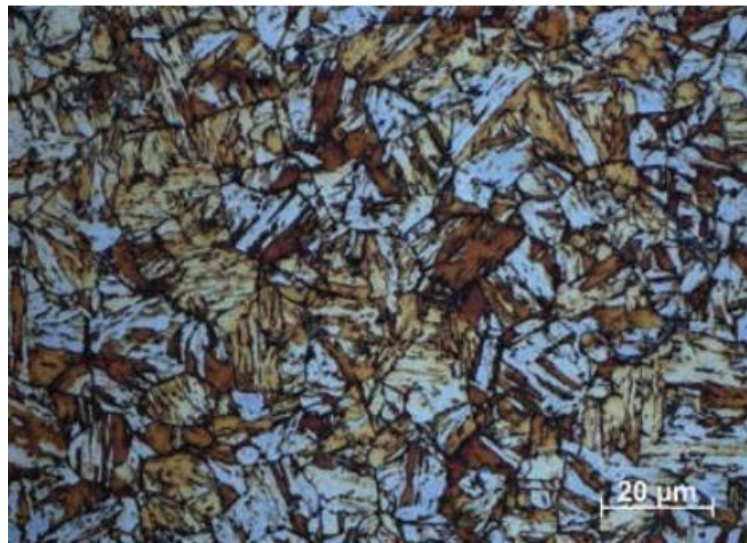


Slika 2. Mikrostruktura austenitnih nehrđajućih čelika [7]

### 2.1.3. Martenzitni nehrđajući čelici

Martenzitni nehrđajući čelici obično sadrže između 11,5 do 18 % kroma, do 1 % ugljika, a drugi elementi, poput nikla, selena, fosfora, vanadija i sumpora dodaju se u različitim postotcima kako bi se postigla neka specifična i željena svojstava. Kod zavarivanja i naknadnog hlađenja prelaze iz austenitne u martenzitnu strukturu koja je prikazana na slici 3, tu strukturu je potrebno popustiti žarenjem na temperaturama od 700 do 750 °C. Martenzitni nehrđajući čelici vrlo su podložni toplinskoj obradi te kaljenjem mogu poboljšati svoja mehanička svojstva poput veće

tvrdooe i vlačne ovrstoee. Kada ih usporedimo s drugim skupinama oni imaju slabiju otpornost na koroziju no izraženiju mehaničku otpornost te se zbog toga koriste kao konstrukcijski i alatni materijali. Dodavanjem sumpora može se poboljšati njihova obradivost. Martenzitni nehrđajući oelik dolazi u različitim oblicima i veličinama i obično se koristi za izradu noževa, alata i medicinske opreme. Martenzitni nehrđajući oelik je također magnetičan što ga oini idealnim za primjene koje zahtijevaju jaka magnetska polja [9].

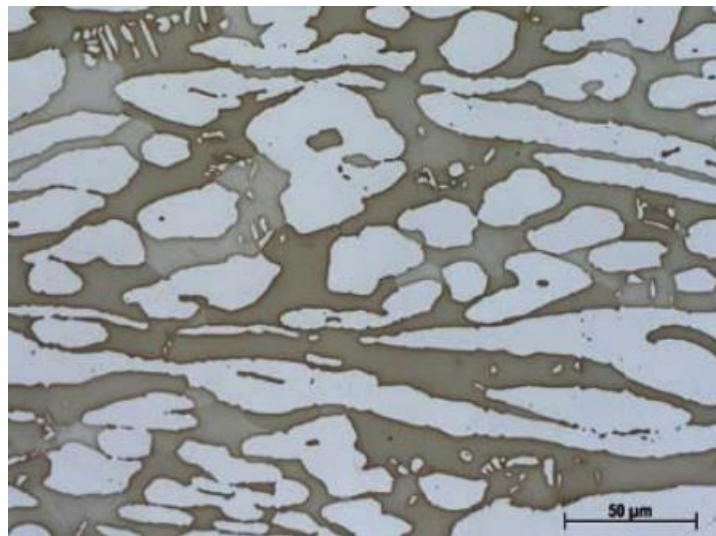


*Slika 3. Mikrostruktura martenzitnih nehrđajućih oelika [7]*

#### **2.1.4. Duplex nehrđajući oelici**

Mikrostruktura dvofaznih nehrđajućih oelika ima kristalografsku strukturu od približno 50 % ferita (BCC struktura) i 50 % austenita (FCC struktura). Obje faze koegzistiraju kao stabilna smjesa, za razliku od dvofaznih legura, kod kojih se jedna od dvije faze manifestira kao talog. Legirajući elementi u duplex nehrđajućim oelicima su ili feritizatori (npr. krom, silicij, molibden) ili austenizatori (npr. ugljik, nikal, dušik), što znaoči da pridonose stvaranju feritne odnosno austenitne faze. Duplex oelici imaju veću otpornost prema napetosnoj koroziji što je nedostatak austenitnih nehrđajućih oelika. Što je veći udio ferita, postojanost prema interkristalnoj koroziji im je veća. Za razliku od austenitnih nehrđajućih oelika, duplex oelici imaju bolju otpornost na rupičastu i opću koroziju. Prilikom toplinske obrade duplex oelika moguća je pojava krtosti samog oelika. Razlog tome je promjena u mikrostrukturi što može značajno smanjiti mehanička svojstva oelika kao što su žilavost i otpornost na lom. Jedan od uzroka pojave krtosti je precipitacija sekundarnih faza. Duplex oelici su osjetljivi na formiranje

intermetalnih faza koje se mogu pojaviti kada se čelik zagrijava na temperaturama između 600 i 1000 °C te precipitacija tih faza može dovesti do povećanja krtosti i smanjenja otpornosti na koroziju. Kako bi se spriječila krtost čelika potrebno je kontrolirati radne uvjete i uvjete toplinske obrade. Najčešći dvofazni nehrđajući čelik je S32205, koji ima izvrsnu otpornost na pucanje uslijed korozije. Koristi se u uvjetima gdje se zahtijeva visoka čvrstoća i visoka otpornost na koroziju. Na slici 4 prikazana je mikrostruktura duplex nehrđajućeg čelika [10].



*Slika 4. Mikrostruktura duplex nehrđajućeg čelika [7]*

### **2.1.5. Precipitacijski očvrnuti čelici**

Cilj razvoja precipitacijski očvrnutih čelika je ostvarivanje visoke granice razvlačenja uz istovremeno zadržavanje visoke korozijske postojanosti. Visoko očvrnuće se uz, što manji udio ugljika i visok stupanj legiranosti, postiže preko precipitacije intermetalnih spojeva. Prema mikrostrukturi prije precipitacije postoje:

1. Martenzitnih PH čelici
2. Poluaustenitni PH čelici
3. Austenitni PH čelici

Martenzitni PH čelici sadrže maleni udio ugljika (0,05 %), visoki udio Cr (14-17 %), dodatak Cu (3 %), Mo, Nb (>0,4 %) i Al. Njihova visoka granica razvlačenja postiže se rastvornim žarenjem pri temperaturi od oko 1500 °C, zatim gašenjem u ulju ili na zraku te umjetnim dozrijevanjem pri 400 - 600 °C. Kod dozrijevanja dolazi do izlučivanja precipitata bakra te se



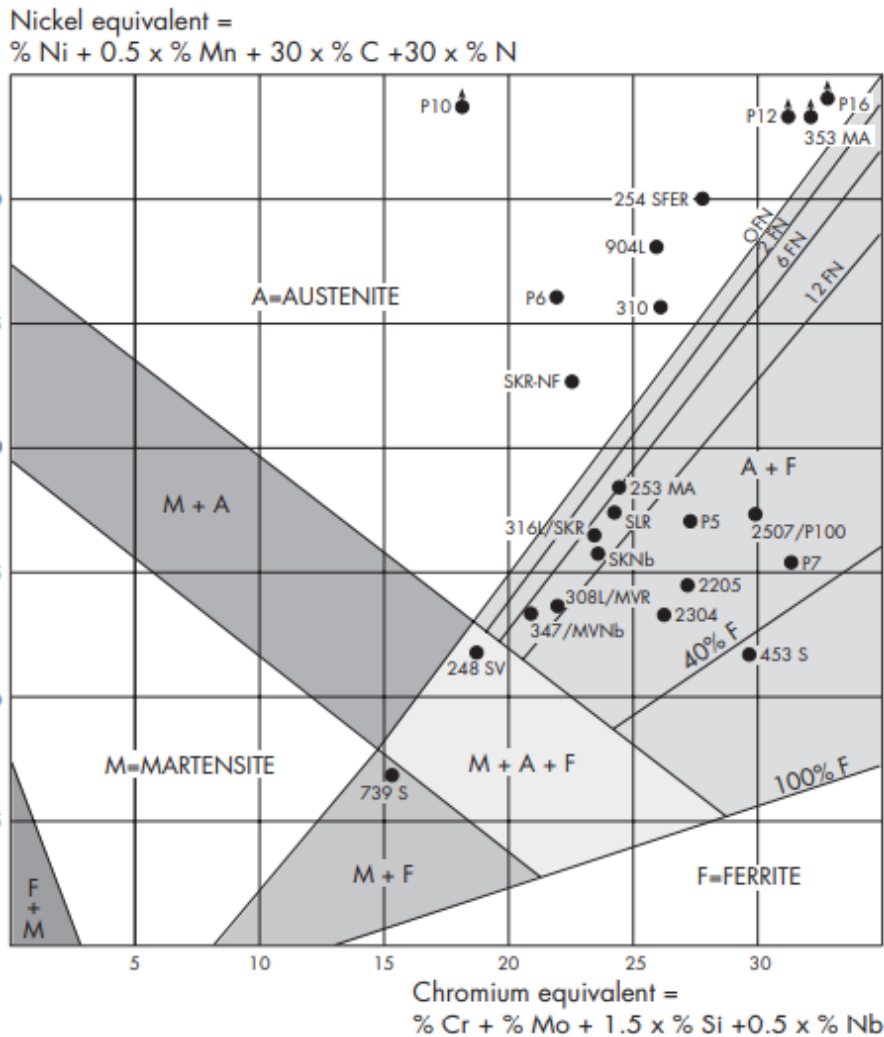
manja količina zaostalog austenita transformira u martenzit. Poluaustenitni PH čelici imaju sličan sastav kao i martenzitni PH čelici uz dodatke Mo, Ti, Al, V i N. U gašenom stanju imaju austenitno - feritnu mikrostrukturu koja je dobro obradiva odvajanjem čestica. Nakon gašenja austenit se hlađenjem na temperaturu žarenja, hladnim oblikovanjem ili dubokim hlađenjem destabilizira i pretvara u martenzit. Time se dobiva martenzitno - feritna mikrostruktura s niskim udjelom zaostalog austenita te se ona podvrgava dozrijevanju pri temperaturama od 480 do 600 °C. Kod dozrijevanja u feritu a potom u martenzitu precipitiraju faze kao što su Ni<sub>3</sub>Al, Ni<sub>3</sub>Ti, Fe<sub>2</sub>Mo i VN. Austenitni PH čelici su niskougljični (< 0,10 % C), visoko legirani s Cr i Ni (> 25 %) uz dodatak Mo, Ti, Cu, Al, Nb, P, V, Mn i N. Njihova toplinska obrada sadrži rastvorno žarenje pri temperaturama od 950 do 1200 °C i dozrijevanje pri 700 – 800 °C u vremenskom intervalu od 15 do 20 sati. Kod ove vrste PH čelika ne postoji pretvorba u martenzit i samim time se postiže skromno očvrnuće i to samo precipitacijom faza tijekom dozrijevanja. Unatoč postojanju precipitata, austenitni PH čelici su vrlo otporni na opću koroziju no nisu postojani na napetosnu koroziju [11].

## **2.2. Proces proizvodnje nehrđajućih čelika**

Metal od nehrđajućeg čelika nastaje kada se sirovine nikla, željezne rude, kroma, silicija, molibdena i drugih tale zajedno. On sadrži niz osnovnih kemijskih elemenata koji, kada se stope zajedno, stvaraju moćnu leguru. Različiti udjeli elemenata od nehrđajućeg čelika, željeza, nikla, kroma, molibdena i ugljika, određuju vrstu nehrđajućeg čelika. Omjer željeza i drugih materijala utječe na to koliko je jak zaštitni oksidni sloj, koliko je metal otporan na određene korozivne tvari i nekoliko drugih mehaničkih svojstava (tvrdoća, talište, modul smicanja itd.). Sirovina za proizvodnju nehrđajućeg čelika je reciklirani čelični otpad, uglavnom otpad od nehrđajućeg čelika. Po dolasku, prije ulaska u talionicu, čelični otpad se testira kako bi se osiguralo da nema radioaktivnih komponenti. Čelični otpad se zatim ispituje, analizira i sortira prema sadržaju legure kako bi se osiguralo što je moguće manje izvornog materijala za dobivanje pravog kemijskog sastava proizvedenog nehrđajućeg čelika. Prilikom izrade nehrđajućeg čelika proizvođač mora točno odrediti koju vrstu nehrđajućeg čelika želi proizvoditi te jednom kada je sirovina za izradu prikupljena, počinje sam proces proizvodnje [12, 13, 14].

### **2.3. Zavarljivost nehrđajućih čelika**

Kako je često potrebno da se različite vrste nehrđajućih čelika međusobno zavaruju, da se postigne najbolja izvedba takvih spojeva potrebno je obratiti posebnu pažnju metalurgiji zavarljivosti metala. U tu svrhu, Schaefflerov dijagram je od velike pomoći. Položaj materijala u Schaefflerovom dijagramu, prikazan na slici 5, određuje se prema njegovim ekvivalentima kroma i nikla, a zatim se crta ravna linija između točaka. Slično se označava položaj predloženog dodatnog materijala. Kod zavarivanja simetričnih spojeva, može se pretpostaviti da će površine osnovnog materijala biti rastaljene. Stoga se može nacrtati ravna linija između položaja dodatnog materijala i sredine linije između osnovnih materijala. Općenito, oko 20 – 40 % dodatnog materijala bit će 'razrijeđeno' rastaljenim osnovnim materijalom, što će rezultirati strukturom metala zavara označenom točkom oko 20 - 40 % duž linije od položaja dodatnog materijala. Ako je ta struktura prikladna, tada se predloženi dodatni materijal može koristiti. Ako nije prikladna, potrebno je ponoviti gore navedeni postupak za dodatni materijal ali različitog sastava [16].



Slika 5. Schaefflerov dijagram [16]

### 2.3.1. Zavarljivost austenitnih nehrđajućih čelika

Austenitni nehrđajući čelici imaju vrlo dobru zavarljivost. Stari problem interkristalne korozije nakon zavarivanja danas je vrlo rijedak. Čelici pogodni za mokru koroziju obično imaju udio ugljika ispod 0,05 % ili su stabilizirani niobijem ili titanom. Također su vrlo otporni na vruće pukotine, uglavnom zato što se stvrđavaju s visokim udjelom ferita. Čelici s višim legiranjem stvrđavaju se s potpuno austenitnom strukturom nakon zavarivanja. Stoga ih treba zavarivati s kontroliranim unosom topline. Čelik i metal zavara s visokim udjelom kroma i molibdena može proći taloženje krhke sigma faze u njihovoj mikrostrukturi ako su izloženi visokim temperaturama tijekom određenog razdoblja. Transformacija iz ferita u sigma ili izravno iz austenita u sigma najbrže napreduje unutar temperaturnog raspona od 750 do 850 °C. Zavarivanje s visokim unosom topline dovodi do sporog hlađenja, posebno kod zavarivanja

tanjih limova. Vrijeme zadržavanja zavara između 750 – 850 °C tada se povećava, što povećava rizik od formiranja sigmatske faze [16, 17].

### **2.3.2. Zavarljivost feritnih nehrđajućih čelika**

Općenito je teže zavarivati feritne čelike u usporedbi s austenitnim čelicima, što je glavni razlog zašto se ne koriste u istoj mjeri kao austenitni nehrđajući čelici. Stariji tipovi, poput AISI 430, imali su znatno smanjenu duktilnost u zavaru, što je uglavnom bila posljedica snažnog rasta zrna u ZUT-u, ali i precipitacije martenzita u ZUT-u. Također su bili osjetljivi na interkristalnu koroziju nakon zavarivanja. Stoga se ovi čelici često zavaruju s predgrijavanjem i naknadnim žarenjem. Moderni feritni čelici poput S44400 i S44635 imaju znatno bolju zavarljivost zbog niskog udjela ugljika i dušika te stabilizacije titanom/niobijem. Međutim, uvijek postoji rizik od nepovoljnog povećanja zrna ako se ne zavaruju pod kontroliranim uvjetima uz niski unos topline. U pravilu im nije potrebno žarenje nakon zavarivanja [16, 17].

