

Ispitivanje materijala zavara

Ivković, Ante

Undergraduate thesis / Završni rad

2025

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:478631>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-25**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ante Ivković

Zagreb, 2025. godine

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Zdravko Schauperl, dipl. ing.
Dr. sc. Dalibor Viderščak, mag. ing. mech

Student:

Ante Ivković

Zagreb, 2025. godine

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

Zahvaljujem se mentorima prof. dr. sc. Zdravku Schauperlu i dr. sc. Daliboru Viderščaku na pruženoj pomoći i savjetima tijekom izrade ovog završnog rada.

Također se zahvaljujem laborantima Ivanu Martinku i Ivanu Vovku na pruženim savjetima i izdvojenom vremenu tijekom laboratorijskih mjerenja.

Ante Ivković



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 25 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 25 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ante Ivković** JMBAG: **0035240606**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Ispitivanje materijala zavara**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Examination of the welded joint**

Opis zadatka:

Zavarivanje je ključan proces spajanja metalnih komponenti u različitim industrijama, kao što su automobilska, brodogradnja i zrakoplovna industrija. Kvaliteta zavara ima izravan utjecaj na pouzdanost i dugovječnost struktura koje podnose visoka mehanička opterećenja i izložene su različitim radnim uvjetima.

U teorijskom dijelu radu potrebno je opisati najčešće metode zavarivanja i njihove prednosti i nedostatke, te standarde za ocjenu kvalitete zavara (ISO, AWS).

U eksperimentalnom dijelu je potrebno pripremiti metalografske uzorke zavarenih spojeva te provesti analizu. Materijal zavara treba analizirati pomoću svjetlosnog mikroskopa s ciljem analize mikrostrukture i uvida u eventualne nesavršenosti. Dodatno je potrebno ispitati tvrdoću zavarenog spoja, kako bi se procijenila mehanička otpornost. Ispitivanja je potrebno provesti u skladu sa odgovarajućim standardima, a na temelju dobivenih rezultata treba donijeti zaključke o kvaliteti zavara.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2024.

Datum predaje rada:

1. rok: 20. i 21. 2. 2025.
2. rok: 10. i 11. 7. 2025.
3. rok: 18. i 19. 9. 2025.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 24. 2. - 28. 2. 2025.
2. rok: 15. 7. - 18. 7. 2025.
3. rok: 22. 9. - 26. 9. 2025.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Zdravko Schaperl

Dr. sc. Dalibor Mideršćak

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Damir Godec

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA	IV
POPIS KRATICA	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD.....	1
2. POSTUPAK ZAVARIVANJA	2
2.1. Općenito o zavarivanju	2
2.2. Položaji zavarivanja	5
2.3. Metode zavarivanja	6
3. MIG/MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA	8
3.1. Osnovno o MIG/MAG postupku zavarivanja	8
3.2. Zaštitni plinovi kod MIG/MAG postupka.....	9
3.3. Primjena i karakteristike MIG/MAG postupku zavarivanja	11
3.4. Prijenos dodatnog materijala.....	13
4. ČELICI	15
4.1. Podjela nehrđajućih čelika	15
4.2. Osnovni podatci o austenitnom nehrđajućem čeliku	16
4.3. Osnovni podatci o čeliku.....	17
5. STANDARDI ZA OCJENU KVALITETE ZAVARA.....	20
6. EKSPERIMENTALNI DIO	22
6.1. Priprema uzorka	22
6.2. Mjerenje tvrdoće	23
6.3. Makrostrukturna analiza ispitnog uzorka.....	30
6.4. Mikrostrukturna analiza ispitnog uzorka	30
7. ZAKLJUČAK.....	36
LITERATURA.....	37
PRILOZI.....	39

