

# Analiza mikrostrukture sučeono zavarenog spoja cijevi ostvarenog TIG postupkom

---

Štimac, Norman

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Metallurgy / Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:115:147281>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-03**



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET  
UNIVERSITY OF ZAGREB  
FACULTY OF METALLURGY

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb - Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

Norman Štimac

ZAVRŠNI RAD

Sisak, srpanj 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

Norman Štimac

ANALIZA MIKROSTRUKTURE SUČEONO ZAVARENOG SPOJA CIJEVI OSTVARENOG  
TIG POSTUPKOM

ZAVRŠNI RAD

Voditelj: doc. dr. sc. Martina Lovrenić-Jugović  
Stručni voditelj: Željko Grubišić, mag.ing.met.

Članovi Povjerenstva za ocjenu i obranu završnog rada:

prof. dr. sc. Stjepan Kožuh - predsjednik  
doc. dr. sc. Martina Lovrenić-Jugović - član  
prof. dr. sc. Zoran Glavaš - član  
izv. prof. dr. sc. Ljerka Slokar Benić - zamjenski član

Sisak, srpanj 2019.

## *Zahvala*

*Ovim putem zahvaljujem se svima koji su svojim savjetima i prijedlozima pomogli u izradi ovog rada. Hvala mojoj obitelji i prijateljima na velikoj podršci tijekom studiranja. Posebna zahvala ide mojoj voditeljici doc. dr. sc. Martini Lovrenić-Jugović i Željku Grubišiću mag. ing. met. na pomoći, vodstvu i strpljenju koju su mi pružili.*



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

UNIVERSITY OF ZAGREB  
FACULTY OF METALLURGY

IME: NORMAN

PREZIME: ŠTIMAC

MATIČNI BROJ: LJ-15-2

Na temelju članka 19. stavak 2. Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu dajem sljedeću

## IZJAVU O IZVORNOSTI

Izjavljujem da je moj završni / diplomski / doktorski rad pod naslovom:

ANALIZA MIKROSTRUKTURE SUČEONO ZAVARENOG SPOJA CIJEVI

OSTVARENOG TIG POSTUPKOM

izvorni rezultat mojeg rada te da se u izradi istoga nisam koristio drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Sisak, 15. srpnja 2019.

Norman Štimac  
(vlastoručni potpis)

*Izrazi koji se koriste u ovoj Izjavi, a imaju rodno značenje, koriste se neutralno i odnose se jednako i na ženski i na muški rod.*

## SAŽETAK

### ANALIZA MIKROSTRUKTURE SUČEONO ZAVARENOG SPOJA CIJEVI OSTVARENOG TIG POSTUPKOM

U ovome radu napravljen je teorijski pregled postupaka elektrolučnog zavarivanja s detaljnim opisom postupka elektrolučnog zavarivanja netaljivom elektrodom pod zaštitom inertnog plina. Opisan je osnovni princip elektrolučnog zavarivanja te je istaknut utjecaj ključnih parametara na kvalitetu zavarenog spoja. Navedeni su uređaji i vrste elektroda koji se primjenjuju kod elektrolučnog zavarivanja s netaljivom elektrodom pod zaštitom inertnog plina.

U eksperimentalnom dijelu rada provedena je metalografska analiza mikrostrukture sučeono zavarenog spoja cijevi i redukcije. Iz zavarenog spoja cijevi izrezani su ispitni uzorci iz četiri različite zone koje obuhvaćaju oba osnovna materijala cijevi, zonu taljenja i zonu utjecaja topline. Nakon rezanja ispitni uzorci su u uređaju za vruće izostatsko prešanje uloženi u praškastu vodljivu masu, nakon čega su brušeni, polirani i nagriženi nitalom kako bi se provela metalografska analiza. Provedenim metalografskim ispitivanjima zaključilo se da zona utjecaja topline ima sitnozrnatu strukturu, a zona taljenja lijevanu strukturu.

**Ključne riječi:** elektrolučno zavarivanje, TIG postupak, sučeoni spoj, mikrostruktura

## SUMMARY

### MICROSTRUCTURAL ANALYSIS OF WELDED JOINED PIPES ACHIVED BY TIG PROCEDURE

This paper provides a theoretical overview of welding procedures with a detailed description of the arc welding procedure with infusible electrode protected by inert gas. The basic principle of arc welding is described and the influence of key parameters on the quality of the welded joint is emphasized. The devices and types of electrodes that are used for electrostatic welding with an inert gas protection are listed.

In the experimental part, a metallographic analysis of the microstructure of the welded pipe and reduction welds was performed. From the welded tube joint, test samples were cut out of four different zones, covering both of the basic materials, the melting zone and the heat transfer zone. After cutting, the test samples were placed in a hot isostatic press with a powdered conductive mass, after which they were crushed, polished and eroded with nital to perform metallographic analysis. The metallographic investigations carried out concluded that the zone of heat influence has a fine-grained structure and the melted zone has the cast structure.

**Key words:** arc welding, TIG process, butt joint, microstructure

# SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1. Općenito o zavarivanju .....	2
2. ELEKTROLUČNO ZAVARIVANJE .....	6
2.1. TIG postupak zavarivanja.....	7
3. ČELIK I ČELIČNE CIJEVI.....	17
3.1. Čelik.....	17
3.2. Čelične cijevi .....	18
3.3. Označavanje cijevnih linija .....	19
4. EKSPERIMENTALNI DIO.....	21
4.1. Postupak pripreme i zavarivanja cijevi .....	21
4.2. Postupak rezanja zavarene cijevi .....	23
4.3. Postupak pripreme uzoraka za metalografsku analizu .....	27
5. REZULTATI I RASPRAVA .....	30
6. ZAKLJUČAK .....	34
7. LITERATURA .....	35

# 1. UVOD

Zavarivanje je postupak spajanja materijala koji je danas u širokoj upotrebi zbog svoje jednostavnosti, pouzdanosti i niskih troškova. Primjena zavarenih spojeva kod izrade strojnih dijelova i metalnih konstrukcija stalno raste, jer postupci zavarivanja postaju sve učinkovitiji i danas je već moguće postići da mehanička svojstva zavarenih spojeva budu jednaka onim osnovnog materijala.

Zavarene komponente u svojoj eksploataciji izložene su vrlo širokom spektru temperatura, agresivnim medijima, udarnom i dinamičkom opterećenju, te različitim kombiniranim opterećenjima. Zavarene konstrukcije su skoro nezaobilazne u kemijskoj industriji, gdje je potrebno upotrijebiti materijale postojeće na višim i nižim temperaturama, koji moraju istovremeno imati odgovarajuću čvrstoću i žilavost, te biti otporni na koroziju. Posebni zahtjevi postavljaju se kod zavarivanja cjevovoda te u nuklearnoj tehnici [1, 2].

U pogonima naftne industrije čest je slučaj primjene cjevovoda u kojem su cijevi sučeono zavarene. Također je česta i redukcija promjera što je istaknuto na slici 1, gdje su redukcija cijevi i sučeono zavareni spoj izvedeni na ulazu u centrifugalnu pumpu.



Slika 1. Primjer ekscentrične redukcije sučeono zavarenog spoja na ulaznom cjevovodu jednostupanjske centrifugalne pumpe

Glavna uloga centrifugalne pumpe u Rafineriji nafte Sisak, koja radi na principu jednog rotora (jedan stupanj) je da dio tekućeg naftnog plina tlači na kolonu T-5404 radi održavanja temperature na vrhu kolone. Druga uloga pumpe je izvlačenje tekućeg naftnog plina iz posude i njegovo tlačenje na KP-6 tj. Merox, gdje se vrši njegova daljna obrada.



Namjena redukcija u cijevnom transportu je da se promjenom poprečnog presjeka cijevi dimenzijski prilagode uređajima ili da se ostvare potrebne brzine protoka. Dok je svrha njihovog zavarenog spoja ta da može izdržati potrebni narinuti tlak i radne uvjete u kojima je i prisutnost udarnog i dinamičkog opterećenja velika.

Cijev s redukcijom, prikazana na slici 2, je jedna od komponenti cjevovoda čija je uloga promijeniti veličinu unutarnjeg promjera cijevi s većeg na manji promjer. Duljina redukcije kreće se obično oko prosječne vrijednosti većeg i manjeg promjera cijevi [3].

Redukcije kod cijevi mogu biti [3]:

- koncentrične redukcije (slika 2a),
- ekscentrične redukcije (slika 2b).



Slika 2. Redukcija: a) koncentrična [4], b) ekscentrična [5].

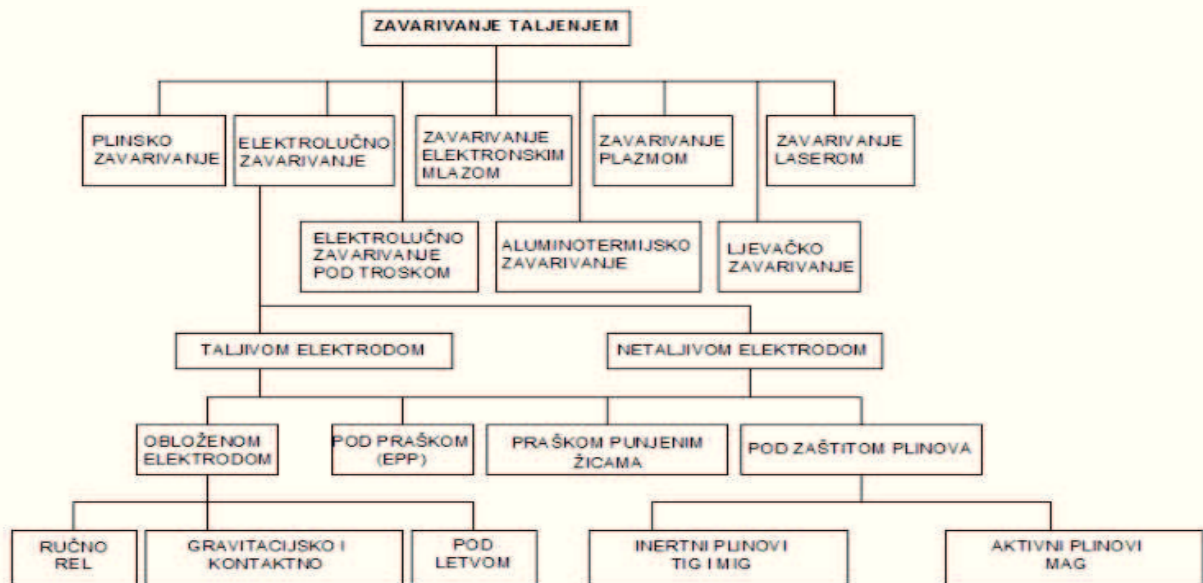
Redukcije su obično koncentrične, no kada je potrebno održati istu razinu medija na vrhu ili dnu cijevi, koriste se ekscentrične redukcije. One omogućavaju promjenu veličine cijevi u skladu s hidrauličnim zahtjevima protoka sustava ili prilagođavanjem postojećim cjevovodima različite veličine [3].

Iz razloga što tijekom procesa zavarivanja dolazi do velikog lokalnog unosa topline te brzog hlađenja u ovom radu napravljena je analiza mikrostrukture sučeono zavarenog spoja cijevi, kod koje jedna strana cijevi ima redukciju poprečnog presjeka.

### 1.1. Općenito o zavarivanju

Zavarivanje je spajanje dvaju istorodnih ili raznorodnih materijala u svrhu postizanja homogenog spoja. Homogeno zavarenim spojem možemo nazvati spoj bez pogrešaka sa zahtijevanom kvalitetom, odnosno mehaničkim i ostalim svojstvima. Spajanje materijala može se postići pritiskom ili taljenjem, sa ili bez dodatnog materijala. Tijekom procesa zavarivanja spajaju se područja u kojima se materijali dovode u tekuće ili plastično stanje. Zavarivanjem se može postići homogen spoj različitih metala (bakar, aluminij, čelik i njihove legure) [6].