### **2.3.3. Zavarljivost dupleks nehrđajućih čelika**

Današnji dupleks nehrđajući čelici imaju znatno bolju zavarljivost u usporedbi s ranijim razredima te se mogu zavarivati kao i uobičajeni austenitni nehrđajući čelici. Osim što su osjetljivi na interkristalnu koroziju, raniji razredi duplex čelika bili su skloni rastu zrna ferita u ZUT-u i lošoj transformaciji ferita u austenit, što je rezultiralo smanjenom duktilnošću. Današnji čelici, koji imaju veći udio nikla i legirani su s dušikom, pokazuju transformaciju u austenit u ZUT-u koja je u većini slučajeva dovoljna. Izuzetno brzo hlađenje nakon zavarivanja može rezultirati nepovoljno visokim udjelom ferita. Dok visok unos topline također može uzrokovati velik rast zrna ferita u ZUT-u [16].

### 2.3.4. Zavarljivost martenzitnih nehrđajućih čelika

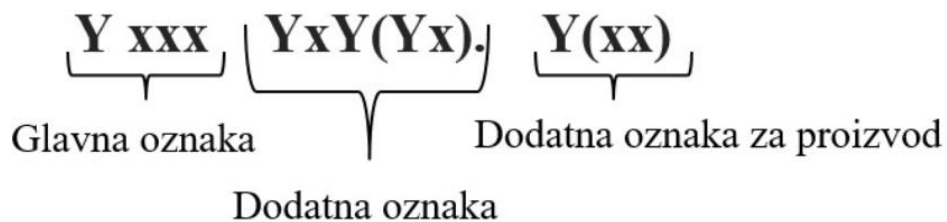
Količina martenzita i njegova tvrdoća glavni su uzroci problema sa zavarljivošću kod ovih čelika. Zavarivanje ovog materijala zahtjeva toplinske postupke prije (predgrijavanje) i poslije postupka zavarivanja (popuštanje). Prije samog procesa zavarivanja potrebno je predgrijavanje iznad  $M_s$  (martenzit start linije) odnosno u području austenita kako bi se smanjila vjerojatnost pojave hladnih pukotina. Kod ovih čelika postoji velika sklonost zakaljivanju stoga je potrebno zadržavanje temperature između prolaza iznad  $M_s$ . Nakon zavarivanja, hlađenjem na temperaturu ispod  $M_f$  (martenzit finish linije), dolazi do zakaljivanja čelika te zadržavanjem na toj temperaturi 1 – 2 sati sav zaostali austenit transformira se u martenzit [16] [17] [18].

### 2.4. Označavanje nehrđajućih čelika prema europskoj normi

Za normizaciju čelika zadužen je Europski odbor za norme. Sukladno normi EN10027-1 označavanje čelika se može podijeliti na [19]:

- označavanje prema svojstvima čelika ili
- označavanje prema sastavu.

Na slici 6 prikazan je shematskih prikaz načina označavanja čelika.



Slika 6. Označavanje čelika prema europskoj normi [19]

Glavna oznaka predstavlja svojstva čelika, odnosno čvrstoću čelika mjerenu u MPa i svrhu primjene čelika. Na tablici 1 prikazane su glavne oznaka uz njihov opis prema spomenutoj normi [19].

Tablica 1. Glavna oznaka označavanja čelika [19]

Oznaka	Opis
S	Konstruktivski čelik
P	Čelik za posude pod tlakom
L	Čelik za cjevovode
E	Čelik za upotrebu u strojogradnji
H	Plosnati proizvodi (hladno valjani)
R	Čelici za izgradnju tračnica
C	Ugljični čelik
n	Legirani čelici (1% mangana uz maseni dio ostalih elemenata manji od 5%)
X	Legirani čelici s više od 5% masenog udjela elementa za legiranje
HS	Brzorezni čelici
G	Čelični lijev
nnn	Granica razvlačenja

Dodatnom oznakom označuju se tri različite kategorije: iznos udarnog rada loma, toplinska obrada i područje primjene. Trećom oznakom definiraju se posebna svojstva čelika. Ista kao i kod dodatnih oznaka, treća funkcija se može svrstati u tri različite kategorije: posebni zahtjevi, oznake prevlake i oznake obrade. Podjela oznaka obrade prikazana je u tablici 2. Konkretno na primjeru nehrđajućih čelika u dijelu osnovnih oznaka slovo „X“ predstavlja oznaku materijala s barem jednim legirajućim elementom. Slova „xxx“ predstavljaju sadržaj ugljika pri čemu je taj broj jednak umnošku broja 100 i prosječnog postotnog sadržaja ugljika. Dodatne oznake za čelik predstavljaju kemijske simbole koji označavaju legirajući element koji karakterizira čelik i čiji je sadržaj u rasponu od 0,20 do 1,0 % nakon čega slijedi njihov udio u samom čeliku. U tablici 3 prikazana je usporedba europskog i američkog načina označavanja nekih od čelika. [20].

*Tablica 2. Podjela obrade čelika [19]*

Oznaka	Opis
+A	Meko žareni čelik
+C	Hladno očvrnuti čelik
+Q	Kaljani čelik
+ST	Čelik žaren u otopini
+T	Popušteni čelik

*Tablica 3. Usporedna tablica europskog i američkog načina označavanja čelika [19]*

EN	AISI
X10 CrNi 18-8	301
X8 CrNiS 18-9	303
X5 CrNi 18-10	304
X2 CrNiN 18-10	304LN
X4 CrNi 18-12	305
X15 CrNiSi 20-12	309

### 3. TIG POSTUPAK ZAVARIVANJA

Postupak zavarivanja sa zaštitnim plinom patentiran je od strane Charlesa Coffina iz Detriota 1890. godine. Zavari razvijenog postupka na obojenim metalima još su uvijek tada bili loše kvalitete zbog poroznosti. Nakon nekoliko godina, točnije 1930., počeli su se koristiti inertni plinovi kako bi se zaštitilo područje zavarivanja. Ovim načinom kreiran je postupak koji uključuje izravnu upotrebu struje i zaštitnog plina koji je danas osnova TIG postupka. Ova metoda javila se kao prvobitno rješenje za zavarivanje magnezija u zrakoplovnoj industriji. U početku je ovaj postupak nazvan „Heli – arc“ jer je Russell Meredith, jedan od njegovih razvijачa, koristio volframovu elektrodu i helij kao zaštitni plin. Danas se ovaj naziv rijetko koristi jer se uglavnom koristi argon ili mješavina argona kao zaštitni plin. Unatoč razvoju zračnog hlađenja i vodenog hlađenja pištolja, volframova elektroda imala je i dalje tendenciju pregrijavanja a nekada čak i taljenja. Problem se riješio tako što se polaritet elektrode invertirao s pozitivnog na negativni. Kasnije, kada su postali dostupni strojevi s izmjeničnom strujom, luk zavarivanja je stabiliziran i bilo je moguće izvesti kvalitetne zavare. [21] Zavarivanje je postupak koji se koristi u izradi različitih čeličnih konstrukcija za primjene od tankih do debljih dijelova u raznim aplikacijama poput tlačnih posuda, kemijskih postrojenja i nuklearnih reaktora. TIG postupak zavarivanja se godinama razvijao i danas postoje razne varijante dostupnih postupaka kao što su [22]:

- 141 TIG zavarivanje žicom punog presjeka,
- 142 TIG zavarivanje bez dodatnog materijala,
- 143 TIG zavarivanje žicom koja je punjena praškom,
- 145 TIG zavarivanje sa žicom punog presjeka primjenom reducirajućeg plina,
- 146 TIG zavarivanje žicom punjenom praškom uz primjenu reducirajućeg plina i
- 147 TAG zavarivanje netaljivom volframovom elektrodom uz primjenu aktivnog plina.

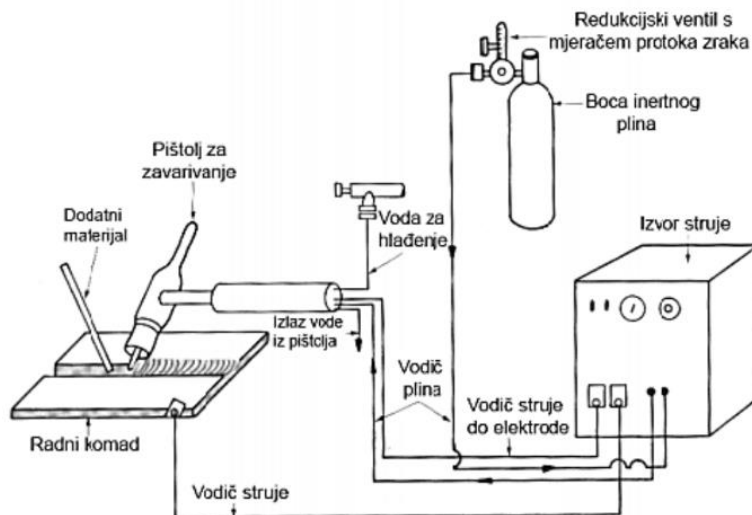


### 3.1. Osnovni princip TIG postupka zavarivanja

Skraćena imena postupka TIG dolazi od punog naziva "Tungsten Inert Gas", a često se naziva i WIG ili GTAW. TIG zavarivanje je postupak u kojem se pomoću topline oslobođene u električnom luku tali osnovni materijal, a u nekim slučajevima i dodatni materijal. Kod TIG zavarivanja električni luk se stvara između volframove elektrode i radnog komada u atmosferi argona ili helija. Oprema za TIG postupka zavarivanja sastoji se od [23]:

- izvora struje,
- pištolja za zavarivanje,
- sapnice za zaštitne plinove,
- rashladnog sustava,
- sustava pomoću kojeg se dovodi zaštitni plin,
- volframove elektrode,
- zaštitnog plina.

Dijelovi TIG sustava zavarivanja prikazani su na slici 7.



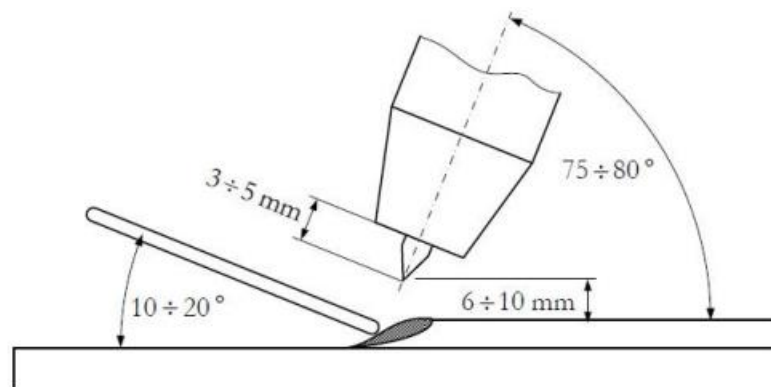
Slika 7. Dijelovi TIG sustava zavarivanja [23]

Kod nehrđajućih čelika koristi se uglavnom istosmjerna struja odnosno DC TIG postupak zavarivanja. Kod tog zavarivanja, elektroda obično ima negativni polaritet te njena svojstva emisije elektrona smanjuju rizik od pregrijavanja koje bi se inače moglo dogoditi s pozitivnim polaritetom elektrode. Tako formirani ionizirani plinski ili plazma tok može doseći temperaturu

od nekoliko tisuća stupnjeva Celzija, barem u središnjoj jezgri luka blizu elektrode. Kao posljedica toga, unutar normalnog raspona zavarivačkih struja od nekoliko ampera do nekoliko stotina ampera (koji se odabire prema debljini materijala) može se postići brzo taljenje. Međutim, postupak s električnim lukom u praksi je vrlo jednostavan jer je toplina potrebna za taljenje metala određena jednostavnim postavljanjem zavarivačke struje u odnosu na brzinu zavarivanja, općenito unutar raspona od 0,1 do 300 A. Plin koji se dovodi do luka ima dvije funkcije [23, 24]:

- generira plazmu luka,
- štiti elektrodu, talinu i zavareni šav od neželjene oksidacije i
- stabilizira električni luk.

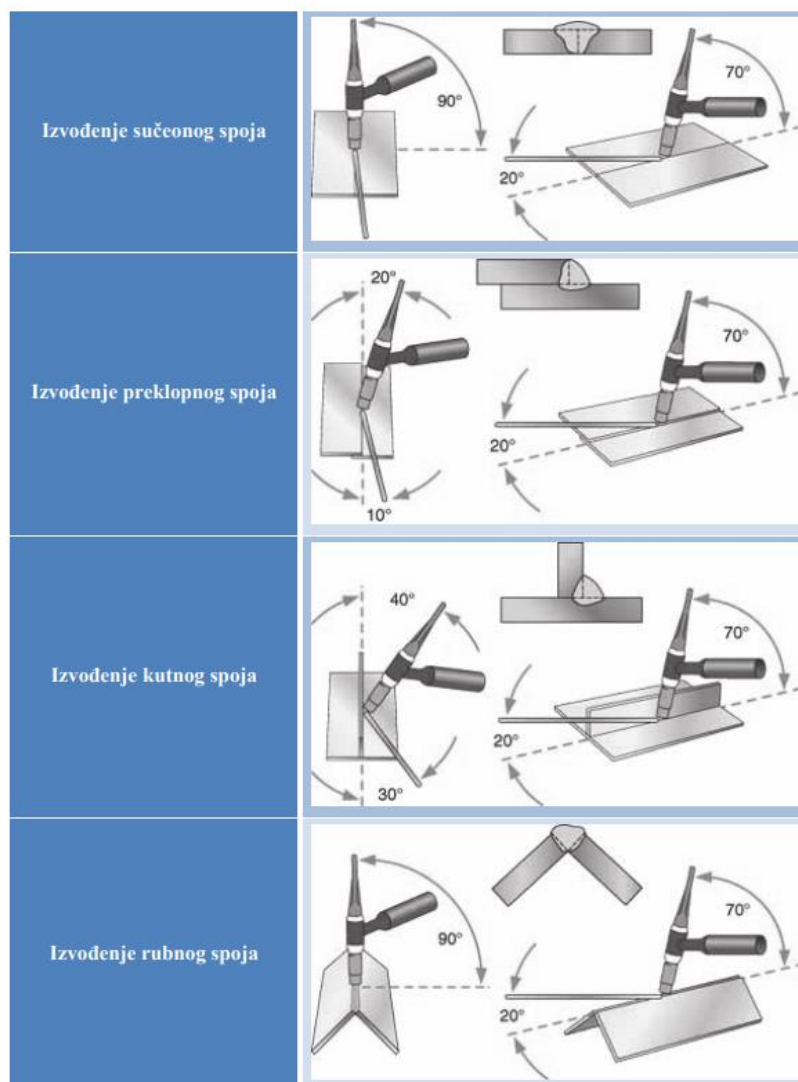
Luk je u obliku konusa, čija veličina je određena strujom, promjerom elektrode i kutom vrha. Električni luk se uspostavlja pritiskom na prekidač pištolja i to na točno određenom razmaku tj. udaljenosti pištolja od radnog komada (2 - 5 mm). Karakteristike penetracije određene su razinom struje i sastavom zaštitnog plina. Što je veća struja veća je i toplina koja se prenosi na materijal čime se povećava penetracija dok se kod manjih struja smanjuje toplina i to rezultira plićom penetracijom.[25]



Slika 8. Pravilni položaj elektrode i dodatnog materijala tijekom zavarivanja [25]

Na slici 8 je prikazan pravilan položaj elektrode i dodatnog materijala koji je tipičan za lijevu tehniku rada u kojoj zavarivač drži pištolj u desnoj ruci, dodatni materijal u lijevoj, a smjer zavarivanja je s desna na lijevo. Kut pištolja za optimalno zavarivanje trebao bi biti od  $75^\circ$  do  $80^\circ$ , dok bi se dodatni materijal trebao dodavati pod kutom od  $10^\circ$  do  $20^\circ$ . Kod TIG zavarivanja prijenos kapljice metala se ne odvija kroz električni luk već se dodaje dodatni materijal na prednji rub taline. Dodatni materijal u obliku žice ili šipke tali se pod lukom i spaja s talinom

zavara na temelju mehanizma površinske napetosti. Vrh volframove elektrode je izvučen iz sapnice za 3 do 5 mm, a propisani razmak između vrha elektrode i radnog komada je od 6 do 10 mm. Bitno je da ima dovoljno taline kako ne bi došlo do naljepljivanja i puno pogrešaka. Osnovni princip TIG zavarivanja je uspostavljanje električnog luka i zagrijavanje materijala sve dok se ne stvori talina. U određenom trenutku pištolj za zavarivanje vuče se unatrag, ali toliko da toplina i dalje djeluje na talinu koja je ujedno i zaštićena plinom. Na slici 9. prikazane su različite tehnike izvođenja TIG zavarivanja [25].