POPIS SLIKA

Slika 1.	Zavareni spoj	2
Slika 2.	Načini zavarenog spoja.....	2
Slika 3.	Izgled zavarenog spoja	3
Slika 4.	Željezo i njegove promijene faza u strukturi ovisno o temperaturi.....	4
Slika 5.	Desna tehnika rada pri zavarivanju	4
Slika 6.	Položaji zavarivanja.....	5
Slika 7.	Različiti načini zavarivanja korijena zavara.....	5
Slika 8.	Prikaz zavarenog spoja taljenjem	6
Slika 9.	Zavarivanje pritiskom.....	7
Slika 10.	Uređaj za MIG/MAG zavarivanje	8
Slika 11.	Skica MIG/MAG postupka zavarivanja	9
Slika 12.	Boce u kojima se nalaze zaštitni plinovi za zavarivanje	10
Slika 13.	Prikazuje postupak MIG/MAG zavarivanja u praksi	12
Slika 14.	Izgled zavarenog spoja FCAW-praškom punjenom žicom.....	14
Slika 15.	Zavareni spoj praškom punjene žice	14
Slika 16.	Austenitnog nehrđajućeg čelika	16
Slika 17.	Dijagram Fe-C	18
Slika 18.	Dijagram kaljenja i popuštanja.....	19
Slika 19.	Uređaj Mecatome T260.....	22
Slika 20.	Uređaj Mecatech 250 SPI.....	23
Slika 21.	Utiskivanje penetratora Vickers metodom	24
Slika 22.	Prikazuje pravac kojim se provodilo mjerenje tvrdoće	26
Slika 23.	Ispitni uzorak pričvršćen ručnom presom i smolom	27
Slika 24.	Mjesta gdje su se provodila ispitivanja tvrdoće	27
Slika 25.	Histogram srednjih vrijednosti tvrdoća	29
Slika 26.	Prikazuje otisak koji je nastao tijekom mjerenja tvrdoće	29
Slika 27.	Prikaz makrostrukture ispitnog uzorka.....	30
Slika 28.	Prikaz svjetlosnog mikroskopa OLYMPUS GX51F.....	31
Slika 29.	Nagriženo stanje: osnovni materijal čelika.....	31
Slika 30.	Nagriženo stanje: osnovni materijal čelika.....	32
Slika 31.	Nagriženo stanje: čelik osnovnog materijala i ZUT-a.....	32
Slika 32.	Nagriženo stanje: čelik osnovnog materijala i ZUT-a.....	33
Slika 33.	Nagriženo stanje: austenitni nehrđajući čelik u osnovnom materijalu.....	33
Slika 34.	Nagriženo stanje: austenitni nehrđajući čelik u osnovnom materijalu.....	34
Slika 35.	Nagriženo stanje: austenitni nehrđajući čelik u području ZUT-a.....	34
Slika 36.	Nagriženo stanje: austenitni nehrđajući čelik u području ZUT-a.....	35

POPIS TABLICA

Tablica 1. Prikaz zavarivanja taljenjem i pritiskom	6
Tablica 2. Zaštitni plinovi i njihove kombinacije.....	11
Tablica 3. Mjerenje tvrdoće HV1 za čelik.....	28
Tablica 4. Mjerenje tvrdoće HV1 za austenitni nehrđajući čelik	28

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
<i>d</i>	mm	Srednja vrijednost dijagonala
<i>F</i>	N	Sila
<i>I</i>	A	Jakost struje
<i>m</i>	kg	Masa
<i>S</i>	mm ²	Površina poprečnog presjeka
<i>T</i>	°C	Temperatura
<i>t</i>	s	Vrijeme
<i>U</i>	V	Jakost napona

POPIS KRATICA

Kratika	Opis kratice
A ₁	Eutekdoidna temperatura
Ar ₂	Curiejeva temperatura
CO ₂	Ugljični dioksid
O ₂	Kisik
δ _a	Temperatura austenitizacije
δ _p	Temperatura popuštanja
A	Austenit
Ar	Argon
C	Ugljik
Cr	Krom
EN	Europski standard
EPP	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom pod zaštitom praška
EPT	Elektrolučno zavarivanje pod troskom
FCAW	Praškom punjena žica
Fe	Željezo
He	Heliji
HRN	Hrvatska nacionalna norma
HV	Tvrdoća po Vickersu
ISO	Međunarodna organizacija za norme
K	Karbid
M	Martenzit
MAG	Metalni aktivni plin (eng. Metal active gas)
Mb	Molibden
MIG	Metalni inertni plin (eng. Metal inert gas)
Mn	Mangan
Ni	Nikal
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje
Ti	Titan
TIG	Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom
ZUT	Zona utjecaja topline

SAŽETAK

U teorijskom dijelu ovog završnog rada opisan je postupak zavarivanja, njegove metode i najefikasniji načini zavarivanja. Detaljnije je objašnjen MIG/MAG postupak zavarivanja te njegove karakteristike i primjena u proizvodnji. Također je objašnjena osnovna podjela čelika i opširnije su opisani austenitni nehrđajući čelici i srednjeugljični čelici. Prikazani su standardi za ocjenu kvalitete zavara koji imaju veliku ulogu u postupku zavarivanja od strane zavarivača i pogona koji provodi postupak zavarivanja.

U eksperimentalnom dijelu rada je provedena analiza makrostrukturne i mikrostrukture zavarenog spoja. Provedeno je detaljno ispitivanje tvrdoće HV1 kako bi se utvrdilo do kojih je mikrostrukturnih promjena došlo prilikom zavarivanja te hoće li nastupiti povećanje tvrdoće u području oko zone zavarenog spoja.