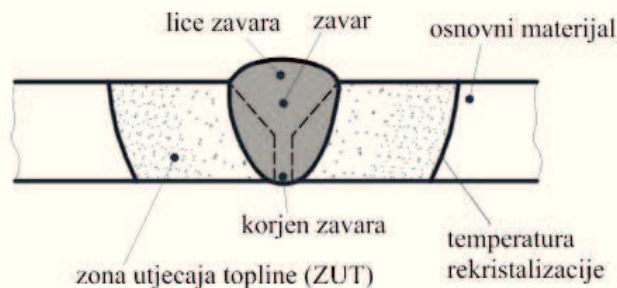
Podjela postupaka zavarivanja taljenjem je prikazana na slici 3. U ovom su radu cijevi sučeno zavarene elektrolučnim postupkom zavarivanja, netaljivom elektrodom uz dodatak materijala pod zaštitom inertnog plina (TIG postupak).



Slika 3. Podjela postupaka zavarivanja taljenjem [7].

Nakon postupka zavarivanja zavareni spoj čini neraskidivu cjelinu, jer se zavareni spojevi temelje na kohezijskim silama u zavaru. Obzirom na način nastanka kohezijskih sila u zavarenom spoju, razlikuju se:

- zavarivanje toplinskom energijom (zavarivanje taljenjem, slika 4),
- zavarivanje s mehaničkom energijom, toplo i hladno [1].



Slika 4. Y zavar nastao taljenjem [1].

Elementi zavarenog spoja postignutog postupkom zavarivanja taljenjem su osnovni materijal, zona utjecaja topline (ZUT) i zona taljenja (ZT), u kojoj se prema slici 4 nalazi zavar, lice zavara i korijen. Do neispravnosti zavarenog spoja može doći u slučaju slabljenja samo jednog područja u zoni zavarenog spoja.

Zavarljivost je svojstvo materijala da se zavarivanjem njegovih dijelova ostvari kontinuirani zavareni spoj, koji svojim svojstvima udovoljava predviđenim uvjetima i vijeku primjene [6].

Ako je standardnom opremom i procesom zavarivanja moguće ostvariti upotrebljiv spoj, pri čemu je ponovljivost postupaka vrlo visoka, može se reći da materijal ima svojstvo dobre zavarljivosti. Zavarljivost se procjenjuje prema određenim zahtjevima, a to su [6]:

- zadovoljavajuća krhkost,
- postotak ugljika što manji jer utječe na porast tvrdoće, zakaljivosti i krhkosti,
- zadovoljavajuća žilavost osnovnog materijala i nakon zavarivanja.

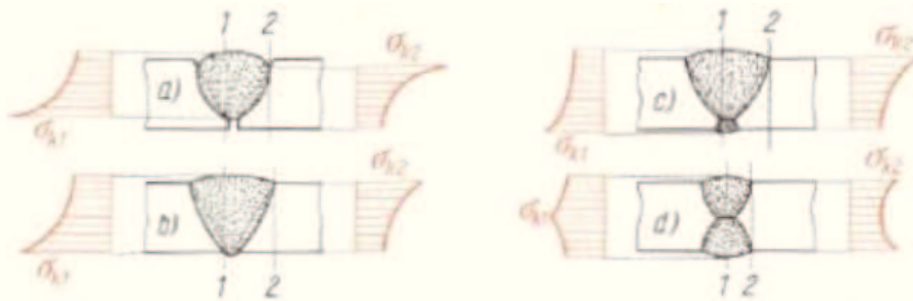
Pri zavarivanju taljenjem na mjestu spoja dolazi do stapanja taline osnovnog i dodatnog materijala. Materijal u zavarenom spoju ima strukturu lijevanog materijala, koja nakon otvrdnjavanja tvori čvrst i nerastavljiv spoj. Zbog brzog lokalnog zagrijavanja i hlađenja, gdje velik dio topline prelazi u osnovni materijal, u okolini zavara dolazi do promjene mikrostrukture osnovnog materijala. To se područje naziva zona utjecaja topline (ZUT). U tom području zbog promjene mikrostrukture može doći do slabljenja zavarenoga spoja [1].

Analizirane cijevi u ovom radu zavarene su TIG postupkom zavarivanja, i to primjenom sućeonog V spoja. Tablicom 1 prikazane su najčešće korištene vrste i oblici taljenih zavara.

Tablica 1. Vrste i oblici taljenih zavara [1]

Naziv zavara	Oznaka	Priprema	Izvedba	Naziv zavara	Oznaka	Priprema	Izvedba
<b>Sučeonni spojevi</b>							
Zavar s ivicom				Polovični Y zavar			
I zavar				Dvostruki Y zavar			
V zavar				K zavar			
Polovični V zavar				U zavar			
Široki V zavar				Dvostruki U zavar			
X zavar				J zavar			
Y zavar				Dvostruki J zavar			
<b>Kutni spojevi</b>							
Kutni zavar				Ugaoni zavar			
Dvostruk i kutni zavar							
<b>Rubni spojevi</b>							
Rubni plosnati zavar				Rubni V zavar			

Pri oblikovanju zavarenih konstrukcija treba voditi računa o izbjegavanju zareznog djelovanja (vršnog naprezanja) koje je u raznim varijantama popunjenosti zavara prikazano na slici 5 [8].



Slika 5. Raspodjela naprezanja

- a) V zavar s lošim provarom korijena, b) V zavar s dobrim provarom korijena, c) zavar s pročišćenim i zavarenim korijenom, d) dvostrani V-zavar [8].

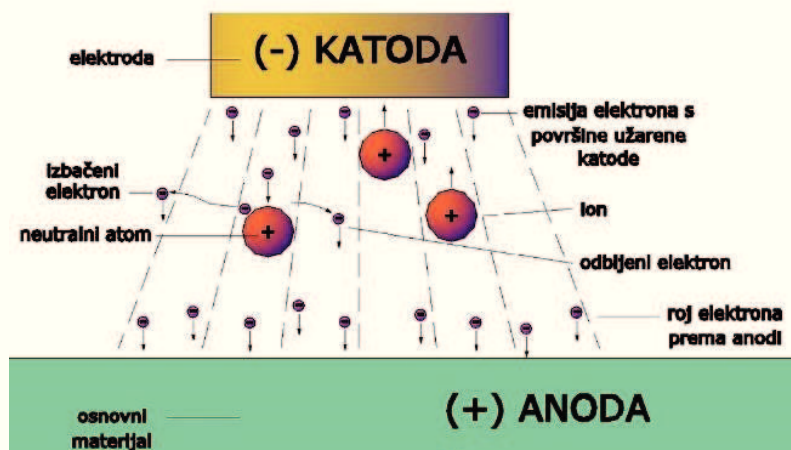
Loš spoj osnovnog i dodatnog materijala uzrokuje velika zarezna djelovanja u korijenu (presjek 1) i na licu zavara (presjek 2). Pri dinamičkom opterećenju takav loš spoj osnovnog i dodatnog materijala dovodi do pada dinamičke čvrstoće i loma zbog zamora materijala. Kvaliteta zavarenog spoja ovisi o spretnosti zavarivača [8].

## 2. ELEKTROLUČNO ZAVARIVANJE

Elektrolučno zavarivanje je postupak zavarivanja u kojem električni luk uspostavljen između elektrode i osnovnog materijala služi kao izvor topline, a kao dodatni materijal se koristi žica za zavarivanje (postupci s netaljivom elektrodom) ili sama elektroda (postupci s taljivom elektrodom) [9].

Svaki od postupaka elektrolučnog zavarivanja koristi odgovarajuće izvore električne energije (uređaji za zavarivanje) pomoću kojih se ostvaruje električni luk. Spajanjem izvora struje postiže se odgovarajući napon na krajevima elektroda. Kod istosmjerne struje postoje negativni i pozitivni pol, dok se kod izmjenične struje polaritet mijenja ovisno o vrsti uređaja za varenje. Kod postupaka s taljivom elektrodom, električni luk se može postići pomoću kratkog spoja, tj. ukoliko se elektrodom dodirne radni komad i nakon tog se elektroda podigne, uspostavlja se stabilan električni luk. Taljenje dodatnog materijala u talinu praćeno je pojavom raznih sila, poput: elektromagnetske sile, sile gravitacije, sile strujanja, reakcije plinova, te sila površinskog naprezanja. Sve navedene sile bitno utječu na proces zavarivanja [9, 10].

Električna provodljivost zraka je vrlo mala, pa je potrebno osigurati odgovarajući napon kako bi se formirao zadovoljavajući električni luk. Električni luk je usmjereno kretanje elektrona tj. stabilno električno pražnjenje kroz ionizirani zrak ili plin. Kako bi zrak ili plin postao ioniziran mora sadržavati ione i elektrone koji svojim usmjerenim kretanjem osiguravaju protok električne struje. Ioni i elektroni nastaju u atmosferi kao posljedica procesa dobivanja električnog luka (slika 6). Elektroni pod utjecajem električnog polja udaraju u atome atmosfere i stvaraju parove iona. Elektroni nastali iz tih parova povećavaju struju elektrona i postiže se tzv. lavina elektrona [9, 10].



Slika 6. Električni luk kod elektrolučnog zavarivanja [11].

Električni luk sastoji se od tri karakteristična područja [10]:

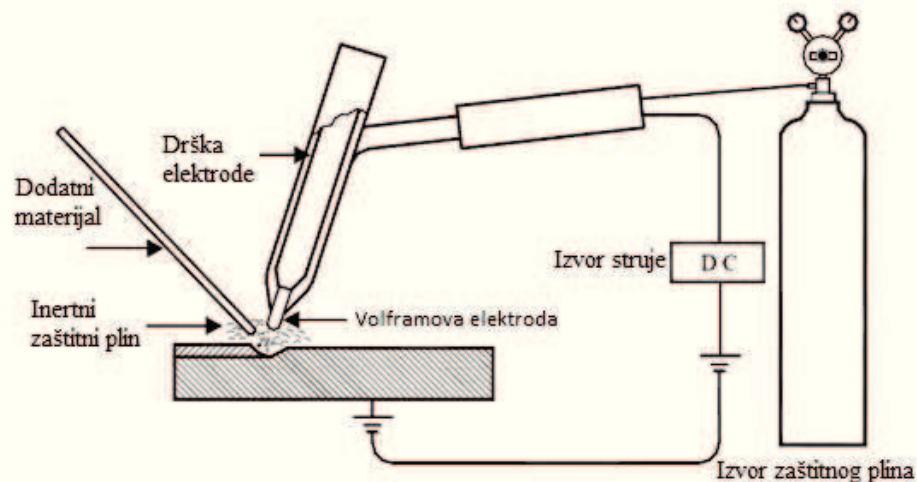
- I. Područje anodnog pada napona,
- II. Područje katodnog pada napona,
- III. Područje između ova dva napona.

Konvencionalni postupci elektrolyčnog zavarivanja su [9]:

- Zavarivanje punjenom elektrodnom žicom- u zaštiti plinova ili bez njih sa samozaštitnom žicom,
- TIG/GTAW proces - netaljiva volframova elektroda s dodatnim materijalom u obliku žice, te u zaštiti inertnog plina (najčešće Ar),
- EPP postupak - taljiva elektrodna žica pod praškom,
- MIG/MAG postupak - taljiva elektrodna žica pod zaštitom inertnog (MIG) ili aktivnog plina (MAG),
- REL postupak – s obloženom elektrodom.

## 2.1. TIG postupak zavarivanja

Postupak elektrolyčnog zavarivanja netaljivom elektrodom pod zaštitom inertnog plina je postupak zavarivanja kod kojeg se između netaljive volframove elektrode i osnovnog materijala uspostavlja električni luk (slika 7). Uglavnom se koristi kao ručni postupak zavarivanja, no može biti poluautomatski i automatski. Postupak zavarivanja netaljivom elektrodom pod zaštitom inertnog plina je također poznat pod nazivom TIG (Tungsten Inert Gas) i GTAW (Gas Tungsten Arc Welding). Zavarivanje se može odvijati sa ili bez dodatnog materijala koji je uglavnom žica promjera (0,5 - 8 mm). Osnovni i dodatni materijali moraju biti površinski i metalurški čisti jer ne postoji mogućnost pročišćivanja u talini zbog inertne atmosfere električnog luka. Kod ručnog postupka koriste se žice od nehrđajućeg čelika, bakra, aluminija, te Al-legure i Cu-legure. Koristi se u prehrambenoj industriji gdje je bitan izgled zavara i čistoća zbog sanitarnih razloga. Također se koristi i u avio-industriji zbog svoje sposobnosti zavarivanja posebnih materijala te zbog mogućnosti formiranja različitih vrsta zavara. Ovaj postupak je zahtjevniji od drugih postupaka i samim time zahtjeva kvalificiranog zavarivača [7].



Slika 7. TIG postupak zavarivanja [12].