Slika 9. Prikaz tehnike izvođenja TIG zavarivanja [25]

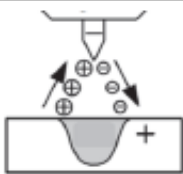
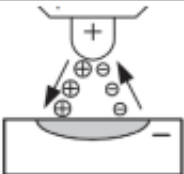
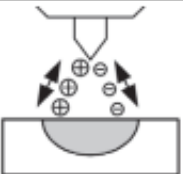
### 3.2. Izvor struje

Kako će se raspodijeliti toplina u električnom luku odnosno između netaljive elektrode i radnog komada, ovisi o struji koja će se primijeniti i o polaritetu elektrode. Posljedično tome, moguća su tri slučaja [25]:

1. Istosmjerna struja u kojoj je elektroda priključena na minus (-) pol (DCEN)
2. Istosmjerna struja u kojoj je elektroda priključena na plus (+) pol (DCEP)
3. Izmjenična struja (AC)

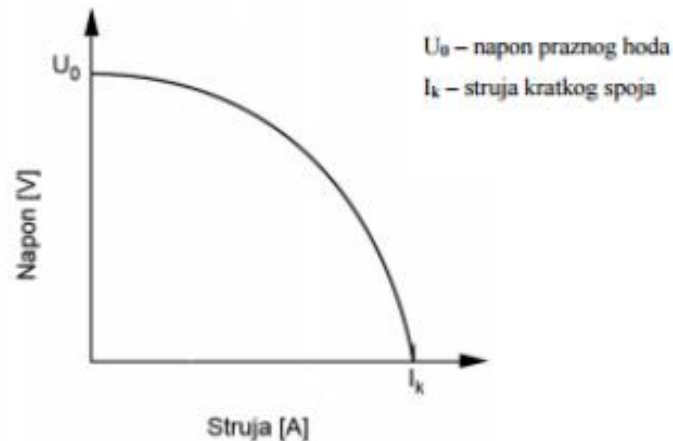
Kod TIG zavarivanja najčešća kombinacija je primjena istosmjerne struje gdje je elektroda priključena na minus pol. Kod istosmjerne struje ne dolazi do promjene smjera toka elektrona u jedinici vremena. U ovom slučaju elektroni prelaze s negativne elektrode na pozitivni osnovni materijal. U tablici 4 prikazan je pregled karakteristika TIG zavarivanja ovisno o vrsti struje i polaritetu elektrode [25].

Tablica 4. Karakteristike TIG zavarivanja primjenom različitih struja [25]

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

Kako bi se zadovoljile potrebe TIG zavarivanja nužno je da izvor struje ima strmo padajuću karakteristiku kako bi se osigurala približno konstantna struja zavarivanja bez obzira na promjene dužine luka prilikom pomicanja ruke zavarivača (slika 10). S druge strane, kod mehaniziranog TIG zavarivanja koriste se izvori struje s ravnom karakteristikom koja osigurava ravnu dužinu luka. Uređaji izvora električne struje kod TIG zavarivanja su [25]:

- transformatori,
- ispravljači,
- inverteri.



Slika 10. Strmo padajuća karakteristika izvora struje kod TIG zavarivanja [25]

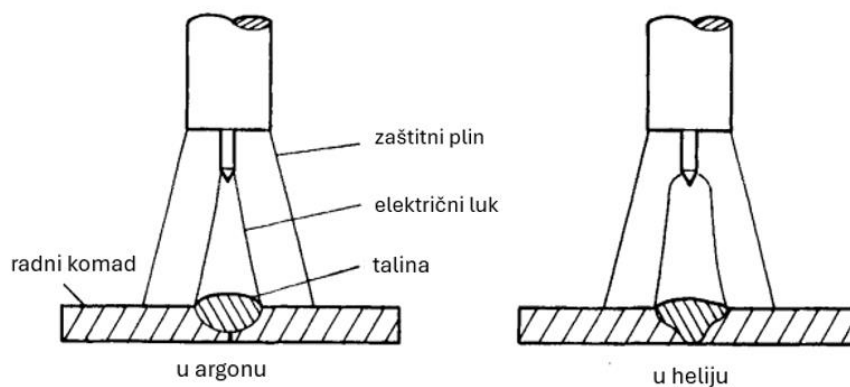
### 3.3. Zaštitni plinovi

U današnje vrijeme najčešći plinovi koji se koriste kao plemeniti zaštitni plinovi u TIG zavarivanju su argon i helij. Oba plina su inertna što znači da ne dolazi do nikakvih kemijskih reakcija između njih i osnovnog materijala. Upravo je ta karakteristika najpoželjnija kod odabira zaštitnog plina. Navedeni plinovi štite volframovu elektrodu i rastaljeni zavar od atmosfere te osiguravaju stabilan električni luk. Također utječu na geometrijske karakteristike zavarenog spoja, estetski izgled spoja ali i na količinu pora koje se tijekom zavarivanja oslobađaju. Prednosti upotrebe argona su njegova cijena, koja ga čini jednim od najjeftinijih plinova koji se koriste u postupku zavarivanja, niski ionizacijski potencijal do 15,7 eV, čime je olakšana uspostava i stabilnost električnog luka. Argon je teži od zraka i time potiskuje zrak kada izlazi iz sapnice i dobro štiti rastaljeni metal. Kada ga usporedimo s helijem, on ima nižu toplinsku vodljivost što rezultira kompaktnijim električnim lukom te se time dobiva manja penetracija i protaljivanje. Helij je lakši inertni plin koji se može distribuirati kao tekućina, ali se češće koristi kao komprimirani plin. Brže napušta područje zavara od argona, pa su potrebne veće brzine protoka kada se koristi no ima viši ionizacijski potencijal što otežava uspostavu električnog luka. Helij proizvodi usku, ali duboku zonu utjecaja topline, što je dobro za zavarivanje na debljim metalima. Prikladan je za zavarivanje velikim brzinama i daje dobru

pokrivenost u vertikalnim položajima zavarivanja. Pomaže povećati penetraciju, a kada se koristi kao stražnja zaštita, ima tendenciju poravnanja zavara. Helij je prikladan za uporabu na debljim ne feritnim metalima. Usporedba mjesta zavara kod upotrebe argona i helija prikazana je na slici 11. Osim čistog argona i helija moguća je upotreba njihove mješavine. Mješavina se koristi kada zavarivači trebaju kontrolu argona i penetraciju helija. U tablici 5 prikazane su karakteristike zavarivanja prilikom primjene različitih zaštitnih plinova. Osim spomenutih plinova postoje i opcije upotrebe vodika i dušika u mješavinama zaštitnih plinova [23, 24, 25, 26].

Tablica 5. Usporedba karakteristika zavarivanja kod različitih zaštitnih plinova [25]

Karakteristika	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	dobra	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	veći nego kod 100% Ar	povećan
Cijena	niža	veća nego 100% Ar	veća nego 100% Ar



Slika 11. Usporedba zavara upotrebom različitih zaštitnih plinova (argona i helija) [26]

### 3.4. Netaljive elektrode

Kao što je već spomenuto kod TIG zavarivanja koriste se elektrode izrađene od volframa. One su netaljive, a njihova funkcija je prijenos topline koja je potrebna za zavarivanje. TIG postupak ovisi o tvrdoći volframa i otpornosti na visoke temperature za prijenos struje za zavarivanje na električni luk. Volfram ima najvišu točku tališta od svih metala a ona iznosi 3410 °C. Volframove elektrode postoje u različitim veličinama i duljinama te u različitim sastavima. Javljaju se kao legure volframa i nekih drugih elemenata i njihovih oksida. Najčešće vrste volframovih elektroda su [27]:

- elektrode zelene boje – čisti volfram,
- elektrode crvene boje,
- elektrode zlatne boje,
- elektrode sive boje,
- elektrode narančaste boje,
- elektrode plave boje.



*Slika 12. Volframove elektrode [28]*

Koja elektroda će se odabrati za postupak TIG zavarivanja ovisi o vrsti i debljini osnovnog materijala ali i o vrsti struje (radi li se o istosmjernoj ili izmjeničnoj struji). Kod elektroda je bitna obrada same elektrode pri čemu vrh elektrode mora biti naoštren u šiljak, okrugli ili rezani šiljak (slika 13). Svaka vrsta odnosno tip elektrode označen je različitom bojom. Na slici 12 prikazane su različite vrste volframovih elektroda. Elektrode označene zelenom bojom sadrže

99,5% volframa te se najviše troše od svih elektroda no zato su i najjeftinije. Karakteristike zelenih elektroda su da [27]:

- formiraju čisti, okrugli vrh pri zagrijavanju i
- pružaju veliku stabilnost luka za zavarivanje.

Crvene elektrode su torijeve volframove elektrode koje sadrže 97,3 % volframa i 1,7 - 2,2 % torija. To su ujedno i najčešće korištene elektrode jer imaju duži vijek trajanja i jednostavne su za korištenje. Prisustvo torija poboljšava inicijaciju luka i omogućuje veću učinkovitost zavarivanja. Ova vrsta elektrode se puno manje troši jer radi na znatno manjim temperaturama taljenja. Prednost ove elektrode je što prenosi puno manje volframa na metal zavara čime se manje onečišćuje sam zavar. Sam torij je radioaktivan stoga je bitno da se bude oprezan kod rukovanja s njim i ovim vrstama elektrode. Narančaste elektrode su cerijske volframove elektrode koje sadrže 97,3 % volframa i 1,8 - 2,2 % cerija. Najbolje rade kod zavarivanja istosmjernom strujom i pri nižim postavkama struje. Kao i crvene elektrode, narančaste se koriste za zavarivanje nehrđajućih čelika i legura nikla i titana. Zlatne elektrode su lantan volfram elektrode koje sadrže najmanje 99,8 % volframa i 1,3 - 1,7 % lantana. Karakteristike ove elektrode su da omogućuju izvrsno paljenje luka, niske stope trošenja imaju, osiguravaju dobru stabilnost luka i imaju dobre karakteristike ponovnog paljenja. Sive volframove elektrode sadrže neodređene aditive oksida rijetkih metala ili hibridne kombinacije različitih oksida. Karakteristike ove elektrode su da osiguravaju stabilan luk u procesima izmjenične i istosmjerne struje, imaju duži životni vijek od torijevog volframa, mogu se koristiti elektrode manjeg promjera za isti posao te veće struje za elektrode slične veličine [27].





Slika 13. Različite vrste oštrenja elektronskih vrhova [27]

Tablica 6. Pregled preporučenih parametara zavarivanja [27]

Metal	Debljina	Struja	Netaljiva elektroda	Zaštitni plin
Al	sve	AC	zelena siva crvena zlatna	Ar
	sve	AC Squarewave	siva crvena zlatna	Ar
	iznad 5mm	AC	siva crvena zlatna	Ar
Cu i legure	sve	DCEN	siva crvena zlatna	Ar
Mg i legure	sve	AC	siva crvena zlatna	Ar
Čelik	sve	DCEN	siva crvena zlatna	Ar
Nehrdajući čelik	sve	DCEN	siva crvena zlatna	Ar

Pod parametre TIG zavarivanja možemo ubrojiti [28]:

- vrsta električne struje i njezina jakost,
- brzina zavarivanja,

- napon struje zavarivanja,
- dodatni materijal,
- zaštitni plin i
- protok zaštitnog plina.

U tablici 6 prikazan je pregled pojedinih parametara ( debljina materija, vrsta struje, izbor netaljive elektrode i zaštitni plin) koje je najbolje upotrijebiti kod zavarivanja pojedinih metala. Za našu temu diplomskog rada najbitniji je zadnji redak u kojem vidimo da se za nehrđajuće čelike preporučuje korištenje sivih, crvenih i zlatnih elektroda te da je najčešći zaštitni plin argon. Mogu se zavarivati sve debljine materijala a struja koja se koristi je istosmjerna [25].

### **3.5. Prednosti i nedostaci TIG postupka zavarivanja**

TIG postupak zavarivanja pruža brojne prednosti što ga čini idealnim izborom za složene projekte i konstrukcije. Jedna od glavnih prednosti TIG zavarivanje je proizvodnja visokokvalitetnih zavara bez troske ili prskanja, čime zavar izgleda profesionalno i precizno. Vrsta inertnog plina koja se koristi omogućuje veću svestranost za različite metale. Plinovi koji se koriste kod TIG zavarivanja smatraju se ekološki prihvatljivijim jer je argon općenito siguran i ne uzrokuje štetne učinke. Iz tog razloga, TIG je jedna od ekoloških opcija za zavarivanje. Kada se kod TIG postupka stvara zavojni šav, ova tehnika proizvodi kvalitetan rezultat, što znači manje prostora za pogreške i čišći završetak. TIG zavarivanje je prilagodljivo za korištenje u bilo kojem položaju, tako da se može zavarivati pod kutom, prema gore, horizontalno ili vertikalno. Može se prilagoditi jačina struje za željeni zavar što omogućuje veću kontrolu nad procesom dok se stvara čvrst i izdržljiv spoj. TIG nudi najviše mogućnosti za različite metalne materijale i procese, što nije dostupno kod drugih metoda zavarivanja. Postupak TIG zavarivanja može se primijeniti na materijalima kao što su aluminij, čelik, nehrđajući čelik, mjed, zlato, magnezij i legure nikla. Kod navedenog zavarivanja proizvodi se manje dima i para, što proces TIG zavarivanja čini sigurnijim i čistim. Kada se sve navedeno sažme, kao osnovne prednosti TIG zavarivanja mogu se nabrojati [29]:

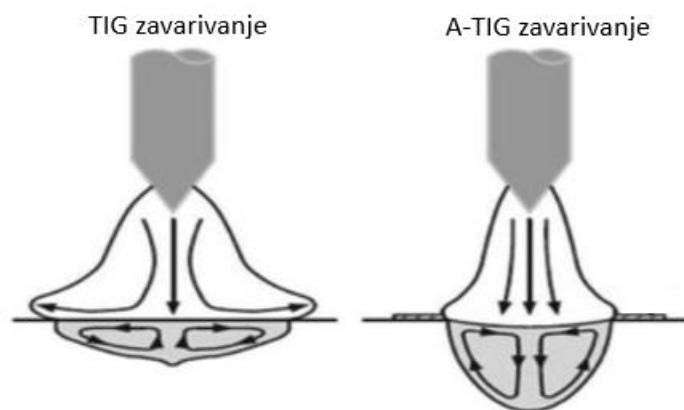
1. koncentriranost električnog luka, smanjeni ZUT,
2. bez prskanja i bez troske,
3. minimalna količina štetnih plinova,
4. zavarivanje širokog spektra metala i njihovih legura,

5. mogućnost zavarivanja različitih metala,
6. mogućnost izvođenja zavarivanja u svim položajima,
7. mogućnost zavarivanja malih debljina,
8. pogodno za izvođenje popravnih radova i
9. odličan izgled zavarenog spoja.