Ključne riječi: zavarivanje, čelici, mikrostruktura, tvrdoća

SUMMARY

In the theoretical part of this final thesis, the welding procedure, its methods and the most efficient welding methods are described. The MIG/MAG welding process and its characteristics and application in production are explained in more detail. The basic classification of steels is also explained and austenitic stainless steels and medium carbon steels are described in more detail. The standards for weld quality assessment are presented, which play a major role in the welding process by the welder and the plant that performs the welding process.

In the experimental part of the work, a macrostructural and microstructural analysis of the welded joint was performed. A detailed examination of the hardness of HV1 was carried out in order to determine which microstructural changes occurred during welding and whether there will be an increase in hardness in the area around the welded joint zone.

Key words: welding, steels, microstructure, hardness

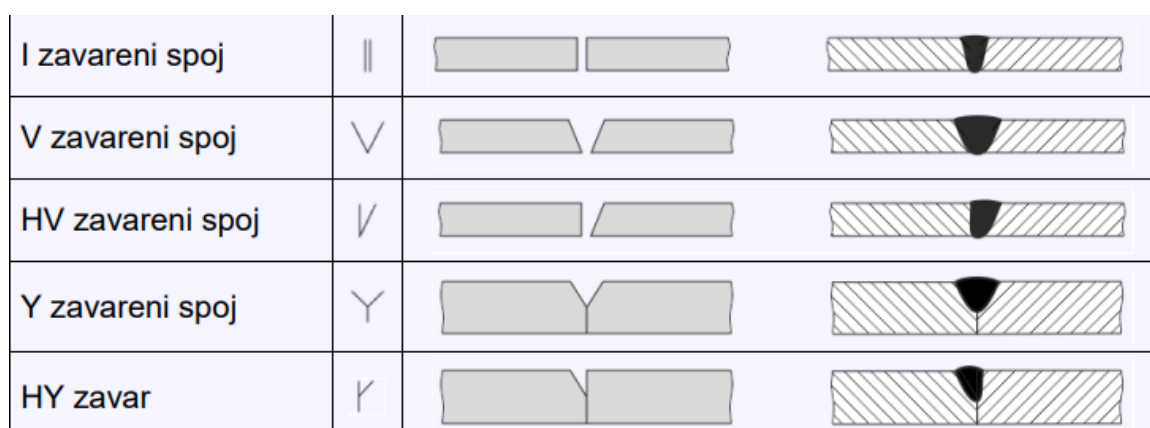
1. UVOD

Zavarivanje je jedan od temeljnih postupaka koji se koristi u industriji kako bi se omogućio najkvalitetniji način povezivanja dvaju konstrukcijskih dijelova. Njegova je primjena široka, počevši od načina i metoda kojima se mogu ostvariti zavareni spojevi te do materijala koji se zavaruju. Najvažniji dio zavarenog spoja je korijen zavara koji predstavlja temelj za izradu zavara i sami vrh zavara. Nedostaci zavara najčešće su uzrokovani nepravilnim tehnikama rada ili krivim odabirom materijala [1].

MIG/MAG postupak zavarivanja jedan je od najčešći postupaka koji se primjenjuje u pogonima. Ističe se po svojoj efikasnosti, brzini zavarivanja i mogućnosti vrlo lake automatizacije postupka. Sam postupak se odvija u zaštitnoj atmosferi inertnih ili aktivnih plinova koji štite zavareni spoj od utjecaja atmosfere i održavaju vođenje električnog luka [2]. Materijali poput austenitnog nehrđajućeg čelika i srednje ugljičnog čelika predstavljaju najčešće korištene materijale u industriji, kućanstvima, prehrambenoj industriji i brodogradnji. Jedan od problema koji se javljaju kod zavarivanja su pojave sitnih poroziteta pravilnih i nepravilnih oblika koji mogu narušiti mehanička svojstva zavara. Da bi se dobio kvalitetan zavar od zavarivača se zahtijeva da ima potrebna znanja i vještine, odnosno osposobljenost što dokazuje odgovarajućim atestom. Također postoje i norme koje se odnose na postupak zavarivanja [3].