Kod elektrolučnog zavarivanja netaljivom elektrodom pod zaštitom inertnog plina, električni luk se uspostavi preko visokofrekventnog generatora (VF generator) koji se uključuje neposredno pred zavarivanje. Električni luk se uspostavlja između radnog komada i netaljive volframove (W) elektrode. Nakon uspostavljanja električnog luka VF generator se gasi, a proces zavarivanja odvija se ili bez dodatnog materijala. Uzimajući u obzir broj grešaka u zavarenom spoju, mehanička svojstva i estetski izgled, kvaliteta zavarenog spoja je vrlo visoka [13].

TIG postupak zavarivanja daje visoku kvalitetu zavarenog spoja što je najveća prednost ovog postupka zavarivanja. U usporedbi s ostalim postupcima zavarivanja ovaj je postupak relativno spor dok je izobrazba za TIG zavarivača i automatizacija kompleksnija u odnosu na ostale postupke zavarivanja [2].

Glavni parametri TIG zavarivanja su [13]:

- brzina zavarivanja,
- napon zavarivanja,
- struja zavarivanja,

a određuju se ovisno o debljini materijala i vještini zavarivača. Napon i struja zavarivanja mogu se podesiti na aparatu za zavarivanje (slika 8).

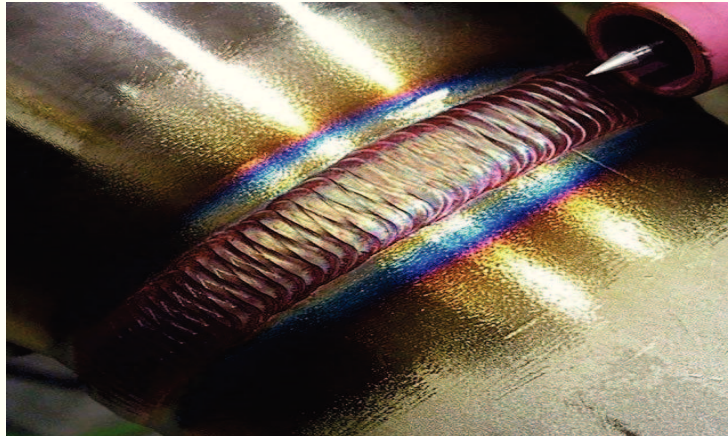


Slika 8. Napon i struja zavarivanja prikazani na aparatu za zavarivanje [14].

TIG (GTAW) postupak zavarivanja ima svoje prednosti i nedostatke [15, 16].

Prednosti:

- mogućnost spajanja gotovo svih metala,
- visoka pouzdanost i stabilnost,
- pojava grešaka može se smanjiti na gotovo manje od 1 %, TIG postupak je vrlo pouzdan i stabilan,
- visoka kvaliteta zavara u pogledu mehaničkih svojstava, estetskog izgleda (slika 9) te na kraju zbog vrlo malog broja grešaka u zavarenom spoju,
- nezavisno prilagođavanje parametara zavarivanja,
- mogućnost zavarivanja u gotovo svim položajima,
- nema pojave troske,
- zavarivanje se odvija bez dodatnog materijala.



Slika 9. Prikaz lica zavara sučeonog spoja ostvarenog TIG postupkom [17].

#### Nedostatci:

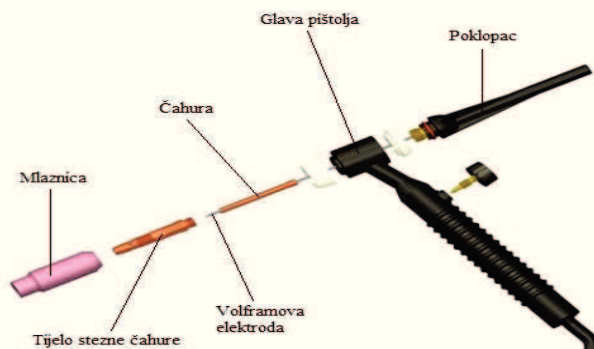
- mala brzina zavarivanja,
- veća cijena samih uređaja za zavarivanje i zavarivačke opreme u odnosu na REL postupak,
- visoki zahtjevi za pripremu zavarenog spoja,
- pojačano UV zračenje i svjetlost,
- nužna je prisilna ventilacija zraka kod zavarivanja u zatvorenim prostorima,
- neekonomičnost pri zavarivanju materijala debljih od 6 mm.

#### Vrste zavarivačke struje za TIG/GTAW postupak [18]:

- I. DCSP (engl. *Direct Current Straight Polarity*) (W-elektroda spojena na "-" pol)  
Ova vrsta veze je najčešće korištena među zavarivačkim strujama DC tipa. Sa W-elektrodom spojenom na "-" pol, postiže se samo 30 % energije zavarivanja, što znači da će W-elektroda raditi puno hladnije od DCRP postupka. Postignuti zavareni spoj ima dobru penetraciju i uski profil.
- II. DCRP (engl. *Direct Current Reverse Polarity*) (W-elektroda spojena na "+" pol)  
Ovaj tip struje rijetko se koristi zbog visoke koncentracije temperature na W-elektrodu, tako da se W-elektroda može lako pregrijati i spaliti. DCRP proizvodi plitki, široki profil i uglavnom se koristi na vrlo laganom materijalu na niskoj razini pojačanja.
- III. AC (engl. *Alternating Current*) Izmjenična struja, većinom se koristi pri zavarivanju lakih metala, poput aluminija i magnezija. Ulaz topline u W-elektrodu usrednjen je kako val izmjenične struje prolazi s jedne strane vala na drugi.

Komponente TIG/GTAW pištolja (slika 10) su: tijelo stezne čahure, plinske mlaznice, volframova elektroda, čahura, stražnji poklopac, glava pištolja, prekidač za uspostavljanje električnog luka te sklopke za reguliranje napona i jačine struje. Tijelo stezne čahure se učvršćuje u tijelo pištolja, prilagodljivo je za smještaj različitih veličina W-elektroda i njihove čahure. Elektroda za zavarivanje je čvrsta u tijelu pištolja zbog stezne čahure. Čahura je uglavnom napravljena od bakra ili njegovih legura.





Slika 10. Komponente pištolja za TIG/GTAW postupak [19].

Prianjanje stezne čahure na elektrodi je sigurno kada je poklopac na pištolju stegnut. Dobar električni kontakt između stezne čahure i W-elektrode zaslužan je za dobar prijenos struje.

Plinske mlaznice ili bolje poznate kao čaše, izrađene su od različitih vrsta materijala koji moraju biti otporni na toplinu, različitih su oblika, promjera i duljina. Mlaznice se mogu uvrnuti, ili jednostavno utisnuti u glavu pištolja. Mogu biti izrađene od keramike, metala, keramike s metalnim plaštom, stakla ili drugih materijala [18].

Najčešće primjenjivane su keramičke mlaznice, ali lagano puknu zbog čega je potrebno učestalo mijenjanje istih. Mlaznice koje se koriste za automatizirani postupak zavarivanja u kontinuiranom radu pri visokim temperaturama imaju vodeno hlađenje. One moraju biti dovoljno velike da inertnim plinom osiguraju odgovarajuću zaštitu taline i okolnog područja. Stražnji poklopac na glavi pištolja je prostor za pohranjivanje viška volframove elektrode, može biti različitih dimenzija ovisno o tome koliko je prostora potrebno za W-elektrodu [18].

Volfram (W) od svih drugih elemenata u periodnom sustavu ima drugo najviše vrelište (5930 °C) i najviše talište od svih kovina (3422 °C), ali često je potrebno oblikovanje elektrode zbog gubitka geometrije i dimenzija [20].

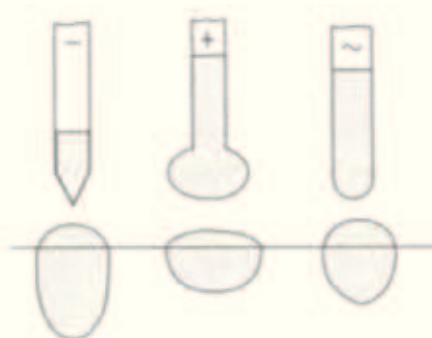
Vrste netaljivih elektroda prikazanih na slici 11 mogu biti [20]:

- Čisti volfram (W)
- $\text{LaO}_2$  lantanov oksid + volfram
- $\text{ThO}_2$  torijev oksid + volfram
- $\text{ZrO}_2$  cirkonijev oksid + volfram



Slika 11. Netaljive volframove elektrode promjera 2,4 mm [21].

Budući da volfram na visokim temperaturama oksidira, kao zaštitni plin ponekad se koristi dušik ili helij, ali uglavnom se koristi argon. Argon (Ar) štiti električni luk i elektrodu od kontaminacije kisikom i drugih plinova iz okoline. Volframova elektroda u većini slučajeva zahtjeva odgovarajući oblik vrha elektrode, ovisno o materijalu koji zavarujemo i izvoru struje na koji je elektroda spojena (slika 12, tablica 2). Postupak oblikovanja vrha W-elektrode se uglavnom izvodi brušenjem [7].



Slika 12. Oblik vrha elektrode i veličina zagrijanosti vrha ovisno o vrsti struje [7].

Tablica 2. Vrste struje i materijali za TIG zavarivanje [7].

Vrsta struje	Zavarivani materijali	Napomena
Istosmjerna struja, Elektroda "-" pol	Svi materijali osim Mg i Al te njihovih legura	Moguće je najveće opterećenje elektrode
Izmjenična ili impulsna struja	Al, Mg i njihove legure	Mogućnost uklanjanja oksida s površine osnovnog materijala
Istosmjerna struja, Elektroda "+" pol	Posebni slučajevi	Vrlo malo dopušteno opterećenje elektrode

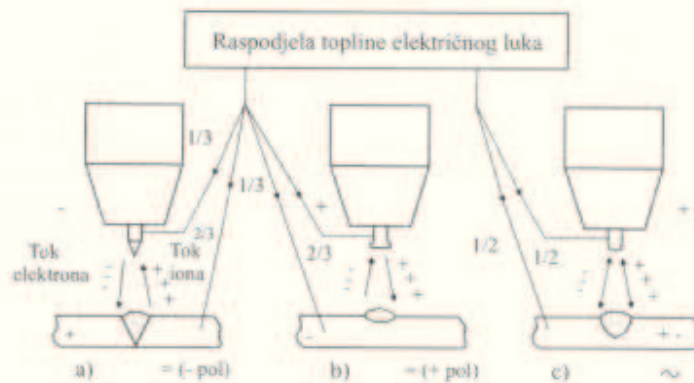
Ovisno o radnom komadu koji se zavaruje koriste se izmjenični, istosmjerni ili kombinirani izvori struje. Kod ručnog TIG postupka zavarivanja, radi osiguravanja približno konstantne struje zavarivanja (bez obzira na promjenu duljine luka zbog pomicanja ruke zavarivača), koriste se izvori struje sa strmopadajućim statičkim karakterom [7].

Snaga izvora, brzina kretanja izvora te koncentriranost gustoće snage su jedna od glavnih obilježja izvora energije. Naime, postoje određeni zahtjevi koje izvor energije za zavarivanje taljenjem mora zadovoljiti, a to su [7]:

- Snaga izvora energije mora biti dovoljna za usmjereno lokalno zagrijavanje do određene temperature, te za kompenziranje toplinskih gubitaka.
- Snaga izvora energije mora lokalno djelovati na određenu površinu ili volumen materijala koji se zavaruje.
- Gustoća snage izvora energije mora prijeći određenu vrijednost ovisno o obliku, fizikalnim svojstvima i dimenzijama predmeta koji se zavaruje.

Kada je W-elektroda spojena na istosmjerni izvor električne struje tj. "-" pol moguće je zavarivanje svih materijala osim lakih metala (magnezij, aluminij i njihove legure). Vrh elektrode u tome slučaju mora biti zašiljen u prosjeku na duljini 2 - 2,5 puta više nego promjer elektrode. Elektroda takvog oblika spojena na "-" pol troši samo 1/3 topline električnog luka na zagrijavanje elektrode, dok 2/3 topline električnog luka koristi za zagrijavanje osnovnog materijala (slika 13a). Kada je elektroda spojena na "+" pol, 2/3 toplinske energije električnog luka se oslobađa na elektrodi, dok se samo 1/3 ukupne topline troši na zagrijavanje osnovnog materijala (slika 13b), pa se elektroda jako zagrijava i troši.