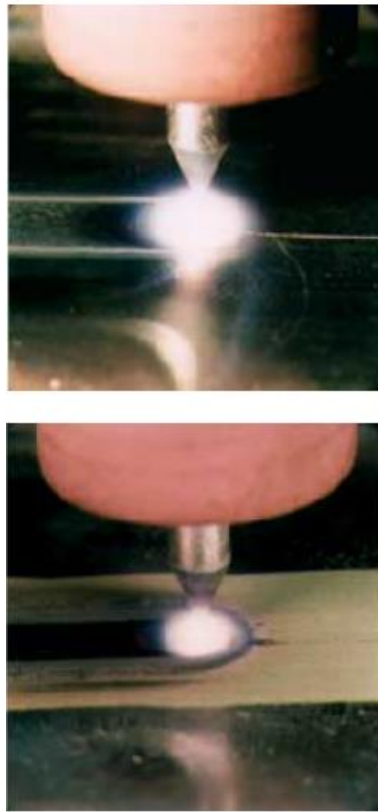
TIG zavarivanje je sporiji proces, tako da se neće vidjeti brzi rezultati kao kod MIG postupka ili nekih drugih automatiziranih tehnika zavarivanja. Početno postavljanje TIG postupka je skupo, iako su naknadni troškovi održavanja, plina i dodataka umjereni ili unutar razumnog raspona cijene. Ova vrsta zavarivanja proizvodi intenzivno svjetlo, što može predstavljati opasnost tijekom dužih razdoblja izloženosti. Za TIG zavarivanje potrebni su iskusni zavarivači, jer je to složen proces koji zahtijeva profesionalno znanje i obuku. Ova vrsta zavarivanja zahtijeva držanje TIG pištolja jednom rukom dok se dodatni materijal primjenjuje drugom rukom kako bi se postigao rezultat. Ako pokrivenost plinom nije dovoljna, postoji rizik od kontaminacije tijekom zavarivanja. Nedostatak plina ili nepravilna pokrivenost također mogu utjecati na kvalitetu zavara.

## 4. A-TIG POSTUPAK ZAVARIVANJA

TIG zavarivanje aktivacijskim premazom, poznatije kao A-TIG zavarivanje (engl. Activated Flux Tungsten Inert Gas), je posebni proces zavarivanja koji su stvorili znanstvenici na Paton Institutu za zavarivanje 1960. godine. Također je poznat i kao Flux Zone Tungsten Inert Gas (FZTIG) zavarivanje koje se koristi kako bi se povećala dubina penetracije luka čime se smanjuje broj prolaza zavarivanja. Navedeno se postiže primjenom tankog sloja aktivacijskog premaza na površinu radnog komada prije samog početka zavarivanja. Premaz rezultira u sužavanju luka što povećava gustoću struje. Iako sam postupak donosi znatnu prednost u zavarivanju, u industriji se do danas sporo prihvaća, što se može prepisati dodatnom trošku zbog korištenja tog premaza i dodatnim korakom/poslom u samom procesu zavarivanja. Na slici 14. i 15. prikazana je usporedba luka i njegove penetracije kod konvencionalnog i A-TIG postupka zavarivanja. Prije nanošenja premaza potrebno je prvo površinu radnog komada oprati acetonom i osušiti. Premazi su općenito dostupni u obliku aerosola ili paste (praškasti premaz pomiješan s odgovarajućim otapalom) koji se nanosi na površinu četkom. Aktivirajući premazi mogu se primijeniti u ručnom i mehaniziranom zavarivanju, iako ih je teže kontrolirati u prvom načinu rada [30, 31, 32].



Slika 14. Usporedba TIG i A-TIG postupka zavarivanja [30]



*Slika 15. Usporedba TIG(gornja slika) i A-TIG(donja slika) postupka zavarivanja [30]*

Kada usporedimo konvencionalni TIG s A-TIG postupkom, A-TIG postupak zavarivanja ima povećanu produktivnost zbog veće dubine penetracije, tj. do 8 mm u nehrđajućem čeliku u usporedbi s 3 mm za konvencionalno TIG zavarivanje. Povećana produktivnost proizlazi iz smanjenog vremena zavarivanja i/ili smanjenog broja prolaza zavarivanja. Problemi s nekonzistentnom penetracijom zavara povezani s varijacijama materijala mogu se eliminirati. Na primjer, duboki penetracijski zavar može se postići u nehrđajućem čeliku s niskim sadržajem sumpora (~0,002 %), koji bi inače pokazivao plitki, široki zavojni šav kod konvencionalnog TIG zavarivanja. [30, 31].

#### **4.1. Vrste aktivacijskih premaza**

Da bi aktivacijski premaz odradio svoj zadatak u povećanju produktivnosti zavarivanja, potrebno je da u svom sastavu sadrži kemijske spojeve kao što su oksidi, halidi i fluoridi. Premaz se sastoji od raznih komponenti u prahu koje se potom miješaju s acetonom ili

etanolom. Talište premaza mora biti slično talištu osnovnog materijala. Za A-TIG zavarivanje nehrđajućih čelika komponente aktivnog premaza su [31, 32]:

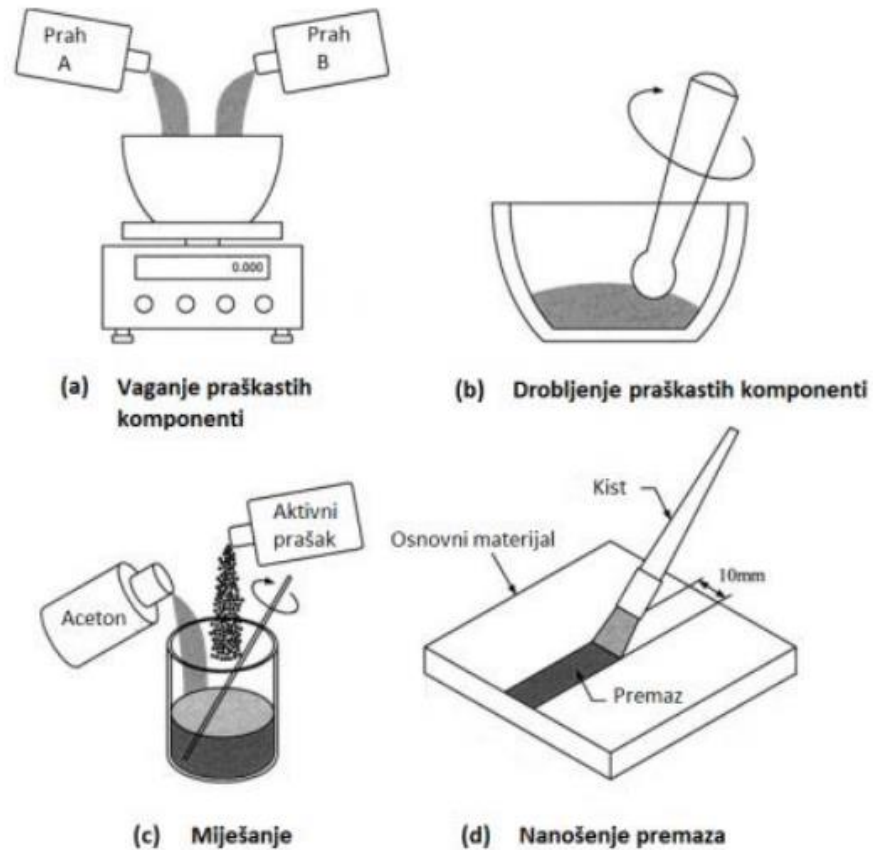
- Titanijev (IV) oksid ( $\text{TiO}_2$ ),
- Silicijev (IV) oksid ( $\text{SiO}_2$ ),
- Kromov (III) oksid ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ),
- Niklov (II) oksid ( $\text{NiO}$ ),
- Bakrov (II) oksid ( $\text{CuO}$ ).

#### **4.2. Princip zavarivanja A-TIG postupkom**

Princip zavarivanja s aktivacijskim premazom je jednak kao i kod konvencionalnog TIG zavarivanja dok je jedina razlika u nanosu spomenutog premaza. Kod izrade aktivacijskog premaza postoje 4 koraka (slika 16) [32]:

1. Određivanje udjela praškastih komponenti,
2. usitnjavanje i homogenizacija praškastih komponenti,
3. miješanje praškastih komponenti s acetonom kako bi se omogućilo kvašenje i
4. nanošenje dobivenog aktivnog talila pomoću kista tj. ručno ili automatizirano.

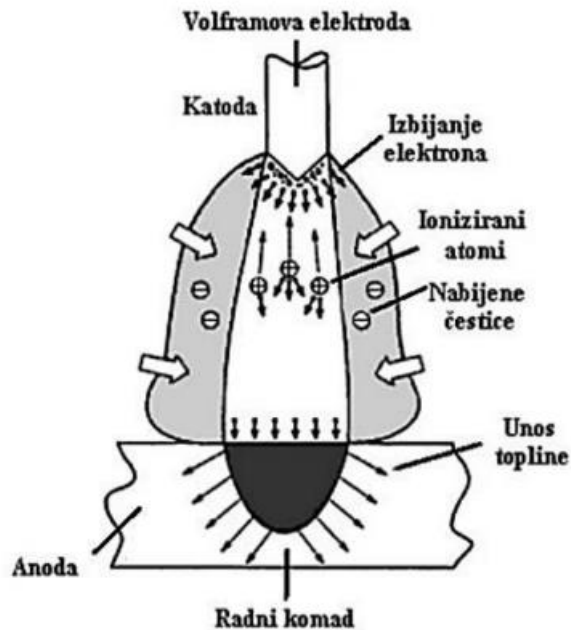
Postoje dva načina nanošenja aktivacijskog premaza. Kod prvog se aktivacijski premaz nanosi na cijelo područje zavarivanja dok se kod drugog, FBTIG postupka (engl. Flux – Bonded TIG), ostavlja praznina po kojoj se zavaruje. Drugi postupak je manje ovisan o debljini premaza za razliku od prvog [32].



Slika 16. Koraci u izradi i nanošenju premaza na radni komad [32]

### 4.3. Mehanizmi utjecaja aktivacijskog premaza na zavar

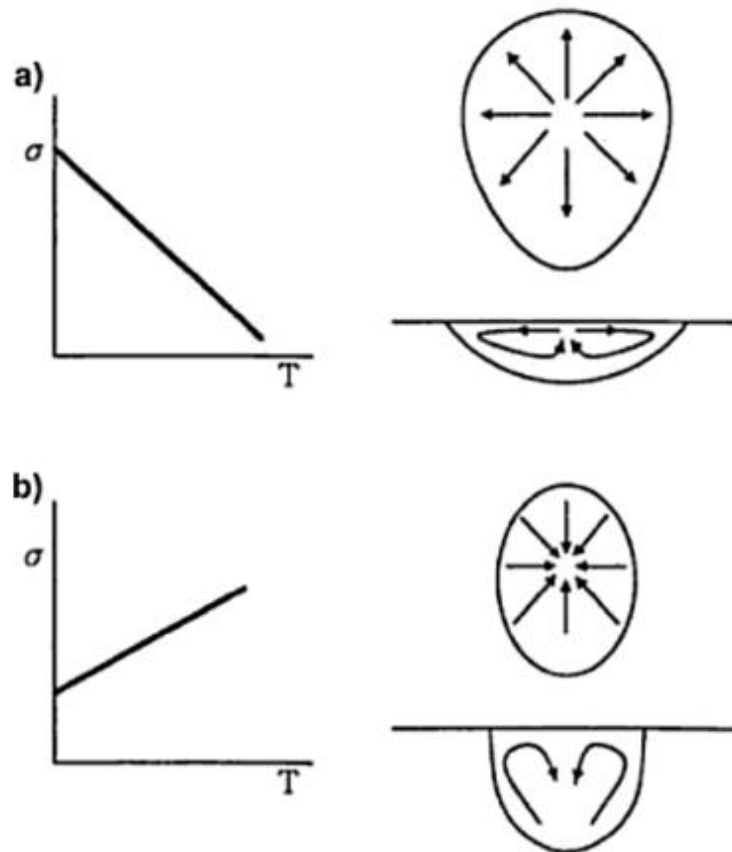
Prema (28) postoje dva mehanizma utjecaja aktivacijskog premaza na zavar. Prvi mehanizam prikazan je na slici 17. On se temelji na stvaranju užeg električnog luka zbog čega dolazi do veće penetracije prilikom zavarivanja. Između anode i katode postoji razlika potencijala i zbog nje dolazi do ubrzavanja elektrona i prijenosa njihove kinetičke energije na radni komad. Upravo je ta energija elektrona toplina koja se unosi u osnovni materijal i koja je potrebna za formiranje taline. Do sužavanja luka dolazi zbog aktivacijskog premaza koji zahvaća elektrone u vanjskom dijelu luka te se suženjem luka povećava gustoća struje u sredini luka u kojem su prisutne visoke temperature i velika energija elektrona pa se upravo iz tog razloga povećava penetracija [30, 31].



Slika 17. Mehanizam suženja električnog luka [30]

Drugi mehanizam se temelji na različitim toplinskim koeficijentima napetosti taline (TKPN) i objašnjen je pomoću Marangonijevog efekta strujanja fluida (slika 18). Kod TIG postupka zavarivanja bez premaza, TKPN ima negativnu vrijednost što znači da je površinska napetost veća na hladnijoj perifernoj strani taline od njegove sredine (slika 18a). Upravo zbog toga, smjer strujanja taline je iz sredine prema rubovima čime se dobiva širi i plići zavar. Kod TIG zavarivanja s aktivacijskim premazom, TKPN ima pozitivnu vrijednost i time je površinska napetost najveća u sredini te je smjer strujanja taline od rubova prema sredini. To rezultira suženjem zavara i većom penetracijom prilikom zavarivanja (slika 18b) [30, 31].





Slika 18. Marangonijev efekt strujanja fluida – a) negativan TKPN, b) pozitivan TKPN [30]

#### 4.4. Prednosti i primjena A-TIG zavarivanja

Prednosti A-TIG zavarivanja su [33]:

- postojeći uređaji za zavarivanje,
- sličan postupak kao TIG zavarivanje, ali uz povećanu produktivnost,
- korištenje aktivacijskog premaza rezultira povećanjem od 1,5 – 3 puta u penetraciji u usporedbi s redovnim jednim prolazom kod TIG zavarivanja,
- sveukupni unos topline u spoj značajno se smanjuje što poboljšava kvalitetu zavara i smanjuje rizik od problema s materijalima (osobito s austenitnim čelicima koji su poznati po svojoj osjetljivosti na određene vrste oštećenja kao što su korozija ili pucanje na visokoj temperaturi),
- dovoljno je nanijeti tanki sloja premaza (< 100 mikrona) na površinu koju treba zavariti da se dobiju gore navedene prednosti,
- smanjenje zahtjeva za pripremom kosina,
- smanjenje broja prolaza zavarivanjem,

- manje vrijeme zavarivanja,
- smanjena potrošnja dodatne žice za zavarivanje,
- eliminacija zadnjeg dubljenja i brušenja i
- smanjeno izobličenje.

Primjena A-TIG zavarivanja [33]:

- cijevi u nuklearnoj industriji,
- izrada tlačnih posuda i cijevi do cijevi,
- listovi u izmjenjivačima topline,
- energetika i kemijska industrija i
- hidraulički cilindri i noge podvozja u zrakoplovnoj industriji.

## 5. ESPERIMENTALNI DIO

### 5.1. Opis zadatka

Cilj eksperimentalnog dijela rada bio je ispitivanje učinkovitosti i produktivnosti zavarivanja nehrđajućih čelika A-TIG postupkom u kojem su se koristili različiti aktivacijski premazi. Ispitivanje se provodilo u laboratoriju Sveučilišta Sjever u Varaždinu. U eksperimentu se koristio lim od nehrđajućeg čelika i 3 različita aktivacijska premaza. Koristilo se 8 limova koji su se prije početka zavarivanja očistili i označili brojevima 1 - 4. Uzorke je potom bilo potrebno spojiti TIG postupkom i stegnuti s pločama kako se ne bi pomicali tijekom eksperimenta te je time dobiveno 4 uzoraka koji će se zavarivati i analizirati kroz ovaj eksperiment.

### 5.2. Osnovni materijal u eksperimentu

Kao osnovni materijal u eksperimentu koristio se austenitni krom-nikal nehrđajući čelik poznat kao AISI 304 ili X5CrNi18-10. Dimenzije osnovnog materijala su 100 x 150 x 3 mm (duljina x širina x debljina). Ovaj nehrđajući čelik ima vrlo visoku otpornost na koroziju, vrlo niska svojstva magnetiziranja te je pogodan za zavarivanje, kovanje i hladno oblikovanje. Njegova kemijska i mehanička svojstva prikazana su u tablicama 7 i 8.



Slika 19. Lim - AISI 304

Tablica 7. Kemijska sastav osnovnog materijala

Element	C	Mn	Si	Cr	N	S	Ni
<b>Maseni udio %</b>	0,07	2,00	0,75	17,5-19,5	0,10	0,30	8-10,5

Tablica 8. Mehanička svojstva osnovnog materijala

Oznaka čelika		Mehanička svojstva						
EN	AISI	R <sub>m</sub> , min MPa	R <sub>p</sub> , min MPa	A <sub>5</sub> , min %	HB, max	E, GPa	T <sub>m</sub> , °C	Gustoća, kg/m <sup>3</sup>
X5CrNi18-10	304	520-750	215-505	40	201	193	1400-1455	7900

### 5.3. Korištena oprema u eksperimentu

#### 5.3.1. Izvor struje

Za izvor struje koristio se uređaja VARTIG 2005 AC/DC proizvođača Varstroj prikazan na slici 20. Specifikacije korištenog uređaja prikazane su u tablici 9. U ovom eksperimentu koristila se izmjenična DC struja koja je bila glavni parametar ovog eksperimenta a iznosila je 120 A te je bila konstantna tijekom cijelog procesa.