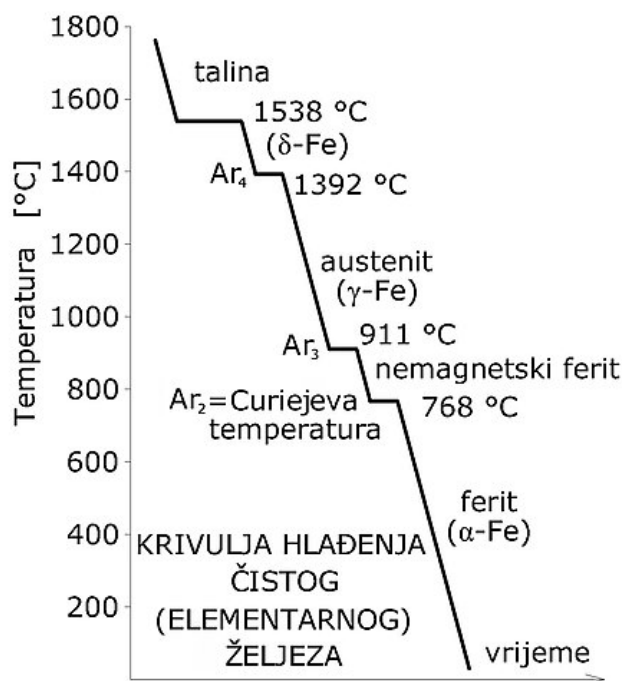
U ovom radu se detaljno ispituje do kakvih mikrostrukturnih promjena može doći prilikom zavarivanja i hoće li rezultirati porastom tvrdoće u području oko zavarenog spoja.

Zavareni spoj može biti zavaren na više različitih načina. Najpoznatije metode zavarivanja su: plinsko zavarivanje, REL-ručno elektrolučno zavarivanje, MIG/MAG zavarivanje (Metal Inert Gas/Metal Active Gas), TIG-elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom, EPP-elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom pod zaštitom praška, EPT-električno zavarivanje pod troskom, elektrotoporno zavarivanje, mokro podvodno zavarivanje. Najvažniji dio kod zavarenog spoja je korijen zavara. Korijen zavara karakterizira područje zavara gdje dodatni materijal u obliku elektrode ili žice za zavarivanje prvi dolazi u kontakt s radnim komadom [3]. Korijen zavara je bitan jer on predstavlja temelji zavara (najdublji dio zavara), također sprječava pucanje i pregorijevanja. Korijen zavara može biti dubine 2 do 3 milimetra ovisno o postupku zavarivanja, kod TIG i MIG postupka su manji korijeni zavara. Najčešći oblici zavarenih spojeva su: I-spoj, V-spoj, U-spoj, K-spoj, Y-spoj, HV/HY-spoj te njihove kombinacije. Ovisno o izgledu zavarenog spoja dobivaju naziv što je prikazano na slici 3 [3].



Slika 3. Izgled zavarenog spoja [3].

Također, ključan aspekt zavarivanja su svojstva zavarenog spoja, koja variraju ovisno o vrsti materijala i korištenom postupku zavarivanja. Na slici 4 prikazan je dijagram karakterističan za željezo, koji ilustrira promijene faza unutar njegove strukture [3].



Slika 4. Željezo i njegove promijene faza u strukturi ovisno o temperaturi [4].

Na promjenu strukture zavarenih spojeva se može utjecati primjenama različitih metoda rada: najpoznatije dvije metode su lijeva i desna tehnika rada.

Kod lijeve tehnike rada prvo se tali dodatni materijal pa osnovni s time se ostvaruje manji unos topline te se može koristiti za tanje materijale [3].



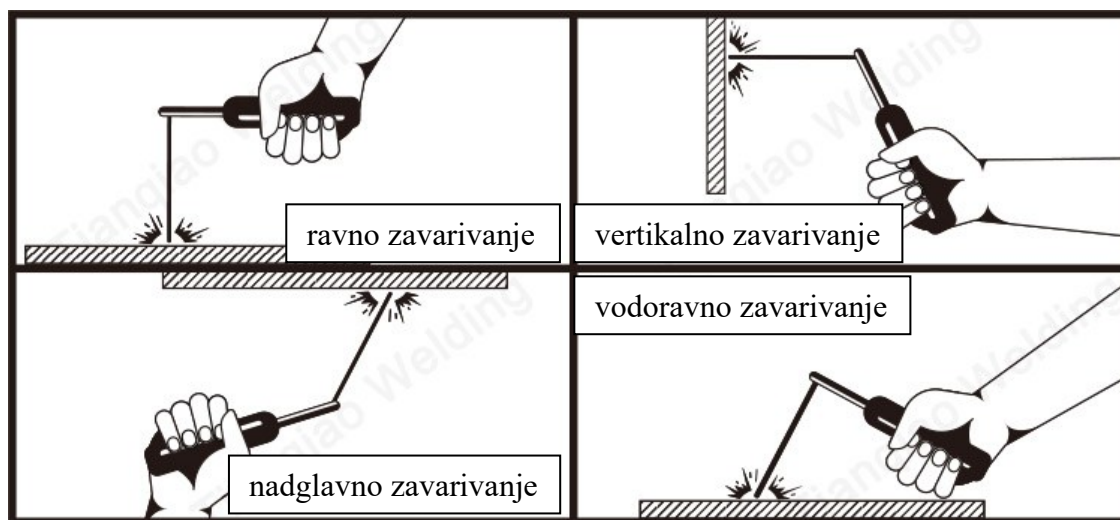
Slika 5. Desna tehnika rada pri zavarivanju [2].