Dopuštena jakost struje zagrijavanja kod takvog polariteta je nekoliko puta manja nego kod elektrode spojene na "-" polu da se spriječi taljenje W-elektrode. Kod zavarivanja provedenog na izmjeničnoj struji, približno je jednaka raspodjela topline električnog luka na osnovni materijal i elektrodu (slika 13c). Ovisno o obliku zavarenoga spoja i jakosti struje, volframova elektroda se u pištolju za zavarivanje namjesti tako da je vrh elektrode izvan keramičke mlaznice od 3 - 5 mm [7].



Slika 13. Shematski prikaz približne raspodjele topline električnog luka [7].

U posljednje vrijeme pojavili su se TIG uređaji koji se koriste da bi se prema potrebi omogućilo postizanje impulsne struje. Impulsna struja poznata je po smanjenom unosu topline tj. manjim deformacijama u osnovnom materijalu. Naime, ovakva impulsna struja daje brojne ostale prednosti pri zavarivanju osjetljivih materijala, te također omogućava zavarivanje u prisilnim položajima.

Prednosti impulsnog TIG zavarivanja u odnosu na klasični TIG postupak su sljedeće:

- precizna kontrola penetracije koja ovisi o pravilno određenim parametrima,
- električni luk je stabilniji,
- sposobnost utjecaja na veličinu zrna materijala,
- deformacije su manje,
- veća mogućnost izbora parametara [7].

Kao izvor snage za eksperimentalni dio, koristio se TransTig2500 uređaj (slika 14), te se TIG postupkom zavarivao navedeni sučeonni zavar. Naime, TransTIG 2500 uređaj za zavarivanje je potpuno digitalizirani TIG "DC" izvor napajanja. Posjeduje različite kategorije napajanja od 80 pa čak i do 500A, a također se razlikuju po njihovoj pokretljivosti, od manjeg prijenosnog, do stacionarnog uređaja koji raspolaže velikim jačinama struje [22].



Slika 14. Aparat za zavarivanje "TransTig 2500" [22].

Međutim, svi imaju jednu zajedničku stvar, a to je izuzetno poseban dizajn namijenjen za dugi vijek trajanja. Također, TransTig 2500 uređaj za zavarivanje omogućava izbor između TIG i REL postupka zavarivanja. Težak samo 24 kilograma, TransTig 2500 je jedan od najlakših TIG izvora napajanja s trofaznim napajanjem [22].

Kod postupka zavarivanja netaljivom elektrodom pod zaštitom inertnog plina, u većini slučajeva potrebno je dodavanje dodatnog materijala u električni luk. Kod našeg primjera sučeonog zavara, kao dodatni materijal koristila se BÖHLERDMO-IG žica debljine 2,4 mm (slika 15). BÖHLERDMO-IG žica je dostupna u promjerima: 1,6 mm, 2,0 mm, 2,4 mm i 3,0 mm, te je propisana EN ISO21952-A, EN ISO636-A europskim normama i AWSA5.28: ER70S-A1 (ER80S-G) američkom normom [23].



Slika 15. BÖHLERDMO-IG žica [24].

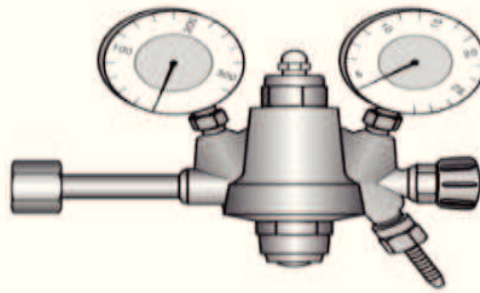
BÖHLERDMO-IG žica ima oznaku W Mo Si/ER80S-G(A1), te tipična analiza žice pokazuje prisustvo raznih kemijskih elemenata poput (mas. %): ugljika (C) 0.1 %, silicija (Si) 0.6 %, mangana (Mn) 1.2 %, molibden (Mo) 0.5 % [23].

Kao inertni zaštitni plin kod TIG postupka zavarivanja koristi se komprimirani Argon (Ar) koji je jednoatomani plin bez mirisa i boje. Industrijska proizvodnja argona vrši se frakcijskom destilacijom tekućeg zraka i ukapljivanjem. U čvrstome stanju ima plošno centriranu kubičnu kristalnu rešetku. Na slici 16 je prikazana boca komprimiranog argona, u svrhu TIG postupka zavarivanja. No osim kod zavarivanja, argon se dodaje u žarulje standardnih dimenzija u smjesi sa dušikom (10 % - 30 %) radi povećavanja trajnosti žarne niti. Također se koristi u istraživačkim laboratorijima i procesnoj industriji [25].



Slika 16. Boca komprimiranog argona [26].

Konstantan protok plina ostvaruje se kroz glavu pištolja i mlaznicu te oko zavara. Tlak u boci inertnog zaštitnog plina je između 200 i 300 bara, a očitava se na manometrima koji prikazuju pritisak u crijevu od pištolja i boci. Da bi se koristio zaštitni plin obavezna je regulacija pritiska, pomoću regulatora prikazanog na slici 17. Funkcija regulatora plina je smanjiti tlak iz komprimirane boce i osigurati konstantan protok plina. Regulator protoka je uglavnom izrađen od mesinga, zbog njegove sposobnosti neiskrenja pri udarcu [18].



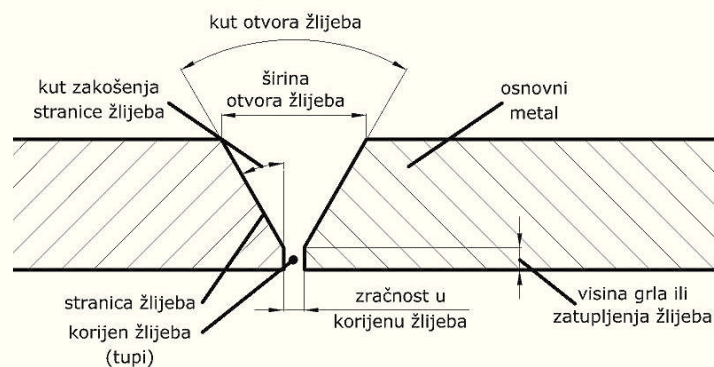
Slika 17. Regulator protoka s manometrima [18].

Strojevi za zavarivanje koji upotrebljavaju fleksibilan sklop kablova i utikača ili oni koji su trajno užičeni u sustav napajanja električnom energijom sadrže uzemljivač. Vodič za uzemljenje (slika 18) povezuje metalno kućište aparata za zavarivanje na tlo. Ako možemo pratiti žicu za uzemljenje natrag kroz sustav distribucije električne energije ustanovili bi da je povezan s zemljom i to obično kroz metalnu šipku u zemlju [18].



Slika 18. Vodič za uzemljenje [18].

Vrste zavarenih spojeva ostvarivih TIG postupkom prema položaju radih komada mogu biti: sučeoni spoj, kutni spoj, preklopni spoj, naliježući spoj, prirubni spoj i mnogi drugi. Sučeoni spoj nastaje zavarivanjem sučeljenih krajeva radnih komada, te samim time krajevi zatvaraju kut od najčešće  $180^\circ$ , a stupnjevi variraju između  $160^\circ$  i  $200^\circ$  (slika 19). Dimenzije šava u zavaru definirane su debljinom osnovnog materijala, stoga dimenzioniranje zavara ne predstavlja problem [27].



Slika 19. Sučeoni spoj i njegove komponente [27].

Međutim, potrebno je posvetiti veliku pažnju na pripremu rubova spoja, pošto omogućuju pravilno protaljivanje taline uz minimalno naprezanje i deformacije u spojevima. Zavarivanje se može odvijati obostrano, no nije nužno pa se u praksi većinom zavarivanje odvija samo s jedne strane. Jednostavno se ispituje rendgenskom snimkom ili nekom drugom NDT metodom ispitivanja materijala [27].

Preklopni spoj se može definirati kao preklapanje rubova dvaju materijala koji se zavaruju s jedne i s druge strane. Preklopni spoj zavaren s obje strane može biti povrgnut znatno većim silama nego spoj zavaren samo s jedne strane. Kutni spoj može biti izveden zavarivanjem s obje strane ili samo s jedne. Predstavlja savršeno rješenje za materijale koji imaju debelu stjenku. Prirubni spojevi se uglavnom koriste za zavarivanje limova do debljine 4 mm, te dijelove koji su pod manjim opterećenjem [27].

## 3. ČELIK I ČELIČNE CIJEVI

### 3.1. Čelik

Proces dobivanja čelika je rafinacijski postupak čiji je zadatak ukloniti štetne i suvišne primjese iz uložka prilikom taljenja, a po potrebi se dodaju drugi elementi kako bi se dobio zahtijevani sastav čelika [28].

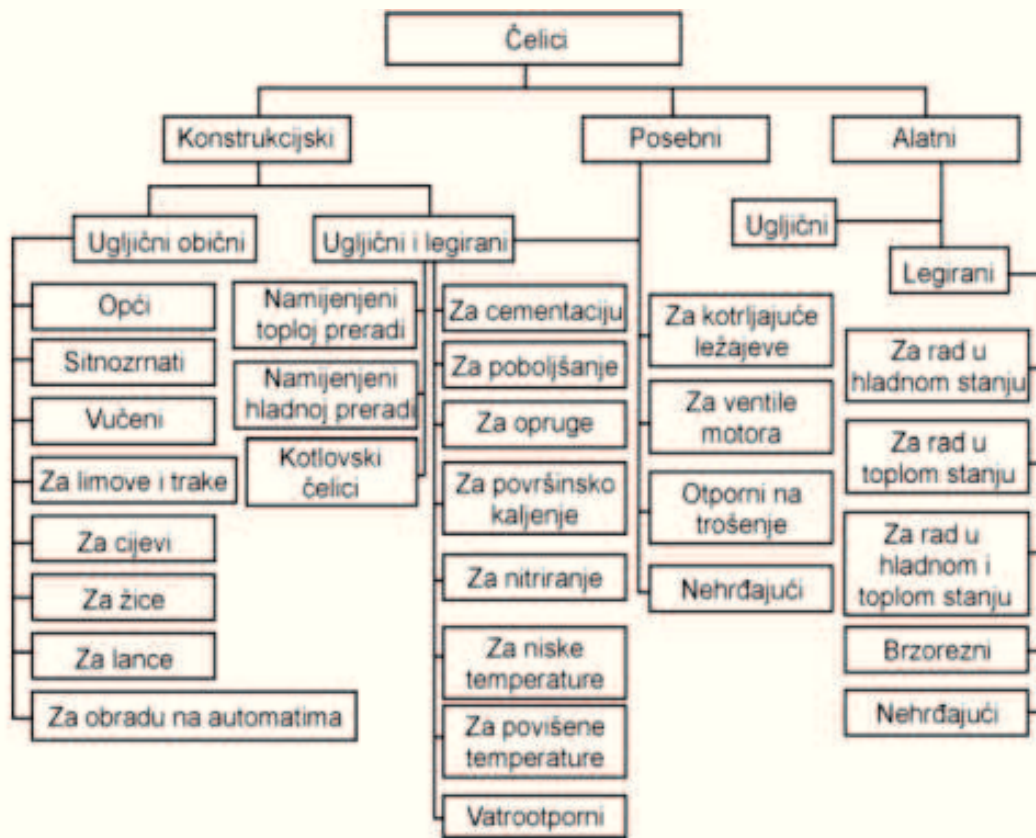
Čelik je deformabilna željezna slitina koja uz ugljik (C) sadrži i određene primjese drugih elemenata koje mogu biti korisne ili štetne. Udio ugljika (C) u čeliku može iznositi maksimalno 2,014 %. Korisne primjese u čeliku su mangan (Mn), molibden (Mo), krom (Cr), nikal (Ni) i drugi, dok su štetne primjese uglavnom fosfor (P) i sumpor (S). Pored navedenih elemenata čelik može sadržavati i oligoelemente (bakar (Cu), kositar (Sn), arsen (As), te plinove kisik (O), dušik (N) i vodik (H). Aluminij (Al) služi kao sredstvo za dezoksidaciju [28 - 30].