Tablica 9. Karakteristike uređaja VARTIG 2005 AC/DC [34]

TIP	Vartig 2005 AC/DC (G i W)
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 60% - 160 A / 170 A 100% - 130 A / 130 A
Napon zavarivanja REL/TIG:	20-26,8V / 10-16,8V
Promjer elektrode:	∅ 1,5 - 4 mm
Hlađenje izvora:	prsilino - ventilator
Masa:	18 kg
Dimenzije (mm):	440 x 222 x 480

G – zrakom hlađeni gorionik; W – vodom hlađeni gorionik



Slika 20. Izvor struje - uređaj VARTIG 2005 AC/DC

### 5.3.2. Zaštitni plin

Kao zaštitni plin koristio se Argon 4.8 proizvođača Messer. To je inertni plin čistoće 99,998 % koji se koristi za MIG i TIG zavarivanja, protok plina postavljen je na 13 L/min. Boca plina prikazana je na slici 21.



Slika 21. Argon 4.8

### 5.3.3. Pištolj za zavarivanje

Na slici 22. prikazan je korišten pištolj za zavarivanje ABITIG GRIP 450 W. Pištolj je pričvršćen na uređaj za automatsko vođenje te je udaljenost od pištolja do radnog komada postavljena na 3 mm i ostala je konstantna kroz cijeli eksperiment. Dijelovi pištolja prikazani su na slici 23.



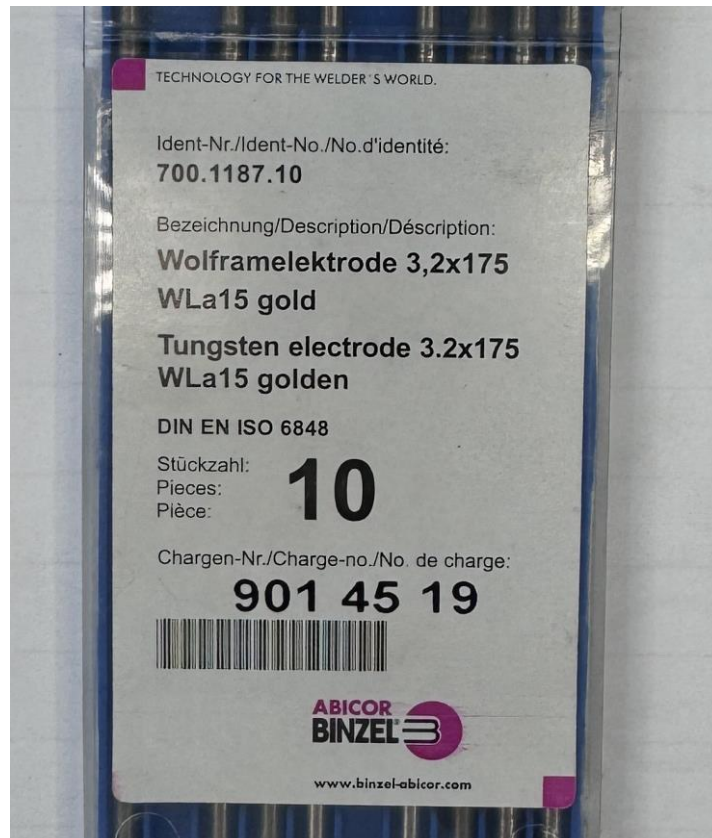
*Slika 22. Pištolj za TIG zavarivanje*



*Slika 23. Dijelovi pištolja za zavarivanje (zaštitna kapa, vodilica, elektroda i sapnica)*

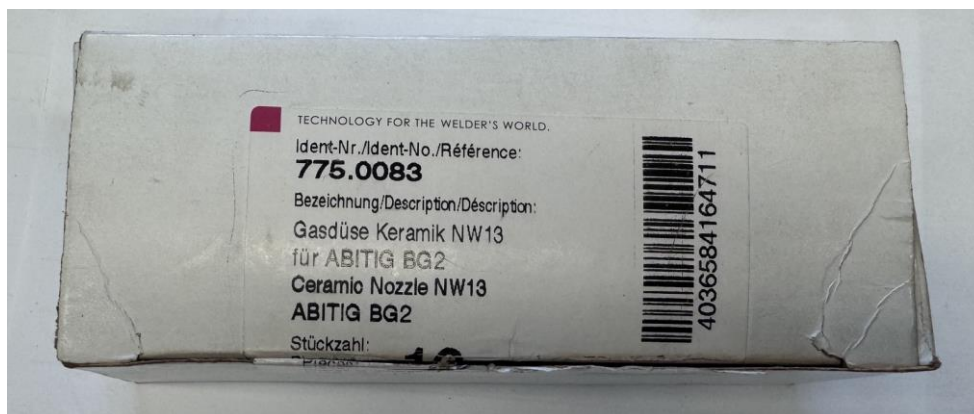
### 5.3.4. Elektroda i sapnica

U eksperimentu korištena je volframova elektroda s dodatkom lantana. Specifikacije navedene elektrode prikazane su na slici 24. Vrh elektrode je zašiljen i zlatne boje, dok je promjer elektrode  $\varnothing$  3,2 mm i dužine 175 mm.



Slika 24. Netaljiva volframova elektroda s dodatkom lantana

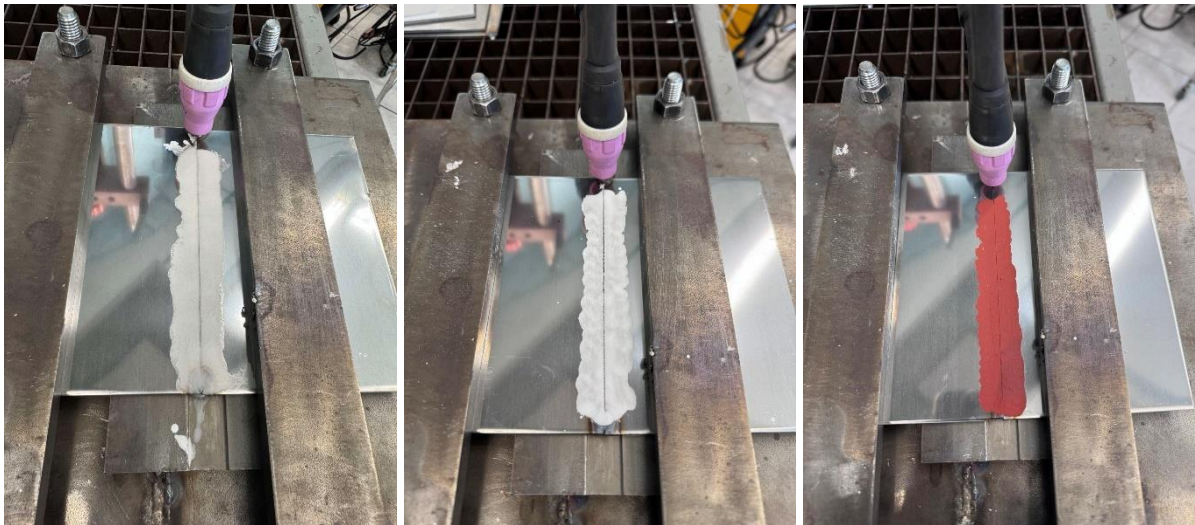
Za protok plina na otvoru koristila se keramička sapnica promjera  $\varnothing$  13 mm(slika 25.)



Slika 25. Keramička sapnica

### 5.3.5. Aktivacijski premaz

U radu se analiziralo zavarivanje 4 uzoraka s time da je jedan bio bez aktivacijskog premaza a ostala tri sa različitim aktivacijskim premazima. Na drugi uzorak kistom se nanijela smjesa alkohola i praškaste komponente silicijevog dioksida  $\text{SiO}_2$  u omjeru 20 ml / 20 g. Na treći uzorak nanijela se smjesa alkohola i praškaste komponente  $\text{CaO}$  u omjeru 20 ml / 20 g. Na četvrti uzorak nanijela se smjesa alkohola i praškaste komponente željezovog oksida  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  u omjeru 20 ml / 20 g. Premazi su se stavljali kistom u širini taline a njihov izgled nanosa na uzorak može se vidjeti na slikama 26.



Slika 26. Aktivacijski premazi na uzorcima (s lijeva na desno) -  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$

### 5.3.6. Automatsko vođenje pištolja za zavarivanje

Sam postupak zavarivanja u eksperimentu bio je automatski vođen uređajem Rail Bull proizvođača Promotech. Uređaj se koristio za horizontalno pravocrtno zavarivanje. Prikaz dijelova uređaja može se vidjeti na slici 27. Uz pomoć navedenog uređaja bio je vođen pištolj za zavarivanje koji je bio postavljen na 3 mm od uzorka. Na ovom uređaju postavljena je konstantna brzina zavarivanja od 18 cm/min.





Slika 27. Dijelovi uređaja Rail Bull Promotech [35]

#### 5.4. Parametri zavarivanja

Konstantni parametri u eksperimentu bili su (tablica 10):

- vrsta zaštitnog plina,
- vrsta struje koja je bila izmjenična,
- protok zaštitnog plina 13 l/min,
- promjer sapnice na otvoru  $\varnothing$  13 mm,
- netaljiva elektroda promjera  $\varnothing$  3,2 x 175 mm,
- udaljenost pištolja za zavarivanje i radnog komada 3 mm
- brzina zavarivanja 18 cm/min

Jedini promjenjivi parametar u eksperimentu bio je aktivacijski premaz.

Tablica 10. Parametri zavarivanja

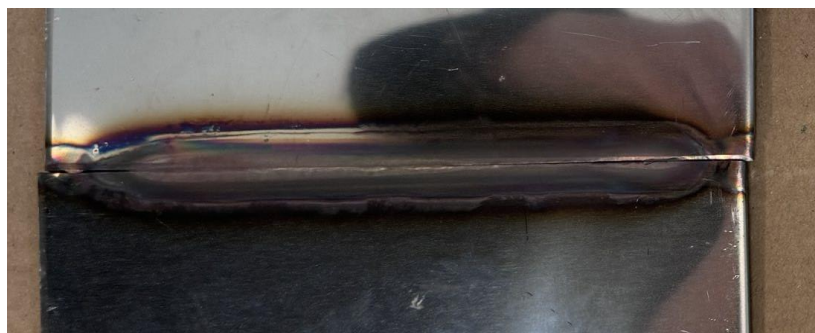
Broj uzorka	Dimenzije uzorka, mm	Aktivacijski premaz	Visina luka, mm	Jakost struje, A	Brzina zavarivanja, cm/min	Protok plina
1	100 x 150 x 3	Bez premaza	3	120	18	13
2	100 x 150 x 3	SiO <sub>2</sub>	3	120	18	13
3	100 x 150 x 3	CaO	3	120	18	13
4	100 x 150 x 3	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3	120	18	13

### 5.5. Rezultati zavarivanja

Nakon sučeonog učvršćenja uzoraka s obje strane, uzorci su ukucavanjem brojeva označeni kako bi se u daljnjem toku eksperimenta mogli razlikovati. Prvi uzorak zavarivao se TIG postupkom te je on označen brojem 1 (slika 28 i 29).



Slika 28. Lice zavara uzorka 1



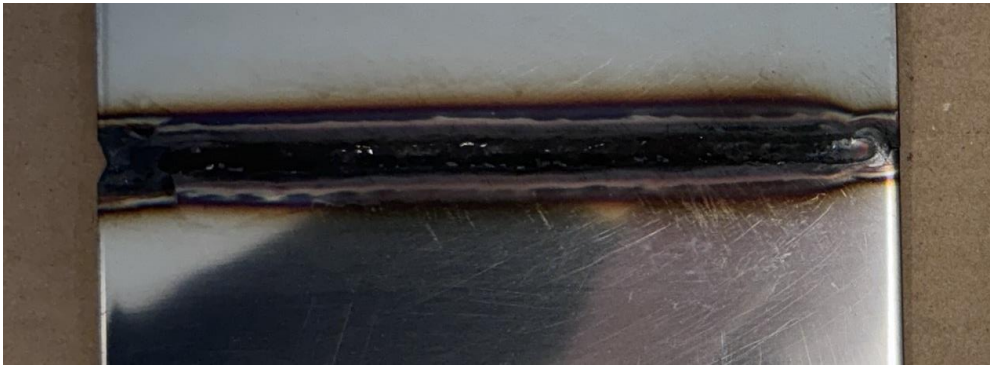
Slika 29. Korijen zavara uzorka 1

Uzorak broj 2 zavaren je A – TIG postupkom primjenom aktivacijskog premaza SiO<sub>2</sub>. Rezultati zavarivanja prikazani su na slici 30.

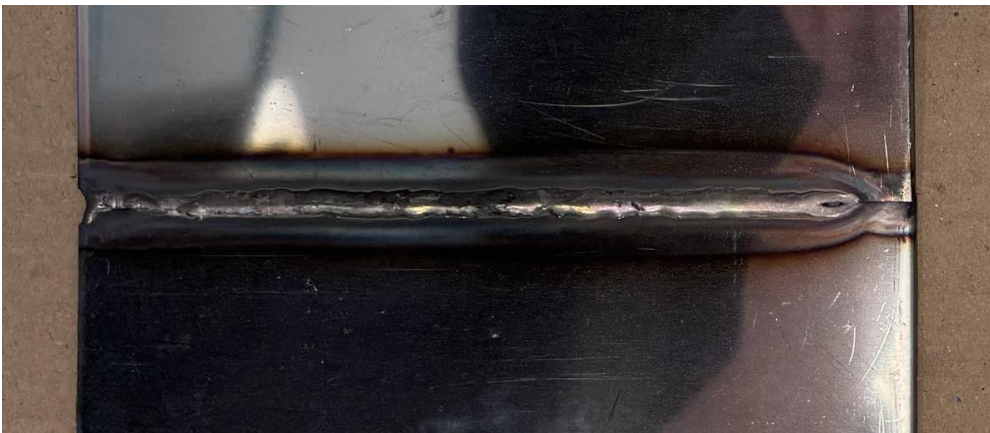


*Slika 30. Lice uzorka 2*

Uzorak broj 3 zavaren je A – TIG postupkom primjenom aktivacijskog premaza CaO. Rezultati zavarivanja prikazani su na slikama 31. i 32.

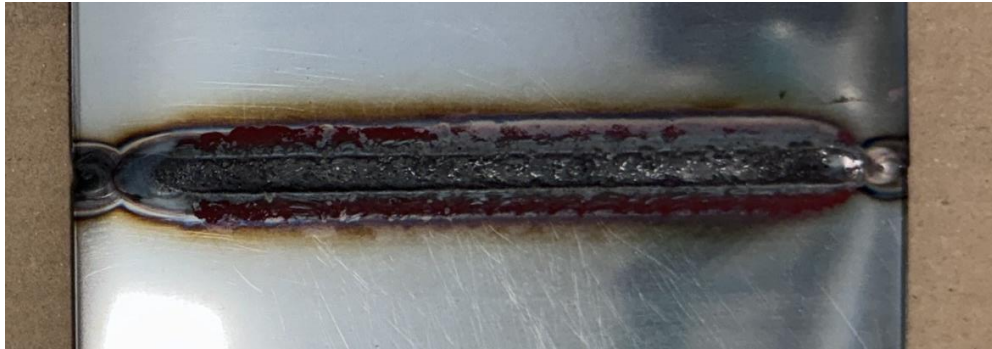


*Slika 31. Lice uzorka 3*

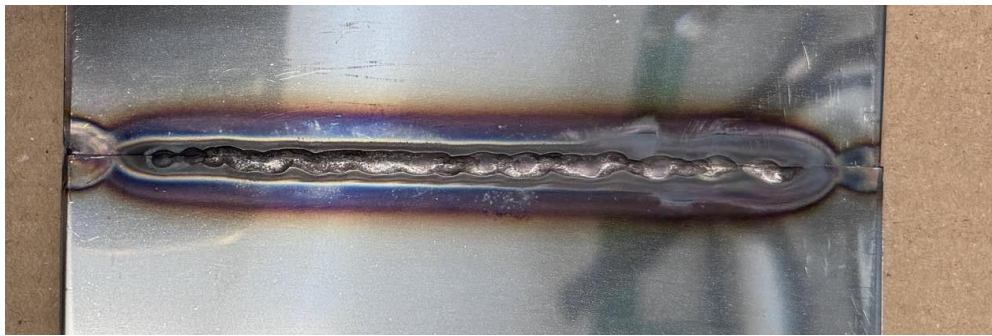


*Slika 32. Korijen uzorka 3*

Uzorak broj 3 zavaren je A – TIG postupkom primjenom aktivacijskog premaza  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .  
Rezultati zavarivanja prikazani su na slikama 33. i 34.