Kod desne tehnike rada (slika 5) prvo se tali osnovni pa zatim dodatni materijal s čim se ostvaruje veći unos topline u osnovni materijal i koristi se uglavnom kod debljih materijala.

2.2 Položaji zavarivanja

Zavarivati možemo u raznim položajima ovisno o tehnici zavarivanja razlikujemo (slika 6):

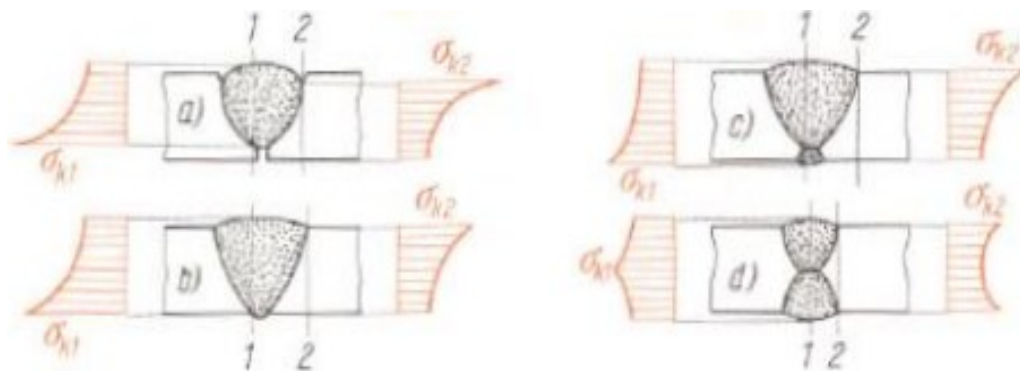
- 1G položaj zavarivanja, gdje '1' označava ravni položaj zavarivanja
- 2G položaj zavarivanja, gdje '2' označava vodoravni položaj zavarivanja
- 3G položaj zavarivanja, gdje '3' označava vertikalni položaj zavarivanja
- 4G položaj zavarivanja, gdje '4' označava položaj zavarivanja iznad glave.



Slika 6. Položaji zavarivanja [5].

Prethodno navedene tehnike se mogu koristiti kod TIG-a, MIG/MAG-a i REL-a.

Kao kod svih postupaka spajanja postoje određeni detalji koje se moraju izbjegavati kako bi se postigla odgovarajuća svojstva zavarenog spoja. Jedno od osnovnih je izbjegavanje zreznog djelovanja, skretanje toka sile, izbjegavanje gomilanja zavora, izbjegavati skupe pripreme radove i paziti na pristupačnost šavova. Na slici 7 je prikazano detaljnije korijen zavora i raspodjela naprezanja.



Slika 7. Različiti načini zavarivanja korijena zavora i raspodjela naprezanja [3].

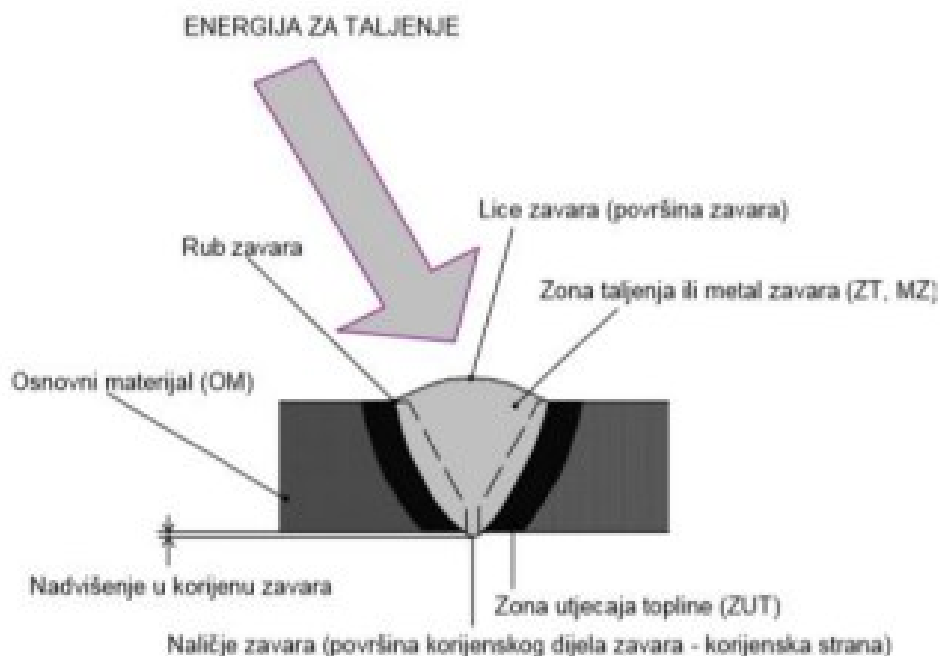
2.3 Metode zavarivanja

Metode zavarivanja se prema načinu spajanja dijele u dvije velike skupine tablica 1:

- 1) Zavarivanje taljenjem – zavarivanje materijala u rastaljenom stanju na mjestu spoja, uz prisustvo dodatnog materijala ili bez njega
- 2) Zavarivanje pritiskom – zavarivanje materijala u čvrstom ili mekanom stanju na mjestu spoja, uz pomoć pritiska ili udarca [6].

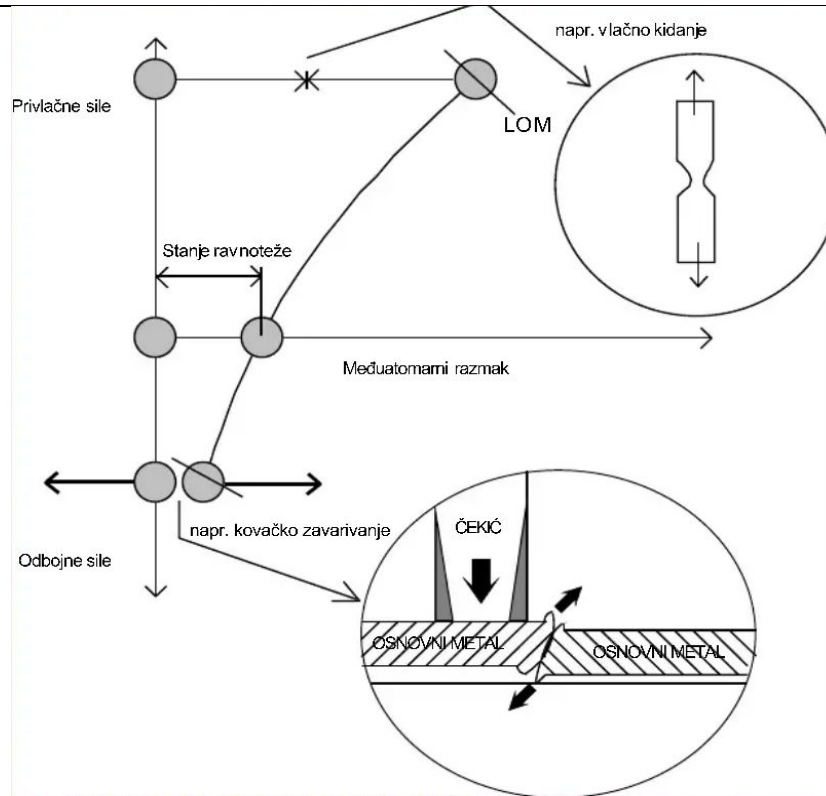
Tablica 1. Prikaz zavarivanja taljenjem i pritiskom.

Zavarivanje taljenjem	Zavarivanje pritiskom
Elektrolučno	Kovačko
Električno pod troskom (EPT)	Plinsko
Elektronskim mlazom	Difuzijono
Ljevačko	Hladno
Laserom	Elektrootporno
Plazmom	Ekspanzijom
Plinsko	Trenjem



Slika 8. Prikaz završenog spoja taljenjem [6].

Na slici 8 detaljnije je prikazano zavarivanje taljenjem i dio koji se odnosi na ZUT.



Slika 9. Zavarivanje pritiskom [6].

Sa slike 9 vidi se spoj dva materijala koji se postiže zavarivanjem pritiskom, gdje je osnovni cilj smanjenje međuatomskog razmaka i ostvarenje metalurške veze. Primjer sa slike je kovačko zavarivanje prikazano detaljem, kod odbojne sile. Kod zavarivanja pritiskom primjenjuje se mehanička sila (čekić) za postizanje čvrstog spoja između materijala [6].

3. MIG/MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA

3.1 Osnovno o MIG/MAG postupku zavarivanja

MIG/MAG postupak zavarivanja je elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom pod zaštitom plina. Ovisno o postupku zavarivanja kod MIG (Metal Inert Gas) zavarivanja koriste se inertni zaštitni plinovi kao što su argon (Ar), heliji (He) ili mješavina plinova koji se ponašaju kao inertni plin. MAG (Metal Active Gas) zavarivanje koristi aktivni zaštitni plin kao što je ugljični dioksid (CO₂) ili mješavina plinova koji se ponašaju kao aktivni plinovi.