Čelik se višestruko primjenjuje jer je kod njega moguće postići dobre kombinacije mehaničkih svojstava, kao što su: žilavost, čvrstoća i duktilnost, a koje je moguće ostvariti utjecajem na kemijski sastav, oblikovanjem deformiranjem te naknadnom toplinskom obradom. Zbog povoljnijih svojstava i ekonomičnijeg načina proizvodnje u odnosu na druge metalne materijale, čelik se primjenjuje u različitim djelatnostima, kao što su: industrija, poljoprivreda, promet, građevinarstvo, obrtništvo itd. [31].

Čelici se mogu podijeliti prema kemijskom sastavu, načinu proizvodnje, mikrostrukтури, načinu lijevanja, području namjene, stupnju dezoksidacije, svojstvima itd. Prema kemijskom sastavu čelici se dijele na legirane i nelegirane (ugljične). Prema sadržaju ugljika mogu biti nisko, srednje i visoko ugljični, dok legirani čelici su čelici koji bez obzira na opće konstituente sadrže i druge namjerno dodane elemente. Propisani su europskim normama gdje je čelik legiran ukoliko sadrži jedan ili više elemenata čiji maseni udio prelazi određene vrijednosti. Prema primarnom načinu proizvodnje čelici mogu biti konvertorski, čelici dobiveni pretaljivanjem, elektročelici i danas gotovo napušten SM čelik. Prema načinu lijevanja mogu biti kontinuirano odliveni čelici i klasično (lijevani u ingote), dok prema načinu namjene (slika 20) mogu biti konstrukcijski čelici, čelici namijenjeni za posude pod visokim tlakom, alatni čelici, čelici za elektroindustriju itd. Osnovni oblici čeličnih poluproizvoda su cijevi, limovi, trake, šipke itd. [28].

Pošto niti jedna skupina materijala ne može legiranjem toliko mijenjati svojstva kao čelik, dodaju mu se određeni elementi kako bi se postiglo željeno svojstvo ili kombinacija svojstava gotovog proizvoda. Niskolegiranim čelikom smatra se čelik čiji je ukupni maseni udio prisutnih legirajućih elemenata ispod 5 %, dok visokolegirani čelik sadrži ukupno  $\geq 5$  % legirajućih elemenata [31].



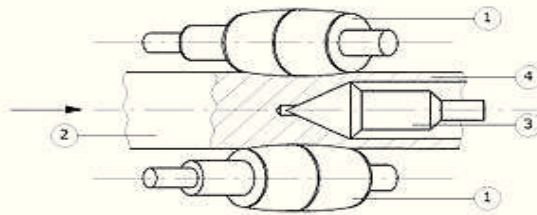


Slika 20. Podjela čelika prema namjeni [30].

### 3.2. Čelične cijevi

Cijev je cilindrično tijelo koje je na obje strane otvoreno, čija je duljina uglavnom veća od njegovog promjera. U usporedbi sa crijevom, cijevi su uglavnom napravljene od nefleksibilnog materijala zbog njezine primjene u transportu plinova, para i tekućina, te se također koriste prilikom izrade različitih konstrukcija. Cijevi imaju uglavnom kružni poprečni presjek, ali mogu biti i eliptične, pravokutne i kvadratne. Cijevi mogu biti čelične i od obojenih metala, te šavne i bešavne. Također, postoje i plastične cijevi koje se pojavljuju u PVC ili GRP izvedbi.

Tehnološki postupak dobivanja čeličnih bešavnih cijevi provodi se u valjaonicama, a sastoji se od tri koraka: izrade šupljeg tijela tj. čahure, izrade cijevi iz čahure te na poslijetku obrada završetaka cijevi. Jedan od najpoznatiji postupaka dobivanja šupljeg tijela je takozvani Mannesmannov postupak koji je prikazan na slici 21. On se provodi zagrijavanjem čeličnog uložka na temperaturu pri kojoj je uložak u austenitnom području radi ostvarenja potrebne duktilnosti. Nužno je da uložak za cijelo vrijeme deformiranja bude u austenitnom području jer se dobra duktilnost postiže većim brojem ravnina klizanja.



Slika 21. Mannesmannov postupak dobivanja bešavnih cijevi, (1. dvostrano konusni valjci, 2. ingot, 3. trn, 4. čahura) [32].

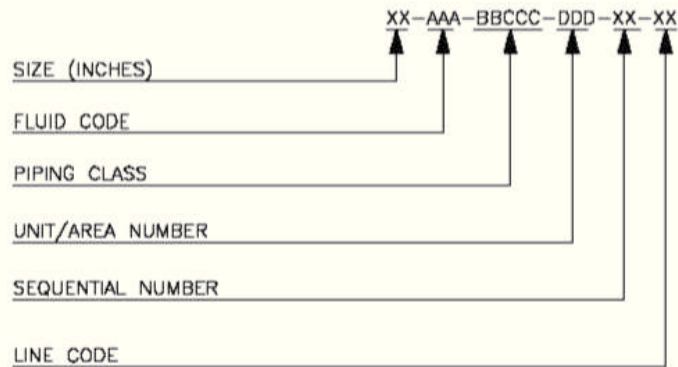
Pomoću dva valjka koji se rotiraju u istome smjeru, užareni ingot se propušta između tih valjaka koji uz pravocrtno gibanje ostvaruju i rotacijsko gibanje zbog međusobno kosog položaja valjaka. Valjci rotiranjem guraju užareni ingot na trn čijim se prodorom u duktilnu masu ingota formira čahura [32].

Poznavanjem dimenzija alata moguće je pretpostaviti dimenzije cijevi. Vanjski promjer trna određuje unutarnji promjer bešavne cijevi, dok razmak između valjaka određuje vanjski promjer cijevi. Nakon što je cijev valjana i ohlađena, slijedi završna operacija koja se sastoji od smanjivanja cijevi valjanjem, ravnjanja, kalibriranja te na poslijetku rezanja i pakiranja [32].

Cijevi koje se koriste u rafinerijskim postrojenjima moraju primarno zadovoljiti nekoliko osnovnih uvjeta: korozivna postojanost, postojanost pri radu na povišenim tlakovima i pri širokom spektru temperatura. Ispunjenje tih uvjeta je nužno radi strujanja fluida koji su često kemijski vrlo agresivni, a većina postupaka se provodi pri povišenim temperaturama i tlakovima.

### 3.3. Označavanje cijevnih linija

Podaci o nazivnom promjeru i klasi cijevi, vrsti fluida, području u kojem se linija nalazi, rednom broju linije i kodu linije nalaze se u oznaci cijevne linije tj. u njezinom imenu (slika 22). Navedeni podaci dani u kodnim oznakama tumače se pomoću tablica s objašnjenjem pojedine kodne oznake [33].



Slika 22. Označavanje cijevne linije [33].

Prva oznaka veličine nazivnog promjera predstavlja promjer većinskog dijela dužine cijevi unutar granica linije. Osim nazivnog promjera cijevne linije mogu se nalaziti i druge veličine promjera cijevi nastale npr. zbog redukcije za razne instrumente. Druga oznaka predstavlja vrstu fluida koji se nalazi u cijevnim linijama. Fluidi mogu biti više ili manje agresivni stoga njihova agresivnost ima utjecaj na debljinu stjenke cijevi, odnosno korozivni dodatak. Treća oznaka predstavlja klasu cjevovoda. Prema njoj se određuje maksimalni tlak unutar cijevi, debljina stjenke, korozivni dodatak, materijal, dozvoljeni ventili i radni parametri. Zadnja oznaka predstavlja redni broj linije [33].

## 4. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu završnog rada ispitana je mikrostruktura sučeonog zavora cijevi koji je postignut TIG/GTAW postupkom zavarivanja. Zavarena je cijev s redukcijom oznake 3X2XS WPB/P265GH EN2A (BKL) 56P20271 (slika 23) s drugom čeličnom cijevi. Prema prvoj oznaci 3X2XS riječ je o redukcijskom segmentu koji s 3" (76,2 mm) centralno reducira presjek na 2" (50,8 mm) radi mogućnosti spajanja na drugu cijev postupkom zavarivanja. Cijev je izrađena od niskougličnog čelika (0,1 % C, 0,2 % Si, 0,5% Mn, 0,04 % P, 0,04 % S, 0,2 % Ni, 0,15 % Cr, 0,05 % Mo) za tlačne namjene koji je dobro zavarljiv. Namijenjena je visokim temperaturama i pritiscima, a minimalna granica razvlačenja ( $R_e$ ) joj iznosi 265 N/mm<sup>2</sup>. Sučeoni zavar proveden je na manjem promjeru cijevi redukcije.



Slika 23. Oznake na redukciji.

Prije opisa ispitane mikrostrukture zavarenog spoja u prvom podpoglavlju opisat će se postupak pripreme i zavarivanja sučeonog zavora. Također će u drugom podpoglavlju biti opisan postupak rezanja zavarene cijevi iz koje se na karakterističnim mjestima uzimaju uzorci. Prije metalografske analize uzorak mora biti ispravno pripremljen, zbog čega će postupak pripreme biti detaljno opisan u trećem podpoglavlju.

### 4.1. Postupak pripreme i zavarivanja cijevi

Priprema sučeono zavarenog V spoja izvodi se mehaničkom obradom brušenjem pri čemu je alat vođen ručno. Spoj se priprema prije zavarivanja kako bi se uklonile nečistoće i masnoće s njega.

Na cijevi od 2" i redukcijskoj cijevi pomoću male brusilice s nastavkom za brušenje koja je prikazana na slici 24, pripremaju se bočne površine za zavarivanje. Malom brusilicom radi se kosina na cijevi i redukciji pod kutom od otprilike 35 stupnjeva. Na unutarnjoj strani stjenke cijevi i redukcije formira se ravni dio koji se proteže preko cijelog presjeka, a koji služi za zavarivanje korijenskog zavora. Osim bočnih površina, potrebno je pripremiti i obližnje unutarnje i vanjske površine.

Vanjski dio površine cijevi, debljine u prosjeku 10 - 15 mm od početka kosine, čisti se također pomoću male brusilice. Čeona brusilica (slika 25) koristi se za čišćenje unutarnjeg dijela površine cijevi i redukcije (10 - 15 mm).



Slika 24. Brusilica s nastavkom za brušenje.



Slika 25. Čeona brusilica.

Sve mehanički obrađene površine brušenjem istaknute su crvenom bojom na slici 26. Korijenski dio zavara predstavlja najvažniji dio u cjelokupnom procesu zavarivanja cijevi te zahtjeva iznimnu kvalitetu i homogenost zavara.



Slika 26. Označeni dijelovi sučeonog spoja koji moraju biti čisti [27].

Nakon što su potrebne površine za sučeonu spoj očišćene, slijedi postupak pozicioniranja cijevi i redukcije kako bi osi cijevi bile kolinearne, što bi omogućilo pravilno odvijanje procesa zavarivanja. Postupak pozicioniranja komponenti prije zavarivanja se uglavnom provodi radi kvalitete korijenskog dijela zavara kao i zbog daljnjeg zavarivanja na cijevnu liniju. Prvi korak u pozicioniranju cijevi i redukcije je postavljanje žice čija debljina odgovara širini korijenskog zavara. Žica se postavlja između dviju cijevi radi konstantnog održavanja razmaka između stjenke cijevi i redukcije. Nakon što se cijevi pozicioniraju zavarivač može zavariti cijevi s jedne strane radi ukrućivanja konstrukcije. Nakon inicijalnog zavara s jedne strane, žica predviđena za definiranje razmaka između cijevi se vadi i postavlja na suprotnu stranu od inicijalnog zavara. Nakon provjere koaksijalnosti osi poslije inicijalnog zavara, slijedi drugo varenje sa dijametralno suprotne strane cijevi i ponovna provjera koaksijalnosti osi. Ako koaksijalnost nije zadovoljavajuća radi se korekcija alatom nakon čega slijedi obavezno još jedan mali zavar radi koaksijalnosti osi.

Nakon pravilno namještenih cijevi provodi se postupak zavarivanja korijenskog zavora cijevi. Po odrađenom prvom prolazu korijenski zavar potrebno je očistiti s vanjske strane kako bi se uklonile nečistoće i osiguralo daljnje zavarivanja čistih ploha. Postupak čišćenja provodi se pomoću male brusilice s nastavkom previđenim za četkanje. Postupak zavarivanja se nastavlja, te se odvija u više popuna i na posljetku završnim zavarom. Nakon svakog prolaska, zavareni spoj se čisti. Završni dio zavarenog spoja čisti se radi boljeg izgleda, kako tijekom eksploatacije ne bi došlo do koncentracije naprezanja na licu zavora.