*Slika 33. Lice uzorka 4*

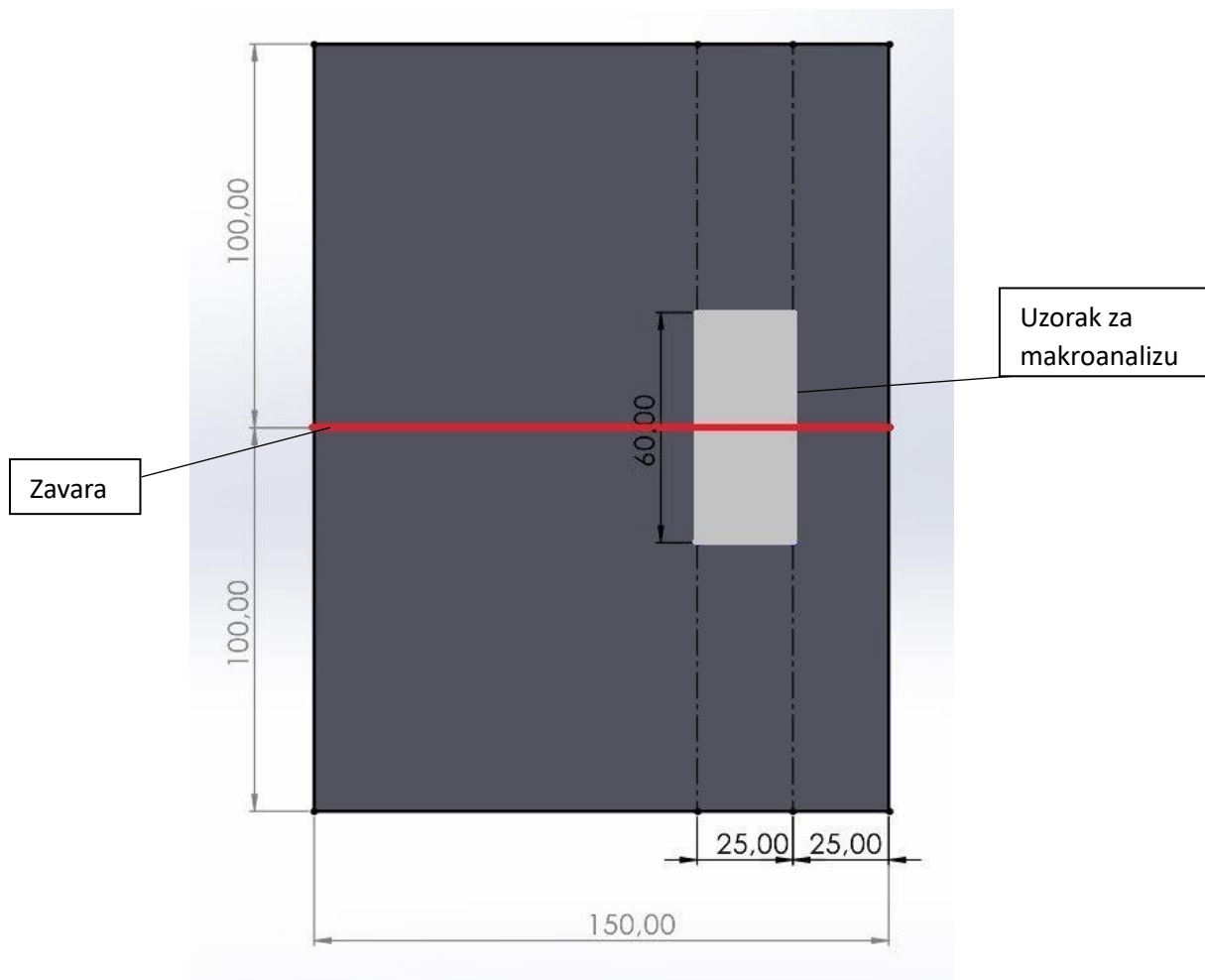


*Slika 34. Korijen uzorka 4*

## 6. ANALIZA REZULTATA

### 6.1. Priprema uzoraka za makroanalizu

Nakon zavarivanja uzorci su očišćeni, fotografirani i ostavljeni da se ohlade na zraku. Tijekom eksperimenta vršila se vizualna kontrola prije, za vrijeme i nakon procesa zavarivanja uzoraka. Nakon hlađenja uzorke je bilo potrebno obraditi na tračnoj pili za daljnju makroanalizu. Uzorci za makroanalizu od 60 x 25 mm izrezani su 25 mm od početka zavara. Skica uzorka za makroanalizu prikazana je na slici 36.



Slika 35. Skica pripremljenog uzorka za makroanalizu

## 6.2. Brušenje uzoraka za makroanalizu

Nakon izrezivanja uzorke je bilo potrebno izbrusiti kako bi se dobila finija površina za analizu. Brušenje se izvodilo na uređaju za poliranje i brušenje PRESI Minitech 250 SP1 u laboratoriju Sveučilišta Sjever. Uređaj je prikazan na slici 37.



Slika 36. Uređaj za brušenje PRESI Minitech 250 SP1

Brušenje svih 4 uzoraka izvodilo se na 4 različita brusna papira različitih granulacija. Slijed papira bio je od grubljih prema finijem:

1. P180
2. P320
3. P600
4. P1200

Oznaka daje informaciju o tome koliko je papir fin ili grub. Što je veći broj oznake granulacije papira to papir omogućava finiju obradu i daje glađu površinu uzorka nakon brušenja. Brušenje je trajalo otprilike 3 sata, a najviše vremena utrošeno je na grubo brušenje na P180 papiru. Na slici 38 prikazani su korišteni papiri različitih granulacija.



*Slika 37. Brusni papiri različitih granulacija*

### **6.3. Elektrokemijsko nagrizanje uzoraka za makroanalizu**

Nakon brušenja bilo je potrebno provesti postupak elektrokemijskog nagrizanja. Sam postupak je bilo potrebno izvesti prije makroanalize kako bi se poboljšala vidljivost mikrostrukture uzoraka. Tim postupkom se kasnije omogućuje bolji pregled i otkrivanje mikrostrukture, isticanje površinskih nedostataka, poboljšanje kontrasta, preciznija kontrola kvalitete materijala. Kod elektrokemijskog nagrizanja koristilo se :

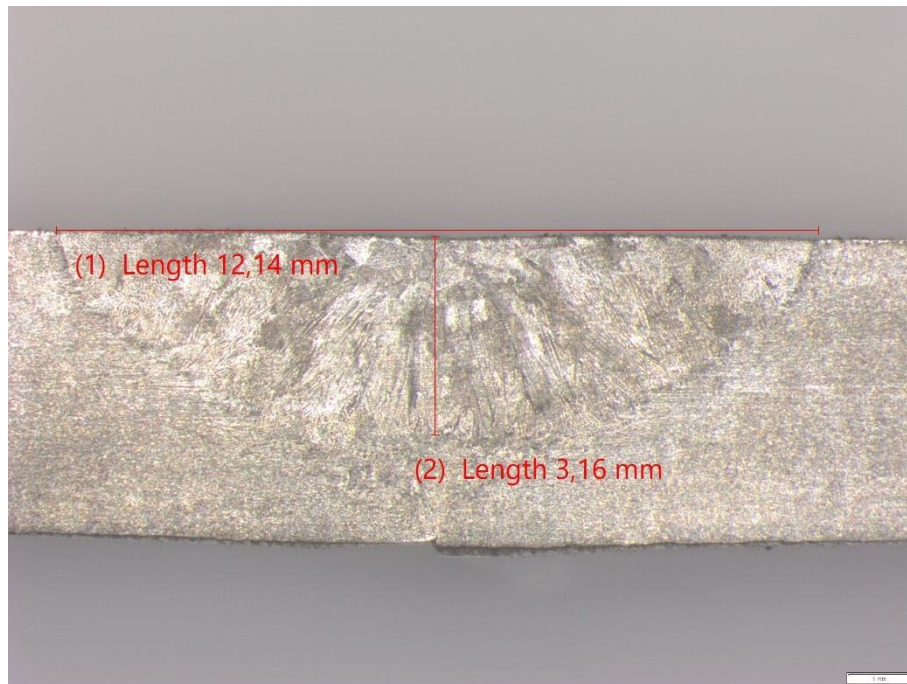
- voda,
- 19 % klorovodična – solna kiselina (HCl),
- baterija od 9 V,
- bakrena pločica,
- pol kleme,
- kliješta,
- petrijeva zdjelica,
- laboratorijska čaša,
- rukavice i naočale.

Prilikom postupka nagrizanja bakrena pločica spojena je na minus (-) pol baterije dok je ispitni uzorak koji se nagrizao bio spojeni na plus (+) pol baterije. Vrijeme nagrizanja uzorka trajalo je otprilike 1 minutu te je nakon toga uzorak stavljen u vodu kako bi se prekinula reakcija i kasnije je osušen na papiru.

## 6.4. Makroanaliza

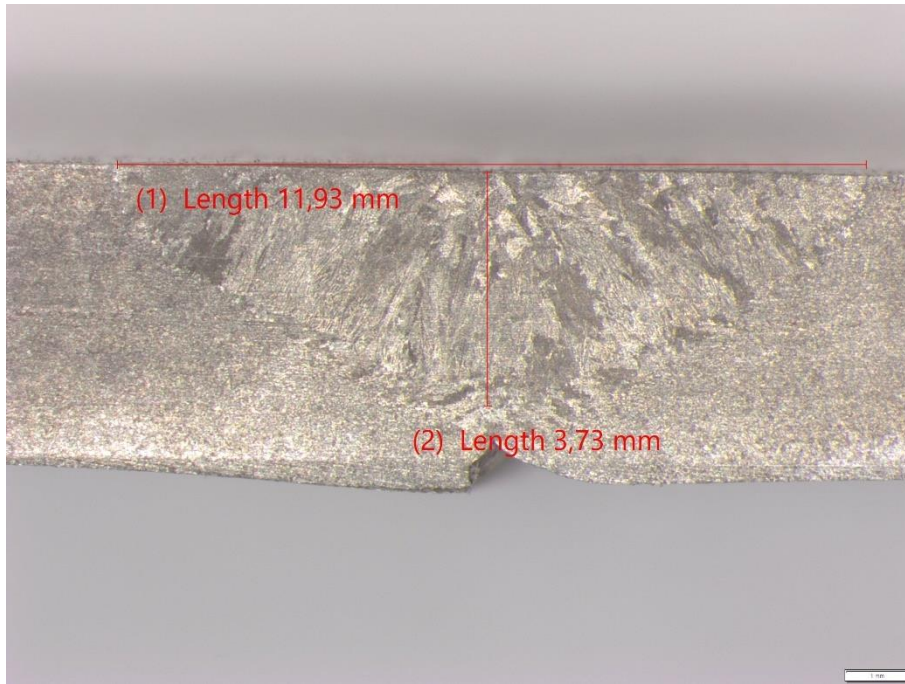
Makroanaliza uzoraka radila se na stereomikroskopu Olympus SZX10 povećanja 1,6 x 10, a program OLYMPUS Stream Essentials 2.5.2 koristio se za izradu i obradu slika uzoraka. Na svakom uzorku mjerena je širina lica i korijena te penetracija sa obje strane uzorka. Prva strana uzorka je bliža zavaru.