MIG/MAG postupak zavarivanja jedan je od najčešćih postupaka koji se koristi u proizvodnji. U osnovnoj izvedbi je poluautomatski postupak, jer imamo konstantni dovod žice. Na slici 10 prikazan je uređaj za MIG/MAG zavarivanje.

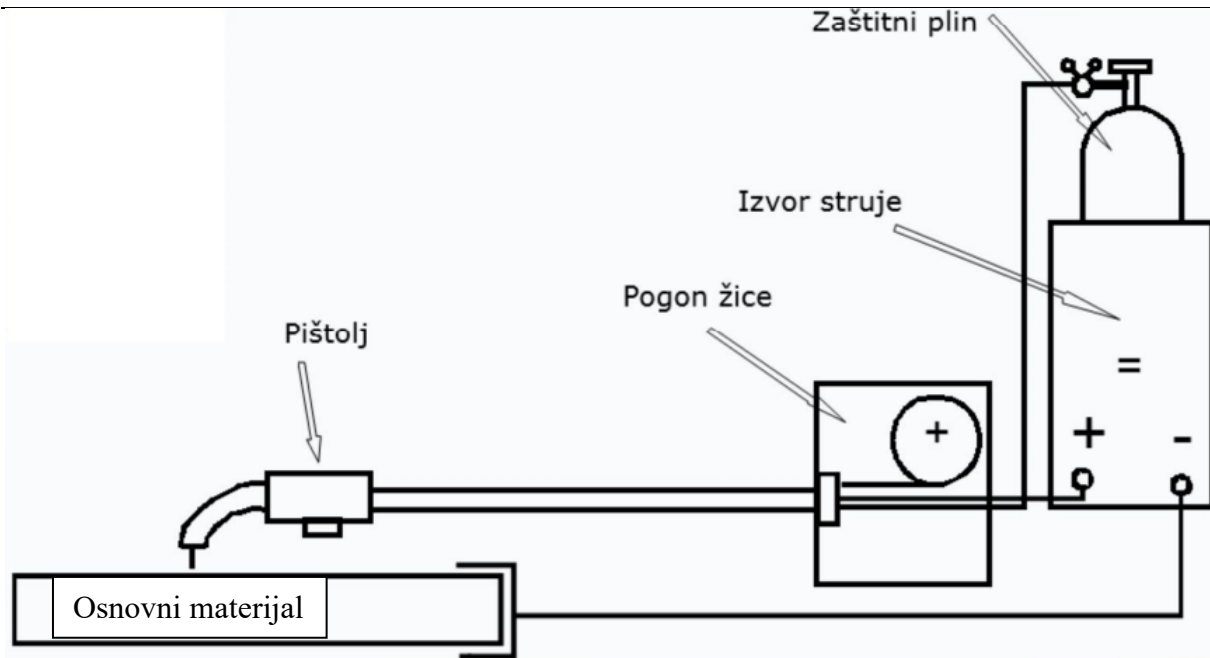


Slika 10. Uređaj za MIG/MAG zavarivanje [7].

Osnovna oprema kod MIG/MAG zavarivanja je: DC (Direct Current) uređaji, žica/elektroda na plus polu, dodavač žice, hladnjak, polikabel.

Na slici 11 prikazana je pojednostavljena skica MIG/MAG postupka zavarivanja.

Najčešći promjer žice je 1,2 milimetra, također MIG/MAG postupak zavarivanja je jedan od najčešće automatiziranih postupaka [8].



Slika 11. Skica MIG/MAG postupka zavarivanja [8].

U uređaju se nalazi pogonski sistem koji dovodi žicu/elektrodu konstantnom brzinom kroz cijevni paket i pištolj u električni luk. Izvor struje uvijek povezuje minus pol na osnovni materijal, dok se plus pol povezuje na dovod žice [8].

Parametri kod MIG/MAG zavarivanja :

- Jakost struje zavarivanja, A
- Napon luka, V
- Veličina dodatnog induktiviteta (uspon struje), H
- Brzina zavarivanja, $\frac{\text{cm}}{\text{min}}$
- Protočna količina zaštitnog plina, $\frac{\text{l}}{\text{min}}$
- Duljina slobodnog kraja žice, mm.

3.2 Zaštitni plinovi kod MIG/MAG postupka zavarivanja

Kod MIG/MAG zavarivanja osnovna uloga zaštitnih plinova je da štite rastaljeni metal od utjecaja okolne atmosfere i da ionizacijom osiguravaju vodljivi prostor za osiguravanje električnog luka. U slučaju primjene inertnog plina nema reakcije rastaljenog metala s plinom pa se takvi plinovi koriste kod zavarivanja osjetljivih materijala na utjecaj plinova iz atmosfere [8].