Aparat korišten za zavarivanje prikazan je na slici 27 dok je na slici 28 prikazan pištolj kojim je provedeno zavarivanje. U ovom primjeru zavarivanja sučeonog spoja relativno malih veličina cijevi i debljini stjenke oko 4 mm, postavljena je jakost struje oko 130 A. Svi slojevi zavarenoga spoja se zavaruju pri tom iznosu jakosti struje (jedan korijenski sloj, dvije popune i završni sloj).



Slika 27. TransTig 2500 aparat za zavarivanje.



Slika 28. Pištolj za zavarivanje.

#### 4.2. Postupak rezanja zavarene cijevi

Iz spoja sučeonu zavarenih cijevi, prikazanog na slici 29a potrebno je zbog metalografske analize uzeti nekoliko karakterističnih uzoraka. Prvo su iz sučeonu zavarenoga spoja izrezane naznačene trake, prema slici 29b.





a)



b)

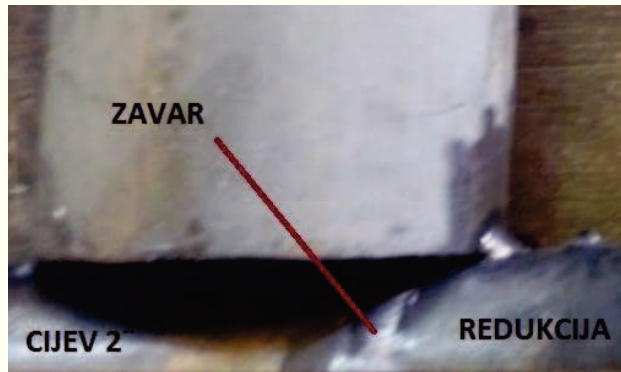
Slika 29. Sučeono zavarene cijevi s označenom: a) pozicijom zavarenog spoja, b) trakom rezanja.

Rezanje označenih dijelova materijala koji su potrebni za ispitivanje provodi se na tračnoj pili, koja je prikazana na slici 30. Tračna pila BEKA-MAK tip BMSO450 tijekom rezanja koristi emulziju za hlađenje obratka kako temperatura ne bi utjecala na promjenu njegove mikrostrukture.



Slika 30. BEKA-MAK BMSO450 tračna pila.

Prilikom neuspjelog pokušaja stezanja redukcije u stegu tračne pile, ustanovljena je potreba zavarivanja dodatne cijevi koja bi omogućila bolji prihvat obrtka u stegu. Na slici 31 prikazan je zavareni prihvat za redukcijску cijev u svrhu izrezivanja traka.



Slika 31. Postupak omogućavanja pravilnog rezanja.

Nakon što je cijev zavarena zbog nemogućnosti rezanja trake prikazane na slici 29b, na redukciji od 3" mora se odrezati višak materijala. Redukcija cijev okreće se u vertikalni položaj i postavlja na tračnu pilu gdje se višak cijevi (3"), koji onemogućava postavljanje redukcije na zadanu mjeru, reže. Vertikalni pogled na postupak rezanja prikazan je slici 32a. Nakon ove operacije rezanja, redukcija se u stezi okreće horizontalno nakon čega slijedi rezanje označenih dijelova traka sučeono zavarenog spoja cijevi (slika 32b). Odrezani uzorci i višak materijala prikazani su na slici 33. Tračna pila se nakon korištenja čisti, a oštri rubovi na odrezanim dijelovima bruse.



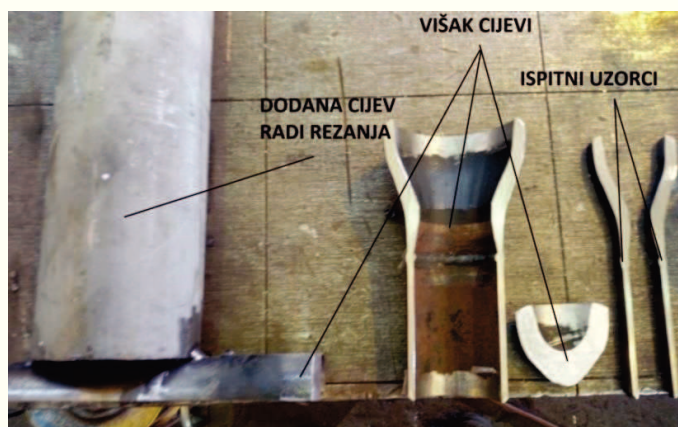
a)



b)

Slika 32. Rezanje na tračnoj pili: a) vertikalni pogled na postupak rezanja, b) postupak rezanja.





Slika 33. Odrezani uzorci i višak materijala

Iz izrezanih traka daljnjim postupkom rezanja izdvojeni su karakteristični uzorci za metalografsku analizu. Daljnji postupak rezanja proveden je pomoću rezalice Buehler ABRASIMET 2 (slika 34a), koja vertikalnim spuštanjem rezne ploče reže traku stegnutu u stezi (slika 34b). Manipulacija reznom pločom provodi se ručno preko drške. Tijekom rezanja dodaje se emulzija kako bi se izbjegao utjecaj topline na promjenu mikrostrukture ispitnog uzorka.



a)



b)

Slika 34. Rezalica "Buehler ABRASIMET 2": a) sa spuštenim poklopcem, b) s dignutim poklopcem.

Iz odrezanih traka odrezana su 4 karakteristična ispitna uzorka na kojima će se provoditi metalografska analiza (slika 35), a to su:

- Uzorak I: Osnovni materijal 1 - Redukcija (strana 3"),
- Uzorak II: Zavareni spoj + ZUT redukcije (strana 2"),
- Uzorak III: Zona utjecaja topline (cijev 2"),
- Uzorak IV: Osnovni materijal 2 (cijev 2").

Nakon što su karakteristični uzorci pravilno odrezani provedena je priprema uzoraka za metalografsku analizu.



Slika 35. Četiri ispitne zone.

#### 4.3. Postupak pripreme uzoraka za metalografsku analizu

Uzorci se nakon rezanja pažljivo postavljaju u uređaj za vruće izostatsko prešanje Buehler SimpliMet 1000 (slika 36) gdje se zasipavaju praškastom vodljivom masom (Resin Phenolic Conductive). Praškasta vodljiva masa u uređaju najprije se sabija tlakom od 250 bara, a zatim grije 2,5 min. Na kraju se odvija proces hlađenja uzorka koji traje oko dvije minute.



Slika 36. Uređaj za vruće izostatsko prešanje; "BUEHLER SimpliMet 1000".

Nakon prešanja uzoraka u vodljivu masu slijedi njihovo brušenje i naknadno poliranje pomoću uređaja BUEHLER Phoenix Beta koji je prikazan na slici 37, a sve to je provedeno kako bi uzorci bili pravilno pripremljeni za metalografsku analizu.

Postupak brušenja provodi se pomoću vodobrusnih papira raznih gradacija. Počinje se s najgrubljim vodobrusnim papirom, a završava s onim čija je gradacija najmanja kako bi se dobila što finije izbrušena površina uzorka.



Slika 37. Uređaj za brušenje i poliranje "BUEHLER Phoenix Beta".

Počinja se s vodobrusnim papirom gradacije 120, te se onda koriste papiri gradacije 240, 400, 600 i 800. Tijekom brušenja uzorci su konstantno hlađeni vodom da ne bi došlo do promjene u mikrostrukturi uzoraka.

Nakon brušenja uslijedilo je poliranje uzoraka na tkanini za poliranje, a provedeno je sa  $\text{Al}_2\text{O}_3$  prahom granulacije  $0,03 \mu\text{m}$  pomiješanim s vodom. Nakon svake faze obrade, odnosno brušenja i poliranja, provodi se pregled površine uzoraka pomoću optičkog mikroskopa. Parametri brušenja i poliranja prikazani su u tablici 3.

Tablica 3. Parametri brušenja i poliranja uzoraka zalivenih u masu.

Brušenje					
Podloga	Gradacija	Medij	Brzina rotacije ploče, okret/min	Tlačna sila, N	Vrijeme, min
SiC – papir	120	voda	200	30	2,5
	240			20	2,5
	400			20	2,5
	600			20	2,5
	800			20	2,5
Poliranje					
Podloga	Granulacija zrna $\text{Al}_2\text{O}_3$	Medij	Brzina rotacije ploče, okret/min	Tlačna sila, N	Vrijeme, min
Tkanina (tzv. filc)	$0,03 \mu\text{m}$	voda + $\text{Al}_2\text{O}_3$	200	20	2,5

Nakon brušenja i poliranja slijedi nagrizanje uzoraka nital-om (5 %-tna otopina dušične kiseline u alkoholu). Nagrizanje se provodi radi omogućavanja promatranja mikrostrukture. Nakon što su uzorci nagriženi, ispiru se vodom i čiste alkoholom te se suše fenom, što je prikazano na slici 38a. Nakon toga se provodi završna vizualna kontrola optičkim mikroskopom (slika 38b) radi provjere nagriženosti uzorka.



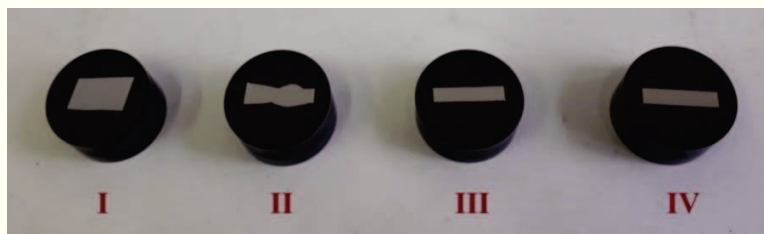
a)



b)

Slika 38. a) sušenje, b) provjera uzoraka nakon nagrizanja.

Metalografska analiza je provedena na nagriženim uzorcima (slika 39), pomoću invertnog metalografskog mikroskopa Olympus GX 51s digitalnom kamerom DP70 (slika 40). Navedeni mikroskop ima mogućnost snimanja mikrostrukture uzoraka pri povećanjima od 50x do 1000x, te je također opremljen s programskim paketom za automatsku obradu slike Analysis Materials Research Lab.



Slika 39. Ispitni uzorci nakon nagrizanja.



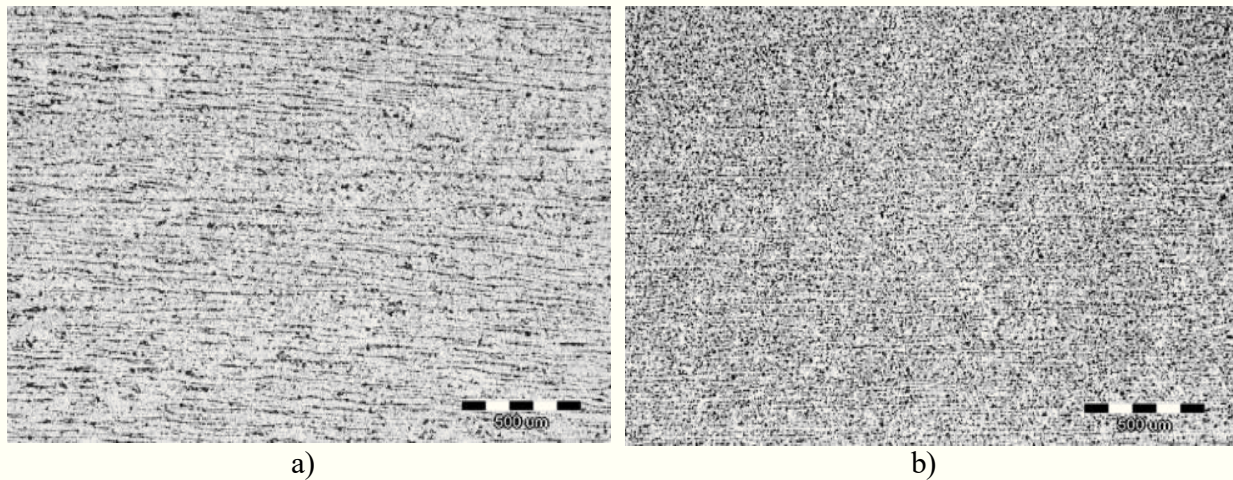
Slika 40. Invertni metalografski mikroskop Olympus GX51 s digitalnom kamerom DP70.