- UZORAK 1 – TIG zavarivanje



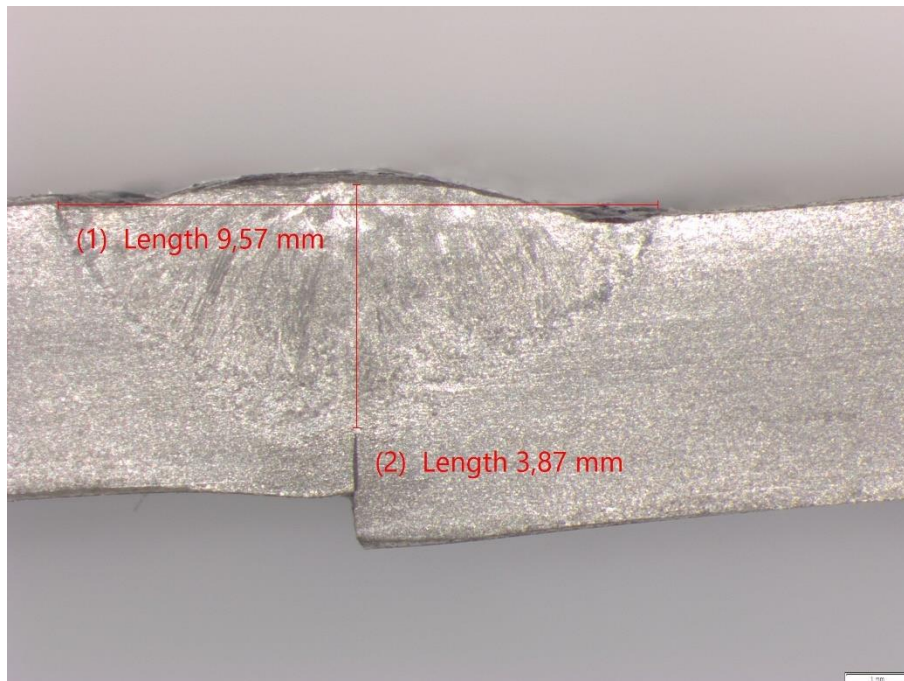
*Slika 38. Uzorak 1 - prva strana*



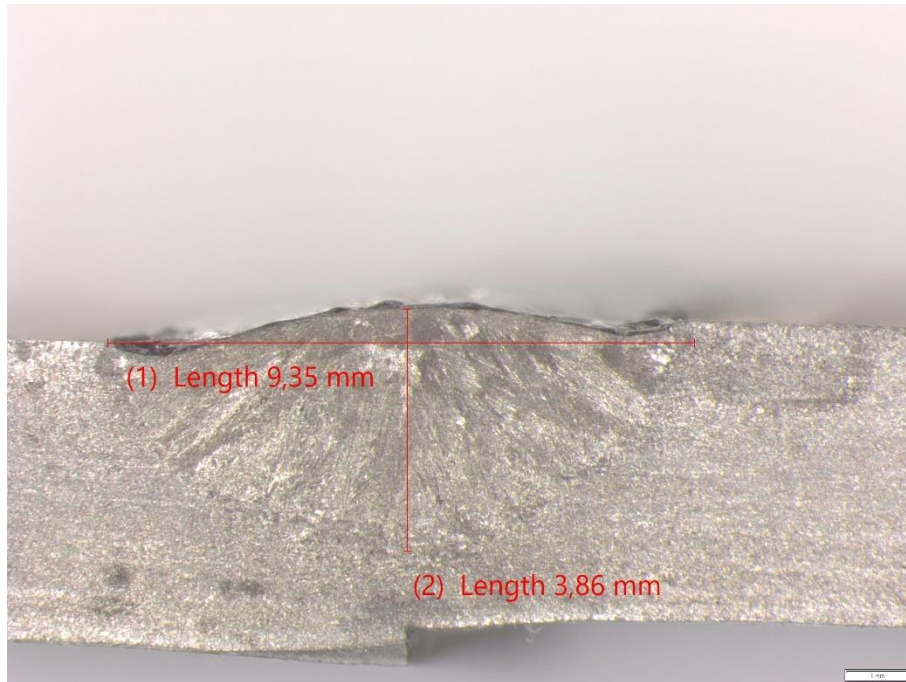


*Slika 39. Uzorak 1 - druga strana*

- UZORAK 2 – A – TIG zavarivanje s SiO<sub>2</sub> aktivacijskim premazom

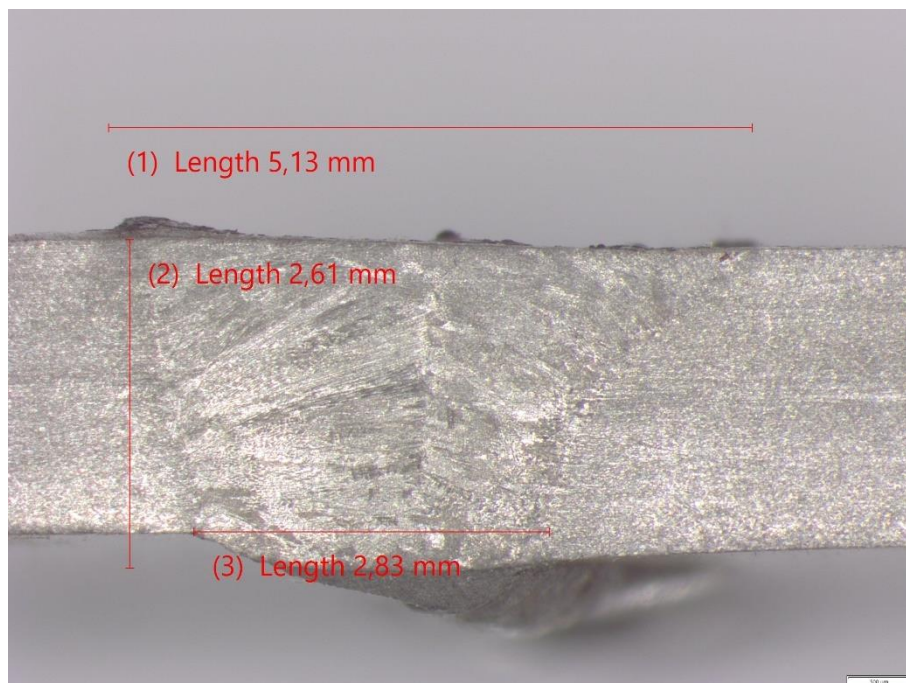


*Slika 40. Uzorak 2 - prva strana*

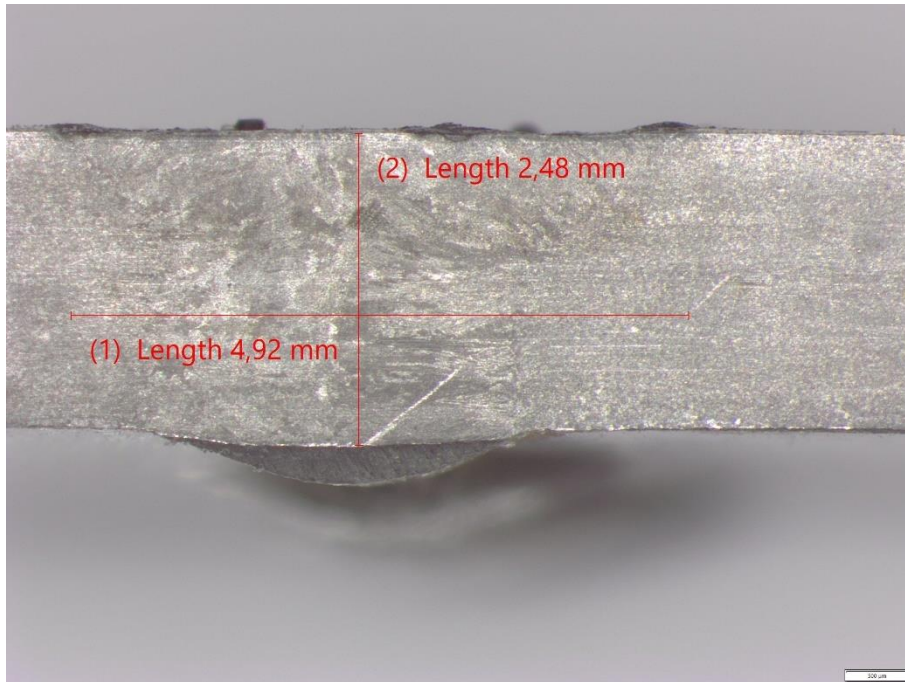


*Slika 41. Uzorak 2 - druga strana*

- UZORAK 3 – A – TIG zavarivanje s CaO aktivacijskim premazom

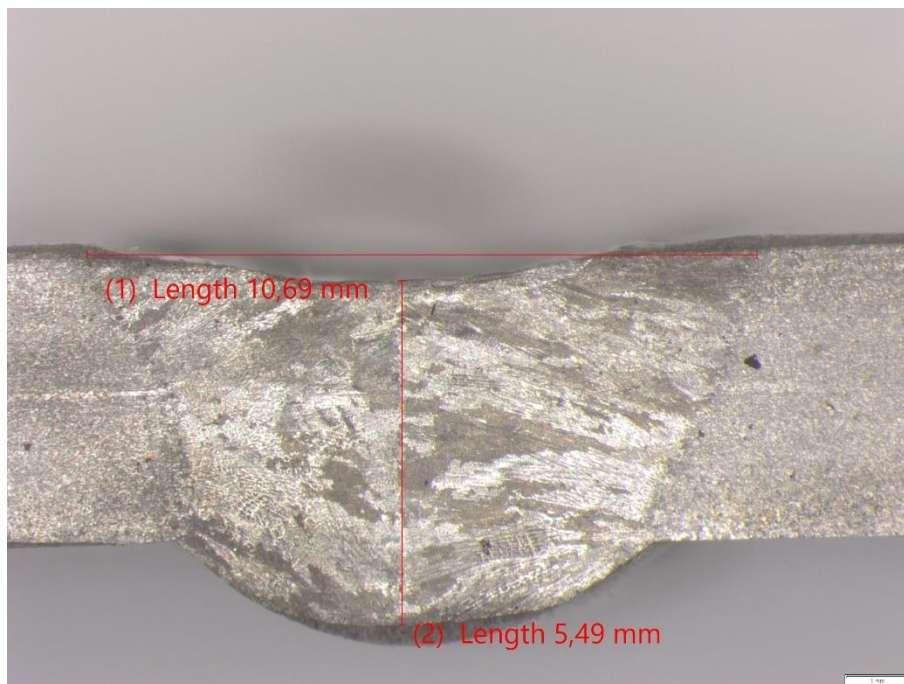


*Slika 42. Uzorak 3 - prva strana*

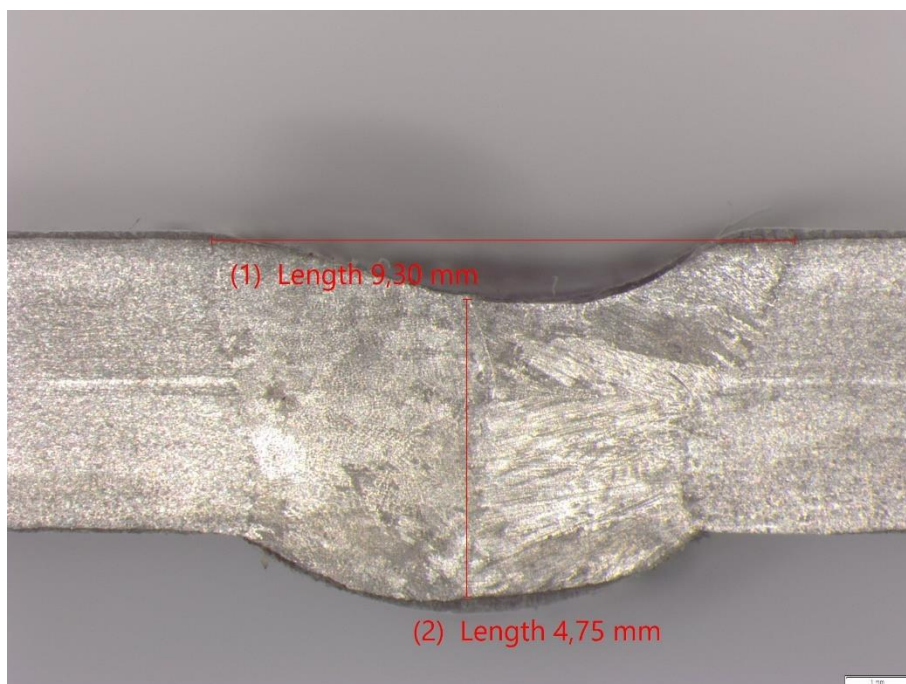


*Slika 43. Uzorak 3 - druga strana*

- UZORAK 4 – A – TIG zavarivanje s  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  aktivacijskim premazom



*Slika 44. Uzorak 4 - prva strana*



Slika 45. Uzorak 4 - druga strana

Tablica 11. Geometrijske značajke zavora

Broj uzorka		TIG/ A-TIG	Premaz	Širina lica, mm	Širina korijena, Mm	Penetracija, Mm
1	Prva strana	TIG	Bez	12,14	-	3,16
	Druga strana			11,93	-	3,73
2	Prva strana	A-TIG	SiO <sub>2</sub>	9,57	-	3,87
	Druga strana			9,35	-	3,86
3	Prva strana	A-TIG	CaO	5,13	2,83	potpuna
	Druga strana			4,92	-	Potpuna
4	Prva strana	A-TIG	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,69	7,66	Potpuna
	Druga strana			9,30	7,27	Potpuna

U tablici 11. prikazani su dobiveni podaci geometrijski značajki zavora. Kod uzorka 1 koji je zavaren TIG postupkom bez aktivacijskog premaza, vidljivo je da nije došlo do potpune penetracije odnosno nije došlo do provarivanja korijena. Isti rezultat vidljiv je i kod uzorka broj 2 na kojem se nanio aktivacijski premaz silicijevog oksida. U ovom slučaju došlo je do nadvišenja lica i nepotpune penetracije. Uzrok tome može biti neadekvatan ili neravnomjieran nanos samog premaza. Kao što je bilo navedeno u prethodnim poglavljima jedan od ključnih mehanizama u A- TIG zavarivanju je promjena površinske napetosti taline pomoću

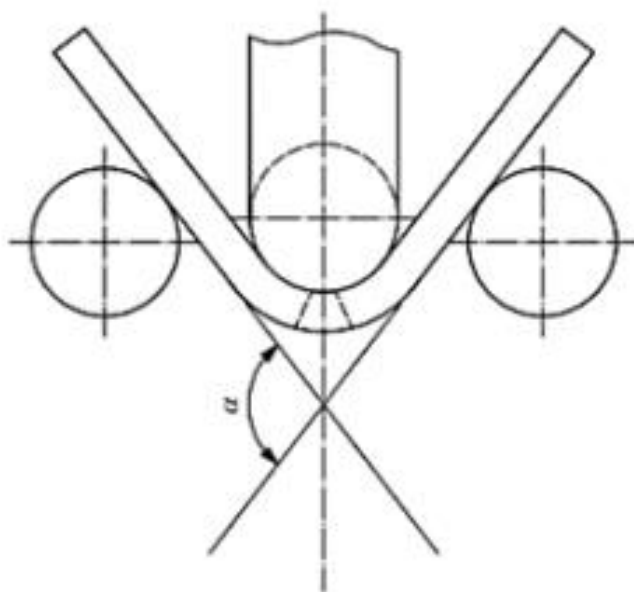
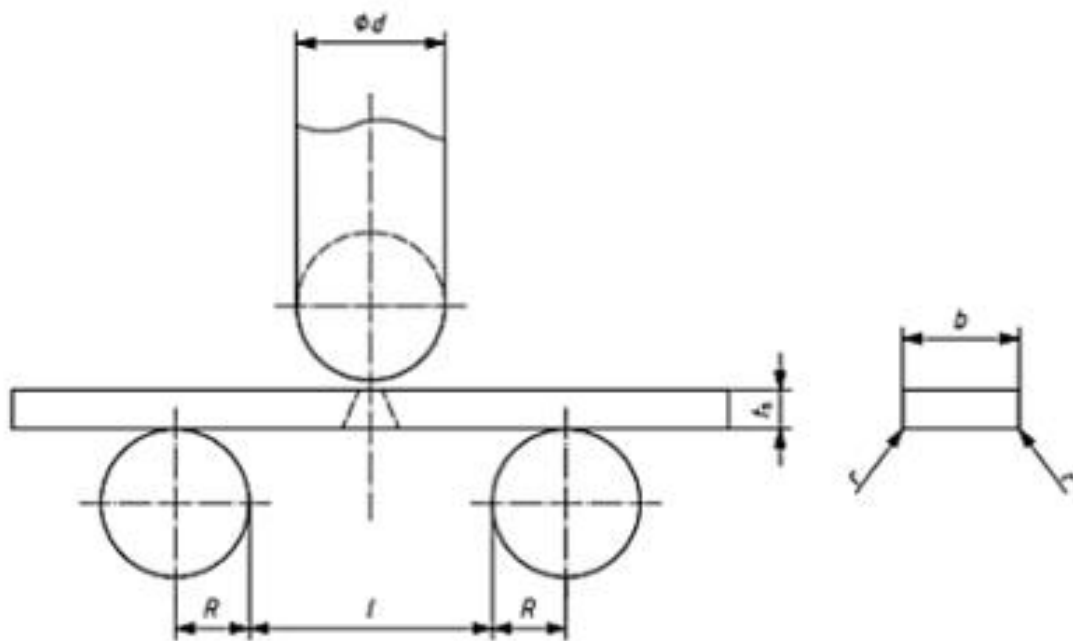
aktivacijskih premaza. Takvi premazi smanjuju površinsku napetost čime se omogućava dublja penetracija, no na uzorku 2 primjenom SiO<sub>2</sub> iz rezultata je vidljivo da nije došlo do dovoljnih promjena u napetosti taline što je rezultiralo da je talina ostala na površini bez potpunog prodiranja u korijen. Na uzorku 3 i 4 došlo je do potpune penetracije i nadvišenja korijena, dok je kod uzorka 4 još vidljivo ulegnuće do kojeg je vjerojatno došlo zbog nekorištenja dodatnog materijala.

### **6.5. Kontrola zavara savijanjem u 3 točke**

Na svakom zavarenom uzorku pomoću tračne pile izrezane su dvije epruvete za ispitivanje savijanja lica zavara i dvije epruvete za ispitivanje korijena zavara. Kontrola zavara savijanjem daje uvid u mehaničku čvrstoću zavarenih spojeva. Ispitivanje se radilo prema normi EN ISO 5173 (slika 47). Uzorci su se postavili na dva oslonca (valjka). Trn odnosno opterećenje se postavilo iznad uzorka na sredinu zavarenog spoja i između dva valjka te se polako primjenjivala sila prema dolje. Uzorak se počeo savijati, a mjerilo se opterećenje potrebno da dođe do deformacije ili loma uzorka. Parametri ispitivanja dani su u tablici 12.

*Tablica 12. Parametri kontrole savijanja u 3 točke*

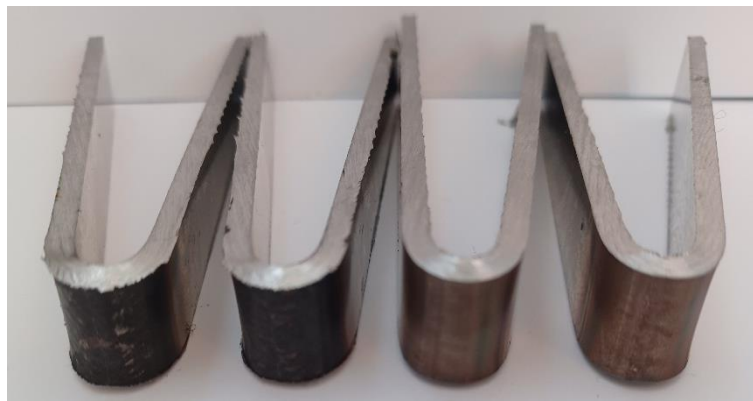
Širina epruvete, mm	<b>14</b>
Promjer trna, mm	<b>6</b>
Promjer valjka, mm	<b>55</b>
Razmak između valjaka, mm	<b>65</b>



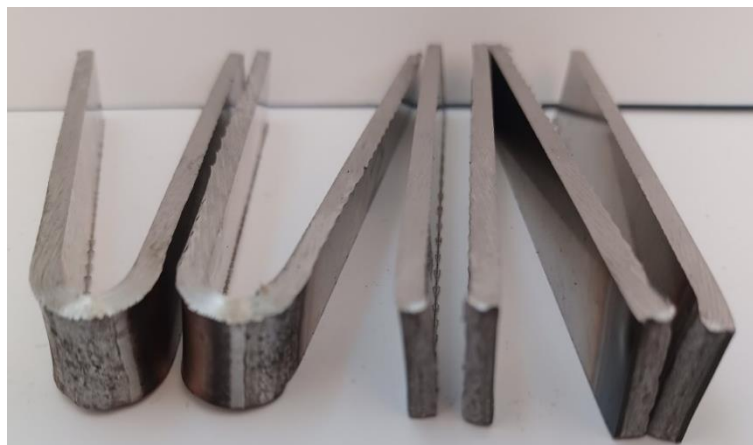
$$d + 2r_s + 3u \quad l \quad u \quad d + 3r_s$$

Slika 46. Shema kontrole savijanja u 3 točke

Slike 48, 49, 50 i 51 prikazuju izgled epruveta nakon što se provelo ispitivanje savijanja do 180 stupnjeva bez pojave pukotine ili do opterećenja koje uzrokuje pojavu pukotine. Na prvoj i drugoj epruveti prikazano je savijanje lica a na trećoj i četvrtoj savijanje korijena (s lijeva na desno). Iz slika je vidljivo da kod uzoraka 1 i 3 nema prekida što nam pokazuje da su zavari dobrih mehaničkih svojstva. Iz slike je vidljivo da je kod uzorka 2 došlo do pucanja uzorka kod savijanja korijena uzorka čime se može zaključiti da uzorak nije uspješno provaren. S druge strane kod uzorka 4 došlo je do pucanja uzorka kod savijanja lica čime se također može zaključiti da uzorak nije uspješno provaren.