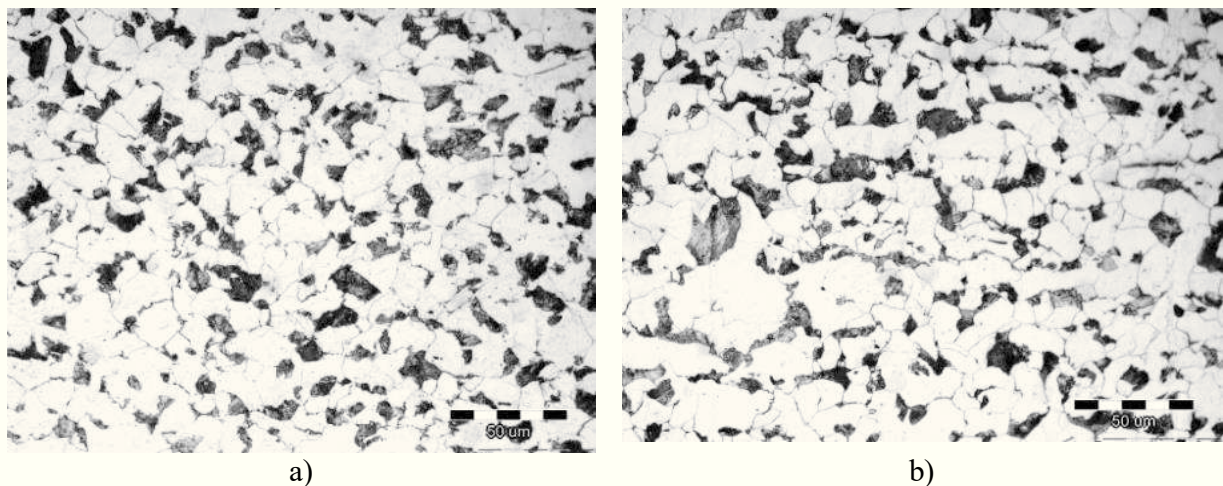
## 5. REZULTATI I RASPRAVA

Metalografskom analizom, napravljena je analiza mikrostrukture nagriženih uzoraka osnovnog materijala cijevi 3" (uzorak I), zavarenoga spoja (uzorak II), zone utjecaja topline na cijev 2" (uzorak III), te osnovnog materijala cijevi 2" (uzorak IV). Rezultati pri različitim povećanjima prikazani su na sljedećim slikama.

Na slici 41 prikazana je usporedba strukture osnovnih materijala cijevi. Metalografski snimci na slici 41 su pri povećanju 50x, dok su na slici 42 pri povećanju 500x.



Slika 41. Metalografski snimci pri povećanju 50x: a) uzorak I, b) uzorak IV.



Slika 42. Metalografski snimci pri povećanju 500x: a) uzorak III, b) uzorak IV

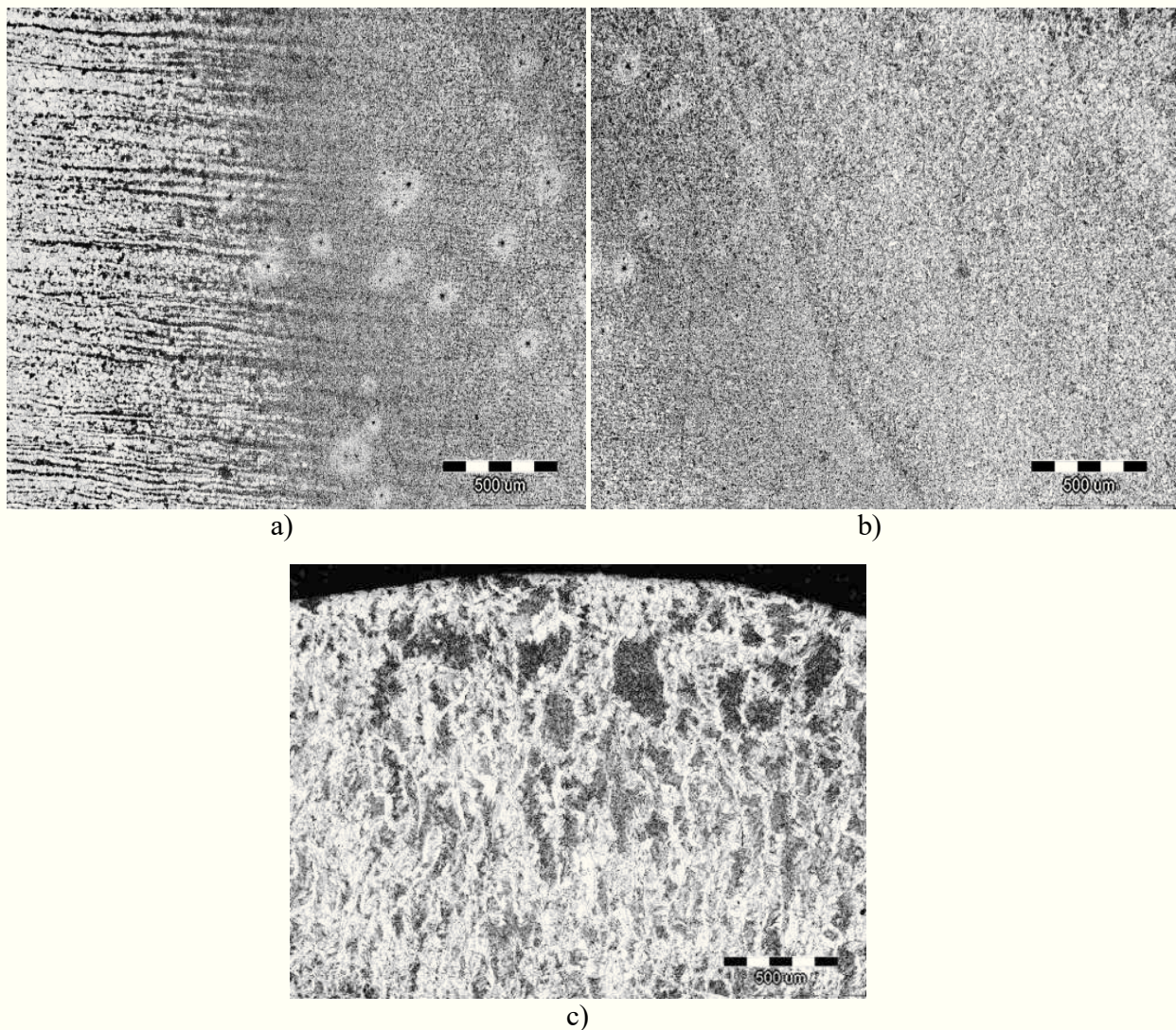
Iz slike 41 vidljivo je da uzorak I osnovnog materijala cijevi od 3" i uzorak IV osnovnog materijala cijevi od 2" imaju sitnozrnatu feritno-perlitnu mikrostrukturu. U uzorku I uočava se tekstura koja ukazuje na nedostatak (ili nedovoljnu kvalitetu) toplinske obrade. U mikrostrukтури uzorka IV tekstura je manje izražena



Na slici 42 prikazani su metalografski snimci uzoraka III i IV koje su uspoređivane iz razloga što pripadaju istoj cijevi.

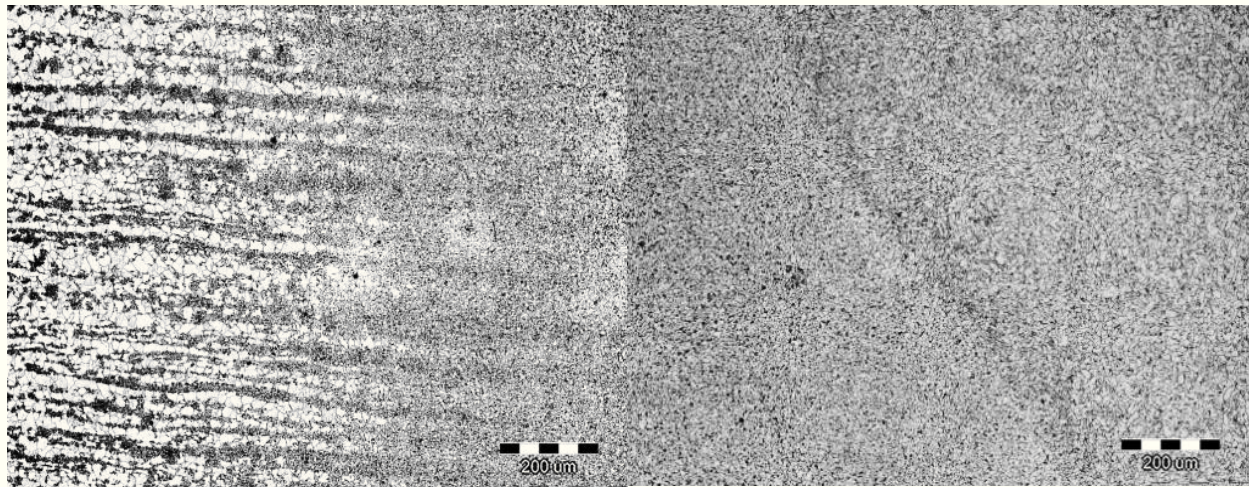
Na slici 42 ne uočava se velika razlika u mikrostrukturi već analiziranog uzorka IV i uzorka III. Mikrostruktura oba uzorka je feritno-perlitna. U perlitnim zrnima uočava se intergranularni acikularni ferit. Pretpostavljalo se da će se na uzorku III vidjeti zona utjecaja topline nastala pri zavarivanju zbog blizine zavarenog spoja, ali ne vidi se.

Zona utjecaja topline vidi se jedino u uzorku II. Metalografski snimci pri povećanju od 50x prikazani su na slici 43, pri povećanju 100x na slici 44, a pri povećanju 500x na slici 45.



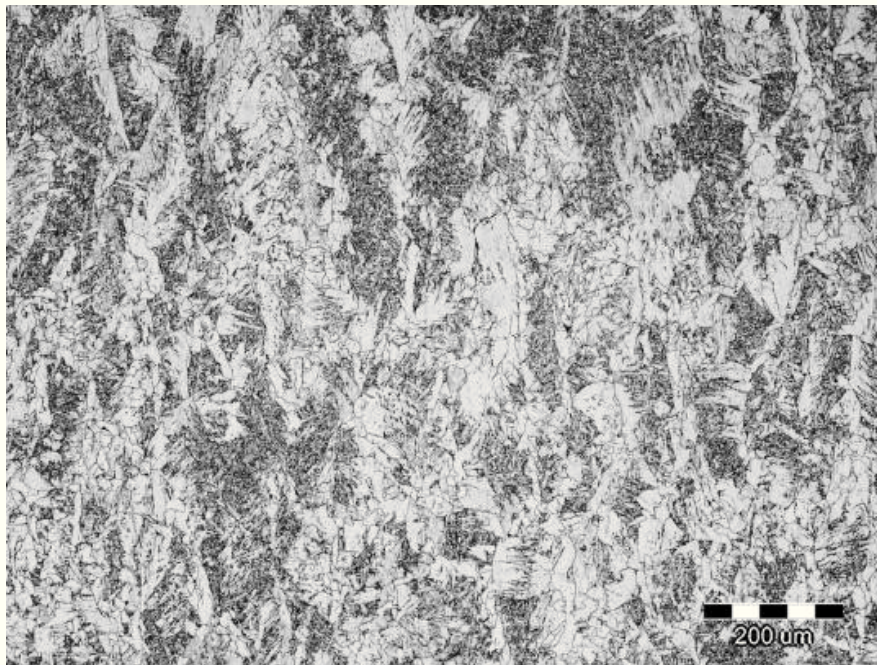
Slika 43. Metalografski snimci uzorka II pri povećanju 50x: a) ZUT bliže OM, b) ZUT bliže ZT i c) ZT.





a)

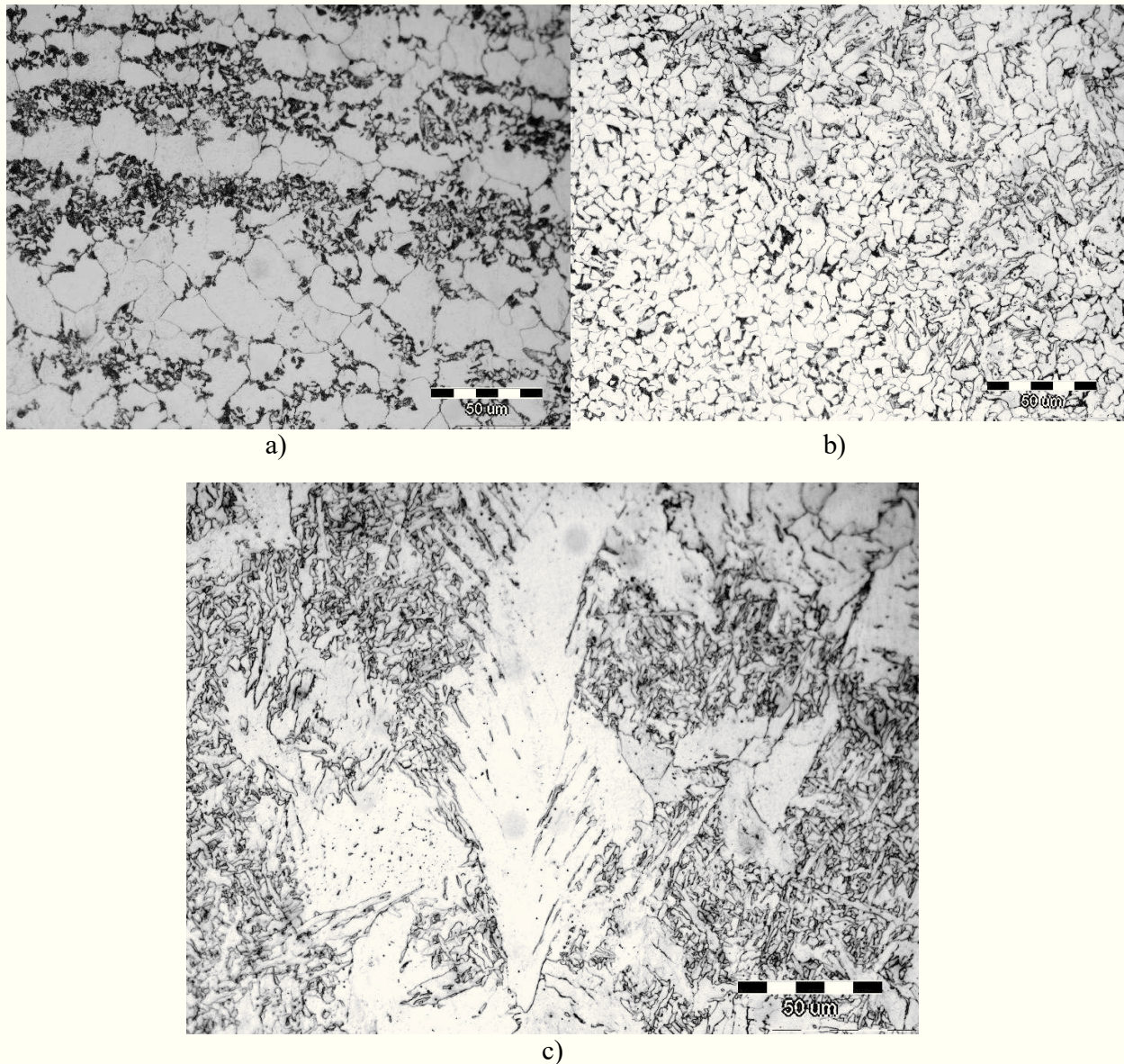
b)



c)

Slika 44. Metalografski snimci uzorka II pri povećanju 100x: a) ZUT bliže OM, b) ZUT bliže ZT i c) ZT.





Slika 45. Metalografski snimci uzorka II pri povećanju 500x: a) ZUT bliže OM, b) ZUT bliže ZT, c) ZT.

U mikrostrukturi uzorka II u zoni taljenja (ZT) pri svim povećanjima na slikama 43c, 44c i 45c uočavaju se dendriti, intergranularni acikularni ferit te Widmanstättenova struktura. U zoni utjecaja topline (ZUT) feritno-perlitna struktura je sitnozrnatija nego kod osnovnog materijala (OM). U zoni utjecaja topline (ZUT) dolazi do porasta u veličini intergranularnog acikularnog ferita.

U zoni taljenja (ZT) zrno ferita je veće nego u zoni utjecaja topline (ZUT). Perlit se ne može uočiti, a vidljive su samo granice zrna i granice između ferita. U zoni taljenja (ZT) i u zoni utjecaja topline (ZUT) dolazi do pretaljivanja pa više nema teksture.



## 6. ZAKLJUČAK

Na osnovi analize mikrostrukture osnovnog materijala i zavarenog spoja sučeno zavarenih cijevi TIG postupkom provedene na invertnom mikroskopu pri različitim povećanjima, može se metalografskom analizom zaključiti sljedeće:

- na uzorcima osnovnog materijala obje cijevi uočena je sitnozrnata feritno-perlitna mikrostruktura,
- u zoni taljenja (ZT) zrno ferita je veće nego u zoni utjecaja topline (ZUT). Perlit se ne može uočiti, a vidljive su samo granice zrna i granice između ferita,
- u zoni taljenja (ZT) uočavaju se dendriti, intergranularni acikularni ferit te Widmanstättenova struktura.

## 7. LITERATURA

- [1] Jelaska, D.: Elementi strojeva, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split 2005.
- [2] Samardžić I., Bogovac D., Jorgić T., Kovačić K.: Primjena TIG postupka zavarivanja u spajanju pozicija, Technical Journal 9(2), 2015, pp. 202-208.
- [3] <https://en.wikipedia.org/wiki/Reducer> (preuzeto 3.5.2019.)
- [4] <http://www.vis-trgovina.hr/cijevi-i-cijevni-fitinzi/celicne-cijevi-i-fitinzi-iz-nehrdajuceg-celika-i-specijalnih-legura/> (preuzeto 3.5.2019.)
- [5] <https://www.indiamart.com/proddetail/reducer-eccentric-welding-type-11690382991.html> (preuzeto 3.5.2019)
- [6] Drk, P.: Tehnološki postupak zavarivanja plašta kućišta za rasklopna postrojenja EPP postupak, završni rad, Sveučilište Sjever, Varaždin 2015.  
<https://repozitorij.unin.hr/islandora/object/unin:70/preview> (preuzeto 13.7.2019)
- [7] Gojić M.: Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški Fakultet, Sisak, 2008.(preuzeto 21.05.2019)
- [8] Decker K.-H., Elementi strojeva, Tehnička knjiga, Zagreb, 1975. (preuzeto 2.7.2019)
- [9] Sedmak, A., Šijački-Žeravčić, V. Milosavljević, A., Đorđević, V., Vukićević, M.: Mašinski materijali II deo, izdanje Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, 2000.  
<http://afrodita.rcub.bg.ac.rs/~rzoran/ZAVAELEKT.pdf> (preuzeto 3.7.2019)
- [10] Rakin M. : Zavarivanje i srodni postupci, V izdanje, Tehnička knjiga, Beograd, 1986.
- [11] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektri%C4%8Dni\\_luk#/media/Datoteka:Elektricni\\_luk.jpg](https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektri%C4%8Dni_luk#/media/Datoteka:Elektricni_luk.jpg) (preuzeto 25.06.2019)
- [12] <https://sites.google.com/site/gobanengineeringnotes/welding/tig-tags-welding> (preuzeto 3.5.2019)
- [13] <https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/postupci1.pdf> (preuzeto 3.7.2019)
- [14] <https://www.usinenouvelle.com/expo/soudage-a-l-arc-generateur-tig-tr-p174732.html> (preuzeto 13.06.2019)
- [15] <http://www.gemtradedoo.com/prednosti-mane-tig-gtaw-procesa> (preuzeto 3.7.2019)
- [16] Horvat M., Kondić V., Brezovečki D.: Teorijske i praktične osnove TIG postupka zavarivanja, Technical Journal 8 (4), 2014., 426-432.
- [17] [https://www.reddit.com/r/oddlysatisfying/comments/97qlto/so\\_i\\_heard\\_you\\_like\\_welds/](https://www.reddit.com/r/oddlysatisfying/comments/97qlto/so_i_heard_you_like_welds/) (preuzeto 3.11.2018)
- [18] Jeyaprakash N. , Haile A. , Arunprasath M. , The Parameters and Equipments Used in TIG welding: A Review, The International Journal Of Engineering And Science (IJES)  
<http://www.theijes.com/papers/v4-i2/Version-2/C042011020.pdf> (preuzeto 14.06.2019)
- [19] <https://www.indiamart.com/proddetail/tig-torch-spares-3854430948.html> (preuzeto 14.5.2019)
- [20] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Zavarivanje\\_TIG\\_postupkom#Netaljive\\_elektrode](https://hr.wikipedia.org/wiki/Zavarivanje_TIG_postupkom#Netaljive_elektrode) (preuzeto 3.7.2019)
- [21] [https://proficentar.ba/shop/proizvod/elektroda-igla-wolfram-za-tig-zavarivanje-24x175-red-  
crvena/2868](https://proficentar.ba/shop/proizvod/elektroda-igla-wolfram-za-tig-zavarivanje-24x175-red-crvena/2868) (preuzeto 3.11.2018)
- [22] [https://www.fronius.com/en/welding-technology/products/manual-  
welding/tig/transtig/transtig/transtig-2500](https://www.fronius.com/en/welding-technology/products/manual-welding/tig/transtig/transtig/transtig-2500) (preuzeto 14.06.2019)
- [23] [http://yonetim.kamelkaynak.com.tr/Products/Pdfs/B\\_B%C3%96HLER\\_DMO-  
IG\\_GTAW\\_02479.pdf](http://yonetim.kamelkaynak.com.tr/Products/Pdfs/B_B%C3%96HLER_DMO-IG_GTAW_02479.pdf) (preuzeto 3.7.2019)

- [24] <https://www.zultner.at/en/boehler-dmo-ig-schweissstab-24-1000mm-1> (preuzeto 13.06.2019)
- [25] <http://www.pse.pbf.hr/hrvatski/elementi/ar/spojevi.html> (preuzeto 3.7.2019)
- [26] <https://www.jeftinije.hr/Proizvod/3048008/alati-i-strojevi/pribor-i-potrosni-material/ostali-dodaci/plinska-boca-argon-10kg> (preuzeto 13.06.2019)
- [27] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Zavareni\\_spoj#Vrste\\_zavareni\\_h\\_spojeva](https://hr.wikipedia.org/wiki/Zavareni_spoj#Vrste_zavareni_h_spojeva) (preuzeto 14.06.2019)
- [28] Grozdanić V., Markotić A., Metalurgija željeza i čelika, Zbirka riješenih zadataka, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak 2006.
- [29] Gojić M., Metalurgija čelika, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2006.
- [30] Merkač-Hudopisk I., Svojstva i primjena visokočvrstih čelika, Sveučilište Sjever, Varaždin 2018. <https://repozitorij.unin.hr/islandora/object/unin%3A1986/datastream/PDF/view> (preuzeto 7.7.2019)
- [31] Kožuh S: Specijalni čelici, skripta, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2010. <https://www.simet.unizg.hr/hr/nastava/predavanja/diplomski-sveucilisni-studij-metalurgija/2-godina-diplomskog-studija/specijalni-celici/view> (preuzeto 20.06.2019)
- [32] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Cijev#%C4%8Celi%C4%8Dne\\_be%C5%A1avne\\_cijevi](https://hr.wikipedia.org/wiki/Cijev#%C4%8Celi%C4%8Dne_be%C5%A1avne_cijevi) (preuzeto 14.6.2019)
- [33] Jurakić B, Diplomski rad sveučilišnog dodiplomskog studija, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavonskom brodu, Slavonski Brod, 2010. <https://bib.irb.hr/datoteka/485022.Diplomski.pdf> (preuzeto 15.06.2019)

# ŽIVOTOPIS

## OSOBNI PODACI:

Ime i prezime: Norman Štimac  
Datum i mjesto rođenja: 01.10.1997. , Sisak  
Adresa: Ulica Kneza Domagoja 11  
Telefon: 097/775-4812  
E-mail: norman.stimac31@gmail.com

## OBRAZOVANJE:

2005.-2013. –Osnovna škola „Braća Bobetko“ Sisak  
2013.-2015. –Industrijsko-obrtnička škola Sisak, automehatničar  
2015.- –Metalurški fakultet Sisak, izvanredni stručni studij ljevarstvo

## VJEŠTINE:

- poznavanje i vladanje radom na računalu,
- znanje engleskog jezika,
- vozačka dozvola B kategorije
- komunikativan, empatičan i vješt u timskom radu.