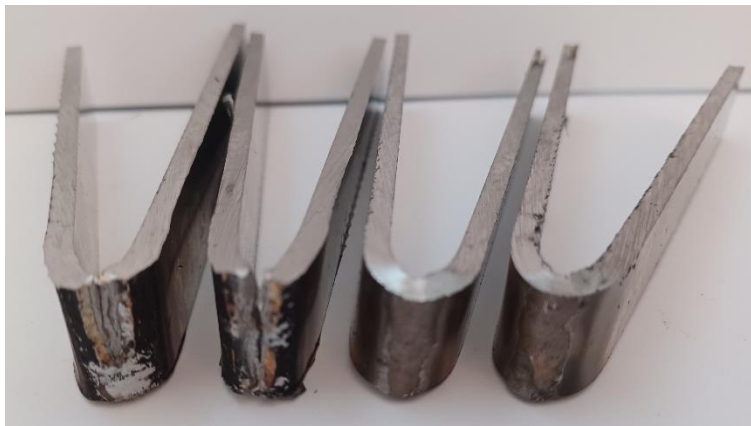
*Slika 47. Epruvete iz uzorka 1 nakon ispitivanja savijanjem u 3 točke*



*Slika 48. Epruvete iz uzorka 2 nakon ispitivanja savijanjem u 3 točke*



*Slika 49. Epruvete iz uzorka 3 nakon ispitivanja savijanjem u 3 točke*



*Slika 50. Epruvete iz uzorka 4 nakon ispitivanja savijanjem u 3 točke*



## 7. ZAKLJUČAK

Nehrđajući čelici su legure željeza s minimalno 12 % kroma što im osigurava otpornost na koroziju. Zbog svojih svojstava kao što su izdržljivost, dugotrajnost i lako održavanje koriste se u raznim industrijama. Iako su otporni na koroziju, tijekom zavarivanja može doći do promjene njihove mikrostrukture što može utjecati na njihovu otpornost na koroziju, mehanička svojstva i kvalitetu zavarenog spoja.

U ovom diplomskom radu obrađena je konvencionalna tehnika TIG postupka i njegova poboljšana inačica postupka, A – TIG postupak zavarivanja. A – TIG postupak se izvodi uz primjenu aktivacijskih premaza čija bi svrha trebala biti povećanje produktivnosti zavarivanja odnosno povećanje penetracije.

Kako bi se izbjegla ljudska greška kod zavarivanja sve više se uvodi automatizacija postupka TIG zavarivanja. Upravo se u našem eksperimentalnom radu provodio takav postupak u kojem se pomoću uređaja za automatsko vođenje zavarivao osnovni materijal od nehrđajućeg čelika AISI 304.

Cilj rada bio je usporediti rezultate standardnog TIG postupka i A – TIG postupka. Zavarena su 4 uzorka s jednim različitim parametrom. Parametri kao što su jakost struje i brzina zavarivanja bili su konstantni kroz cijeli eksperiment. Jedini promjenjiv parametar bio je aktivacijski premaz.

Na uzorku 1 nije se nanio aktivacijski premaz već se uzorak zavarivao TIG postupkom. Na uzorak 2 nanio se aktivacijski premaz s praškastom komponentom  $\text{SiO}_2$  i alkoholom u odgovarajućim omjerima. Na uzorak 3 nanio se aktivacijski premaz s praškastom komponentom  $\text{CaO}$  i alkoholom dok se na uzorak 4 nanio aktivacijski premaz s praškastom komponentom  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  i alkoholom.

Nakon zavarivanja napravila se makroanaliza zavarenih uzoraka. Prema dobivenim rezultatima vidljivo je da kod zavarivanja bez aktivacijskog premaza nije došlo do potpune penetracije. Na uzorku 2, iako je na njega bio nanesen aktivacijski premaz, također nije došlo do potpune penetracije već je vidljivo samo nadvišenje lica. Jedan od razloga tome mogao bi biti nepravilan i neravnomjeran nanos aktivacijskog premaza na uzorak. Kod uzoraka 3 i 4 vidljive su potpune penetracije i nadvišenja korijena.

Analizom se može zaključiti da svaki korišteni premaz daje različitu kvalitetu zavarenog spoja. Prema dobivenim rezultatima može se zaključiti da se primjenom aktivacijskog premaza povećava penetracija u odnosu na bez premaza no da bi se dobili kvalitetni zavari potrebna je pravilna primjena A – TIG postupka. Prema našim rezultatima na uzorku 2 vidljivo je da je došlo do nepravilnosti u nanosu premaza ili odabiru parametara jer nismo dobili potpunu penetraciju kakvu smo očekivali, dok smo kod uzoraka 3 i 4 potvrdili pretpostavku povećanja produktivnosti A – TIG postupka.

Kod kontrole savijanja uzoraka vidljivo je iz rezultata da je uzorak 1 koji je zavaren TIG postupkom dao zavar dobrih mehaničkih svojstva jer nije došlo do pucanja. Na uzorcima s različitim aktivacijskim premazima vidljive su razlike u rezultatima nakon provedenog ispitivanja savijanjem. Na uzorku 3 s CaO premazom nije došlo do pucanja te su time dokazana dobra mehanička svojstva zavarenog spoja. Uzorci 2 i 4 su pukli prilikom ispitivanja na različitim mjestima (uzorak 2 prilikom savijanja korijena, a uzorak 4 prilikom savijanja lica). Razlika u mjestu pucanja kod uzoraka ukazuje na to da je struktura i kvaliteta zavara različita u licu i korijenu zavara. Pucanje lica može pokazati slabosti u površinskom dijelu zavara pod vlačnim napreznjima, dok pucanje korijena pokazuje na unutarnje napetosti ili defekte u zoni zavara pod tlačnim napreznjima. Ovi rezultati pokazuju da se kvaliteta zavara mora pažljivo kontrolirati kroz cijeli profil zavara, kako bi se izbjegle slabosti u bilo kojem dijelu što može biti uzrok većih napreznja jer različiti premazi iako povećavaju penetraciju oni mogu imati različite učinke na strukturu metala.

## 8. LITERATURA

- [1] Harold M Cobb, ASM International: The history of stainless steel, ASM International 2010.
- [2] <https://www.xometry.com/resources/materials/what-is-stainless-steel/>, dostupno 10.06.2024
- [3] <https://www.cmpionline.com/what-makes-stainless-steel-different-from-other-metals>, dostupno 10.06.2024
- [4] <https://www.thermofisher.com/blog/metals/what-is-stainless-steel-part-i/>, dostupno 12.06.2024
- [5] <https://matmatch.com/learn/material/ferritic-stainless-steel>, dostupno 12.06.2021
- [6] <https://proinstal.hr/vrste-i-vrste-nehrdajućeg-čelika-potpuni-vodic/>, dostupno 15.06.2024
- [7] Babić, Nikola: A – TIG zavarivanje duplex čelika, Diplomski rad , Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje
- [8] <https://matmatch.com/learn/material/austenitic-stainless-steel>, dostupno 20.06.2021
- [9] <https://matmatch.com/learn/material/martensitic-stainless-steel>, dostupno 20.06.2021
- [10] <https://www.xometry.com/resources/materials/precipitation-hardening-stainless-steel/>, dostupno 20.06.2024
- [11] Filetin T., Kovačiček F., Indof J.: Svojstva i primjena materijala, Sveučilište u Zagrebu 2009.
- [12] Proces proizvodnje : Handbook of Stainless Steel, Outokumpu
- [13] <https://tinyurl.com/2mlv7j6e>, dostupno 17.06.2024
- [14] <https://www.reliance-foundry.com/blog/stainless-steel-production>, dostupno 17.06.2024
- [15] <https://www.marlinwire.com/blog/how-is-stainless-steel-made>, dostupno 17.06.2024
- [16] Holmberg B.: Stainless Steels. Their properties and their suitability for welding, 2008.
- [17] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/schaeffler-diagram>, dostupno 17.06.2024
- [18] Lippold J.C., Kotecki D.J.: Welding metallurgy and weldability of stainless steel, 2005.

- [19] <https://www.laser-ing.hr/blog/oznacavanje-celika-prema-en-normi/>, dostupno 14.08.2024
- [20] <https://sanyosteel.com/files/EN/EN%2010027-1.pdf>, dostupno 14.08.2024
- [21] <https://primeweld.com/blogs/news/the-evolution-of-tig-welding>, dostupno 17.06.2024
- [22] ISO 4063 : 2009 – Welding and allied processes – Nomenclature of processes and reference numbers, BSI, 2009
- [23] W. Lucas: TIG and PLASMA Welding, Process techniques, recommended practices and applications, 1990.
- [24] Muncaster Peter W.: Practical TIG (GTA) welding, A survey of the process and equipment, 1991.
- [25] Horvat, M., Kondić, V. I Brezovački, D.: Teorijske i praktične osnove TIG postupka zavarivanja. Tehnički glasnik, Vol. 8 No. 4 (2014), str. 426 – 432
- [26] <https://www.thefabricator.com/thewelder/article/arcwelding/gas-tungsten-arc-welding-fundamentals-understanding-gtaw>, dostupno 20.06.2021
- [27] <https://ipo-tools.hr/blog-odabir-prave-wolfram-elektrode/>, dostupno 20.06.2024
- [28] Trubelja Ivan: A-TIG zavarivanje bakra, Diplomski rad, Sveučilište Sjever, 2022.
- [29] <https://www.sunbeltrentals.com/resources/blog/industrial-tool/tig-welding-applications/>, dostupno 20.06.2021
- [30] <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/682367>, dostupno 20.06.2021
- [31] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/an-investigation-into-arc-constriction-by-active-fluxes-for-tig-a-tig-welding-2000>, dostupno 17.06.2024
- [32] Pongrac Dario: Utjecaj aktivacijskog premaza na mehanička i korozivna svojstva zavarenog spoja, Diplomski rad, Sveučilište Zagreb, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2015.
- [33] Bhavin Shah: A-TIG Welding Process- A Review Paper, International Conference on Ideas, Impact and Innovation in Mechanical Engineering, Volume: 5 Issue: 6, 2017.
- [34] Obelić, Luka: A – TIG zavarivanje bakra i legura bakra, Diplomski rad, Sveučilište Sjever, 2020.

[35] [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 01.10. 2024.

## POPIS SLIKA

Slika 1. Mikrostruktura feritnih nehrđajućih čelika [7].....	3
Slika 2. Mikrostruktura austenitnih nehrđajućih čelika [7].....	4
Slika 3. Mikrostruktura martenzitnih nehrđajućih čelika [7] .....	5
Slika 4. Mikrostruktura duplex nehrđajućeg čelika [7].....	6
Slika 5.Schaefflerov dijagram [16] .....	9
Slika 6. Označavanje čelika prema europskoj normi [19].....	11
Slika 7. Dijelovi TIG sustava zavarivanja [23] .....	15
Slika 8. Pravilni položaj elektrode i dodatnog materijala tijekom zavarivanja [25] .....	16
Slika 9. Prikaz tehnike izvođenja TIG zavarivanja [25] .....	17
Slika 10. Strmo padajuća karakteristika izvora struje kod TIG zavarivanja [25] .....	19
Slika 11. Usporedba zavara upotrebom različitih zaštitnih plinova (argona i helija) [26].....	20
Slika 12. Volframove elektrode [28] .....	21
Slika 13. Različite vrste oštrenja elektronskih vrhova [27].....	23
Slika 14. Usporedba TIG i A-TIG postupka zavarivanja [30] .....	26
Slika 15. Usporedba TIG(gornja slika) i A-TIG(donja slika) postupka zavarivanja [30].....	27
Slika 16. Koraci u izradi i nanošenju premaza na radni komad [32] .....	29
Slika 17. Mehanizam suženja električnog luka [30] .....	30
Slika 18. Marangonijev efekt strujanja fluida – a) negativan TKPN, b) pozitivan TKPN [30]31	
Slika 19. Lim - AISI 304 .....	33
Slika 20. Izvor struje - uređaj VARTIG 2005 AC/DC.....	35
Slika 21. Argon 4.8.....	35
Slika 22. Pištolj za TIG zavarivanje .....	36
Slika 23. Dijelovi pištolja za zavarivanje (zaštitna kapa, vodilica, elektroda i sapnica).....	36
Slika 24. Netaljiva volframova elektroda s dodatkom lantana.....	37
Slika 25. Keramička sapnica .....	37
Slika 26. Aktivacijski premazi na uzorcima (s lijeva na desno) - SiO <sub>2</sub> , CaO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	38
Slika 27. Dijelovi uređaja Rail Bull Promotech [35] .....	39
Slika 28. Lice zavara uzorka 1 .....	40
Slika 29. Korijen zavara uzorka 1 .....	40
Slika 30. Lice uzorka 2.....	41
Slika 31. Lice uzorka 3.....	41

Slika 32. Korijen uzorka 3.....	41
Slika 33. Lice uzorka 4.....	42
Slika 34. Korijen uzorka 4.....	42
Slika 35. Skica pripremljenog uzorka za makroanalizu.....	43
Slika 36. Uređaj za brušenje PRESI Minitech 250 SP1.....	44
Slika 37. Brusni papiri različitih granulacija.....	45
Slika 38. Uzorak 1 - prva strana.....	46
Slika 39. Uzorak 1 - druga strana.....	47
Slika 40. Uzorak 2 - prva strana.....	47
Slika 41. Uzorak 2 - druga strana.....	48
Slika 42. Uzorak 3 - prva strana.....	48
Slika 43. Uzorak 3 - druga strana.....	49
Slika 44. Uzorak 4 - prva strana.....	49
Slika 45. Uzorak 4 - druga strana.....	50
Slika 46. Shema kontrole savijanja u 3 točke.....	52
Slika 47. Epruvete iz uzorka 1 nakon ispitivanja savijanjem u 3 točke.....	53
Slika 48. Epruvete iz uzorka 2 nakon ispitivanja savijanjem u 3 točke.....	53
Slika 49. Epruvete iz uzorka 3 nakon ispitivanja savijanjem u 3 točke.....	54
Slika 50. Epruvete iz uzorka 4 nakon ispitivanja savijanjem u 3 točke.....	54

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Glavna oznaka označavanja čelika [19] .....	12
Tablica 2. Podjela obrade čelika [19] .....	13
Tablica 3. Usporedna tablica europskog i američkog načina označavanja čelika [19] .....	13
Tablica 4. Karakteristike TIG zavarivanja primjenom različitih struja [25] .....	18
Tablica 5. Usporedba karakteristika zavarivanja kod različitih zaštitnih plinova [25] .....	20
Tablica 6. Pregled preporučenih parametara zavarivanja [27] .....	23
Tablica 7. Kemijska sastav osnovnog materijala.....	34
Tablica 8. Mehanička svojstva osnovnog materijala.....	34
Tablica 9. Karakteristike uređaja VARTIG 2005 AC/DC [34].....	34
Tablica 10. Parametri zavarivanja .....	40
Tablica 11. Geometrijske značajke zavara .....	50
Tablica 12. Parametri kontrole savijanja u 3 točke .....	51