Utjecaj zaštitnih plinova održava se na:

- Električno fizikalnim svojstvima električnog luka (prijenos metala),
- Metalurške procese u talini zavara i
- Tehnološke parametre.

Najčešći zaštitni plinovi koji se koriste kod MIG/MAG postupka su argon, heliji, ugljikov dioksid, dušik, kisik i vodik.



Slika 12. Boce u kojima se nalaze zaštitni plinovi za zavarivanje [9].

Na slici 12 prikazane su boce u kojima se drže zaštitni plinovi za zavarivanje. Glavna uloga boca je da osiguraju sigurno skladištenje i distribuciju raznih plinova u industriji. Naravno da bi to bilo moguće boce su izrađene od visokokvalitetnog čelika, te su otporne na visok tlak i koroziju [9]. Primjena aktivnih plinova zahtjeva posebnu pažnju zbog moguće pojave oksidacije na površinskom sloju zavara. Oksidacija je karakteristična i za konvencionalne postupke zavarivanja pogotovo kada se koristi CO_2 zaštitni plin, jer se tada dolazi do sljedeće kemijske reakcije: $2\text{CO}_2 \leftrightarrow 2\text{CO} + \text{O}_2$. Vidi se da je došlo do redukcijske reakcije, gdje se stvorio CO (ugljikov-monoksid) i O_2 (kisik) koji mogu utjecati na svojstva zavarenog spoja [8].

U kojem će smjeru ići navedena reakcija ovisi prvenstveno o temperaturi. Pri višim temperaturama doći će do razlaganja plina, a na nižim temperaturama do spajanja plinova. Posljedično navedenom je oksidacija daleko najizraženija u sredini električnog luka, gdje je temperatura najviša, a najmanje izražena na površini metalne kupke. U tablici 2 su dani standardi zaštitni plinovi i njihove kombinacije kod MIG/MAG postupka zavarivanja [8].

Tablica 2. Zaštitni plinovi i njihove kombinacije [10].

Zaštitni plin	Materijali za koje se primjenjuje
CO ₂	Nelegirani i niskolegirani čelici
Ar + CO ₂ (20-50%)	Nelegirani i niskolegirani čelici
Ar + 2.5% CO ₂	Visokolegirani CrNi čelici
Ar + O ₂ (do 2%)	Aluminij, aluminijeve legure, visokolegirani CrNi čelici
Ar + CO ₂ + O ₂	Nelegirani i niskolegirani čelici
N ₂	Bakar i bakrene legure
CO ₂ + O ₂	Nelegirani čelici

3.3 Primjena i karakteristike MIG/MAG postupka

Najčešća primjena MIG/MAG postupka:

- metalna industrija,
- metalne konstrukcije,
- brodovi,
- posude pod tlakom,
- motorna vozila,
- aluminiji i njegove legure,
- građevinska industrija,
- industrija alata.



Slika 13. Postupak MIG/MAG zavarivanja u praksi [11].

Na slici 13 prikazan je izgled standardnog postupaka MIG/MAG zavarivanja u proizvodnji.

Prednosti MIG/MAG postupka [8]:

- univerzalna primjena s gledišta osnovnog materijala,
- velika brzina taljenja,
- velika brzina zavarivanja,
- relativno jednostavna obuka zavarivača,
- jednostavna automatizacija postupka,
- primjenjiv u prisilnim položajima zavarivanja,
- relativno niski investicijski troškovi,
- velika mogućnost izbora parametara i načina prijenosa materijala i
- moguća primjena i za lemljenje.

Nedostatci MIG/MAG postupka [8]:

- opasnosti od sistemske greške,
- kod rada na terenu moguće greške zbog otežane zaštite od vjetra,
- problem kod dovođenja žice,
- štrcanje kod zavarivanja kratkim spojevima,
- složeni uređaji i
- veći broj grešaka uslijed neodgovarajuće tehnike rada i parametara zavarivanja.

3.4 Prijenos dodatnog materijala

Osnovni načini prijenosa dodatnog materijala su prijenos kratkim spojevima, prijelaznim lukom, štrcajućim lukom i impulsno zavarivanje.

Kratke spojeve karakterizira niski unos energije u zavareni spoj, tanji limovi i prisilni položaj zavarivanja. Osnovni parametri su napon od 13 V do 21 V te struja od 50 A do 170A. Također pogodan je za primjenu pri nižim iznosima struje i pri najtanjim debljinama lima, za spajanje većih otvora žlijeba i za spojeve kod kojih se zahtijevaju što manje deformacije, jer se ovakvim lukom unosi mala količina topline. Prijelazni luk je nestabilan proces te se njegova primjena izbjegava, ima velike količine štrcanja i dima [8].

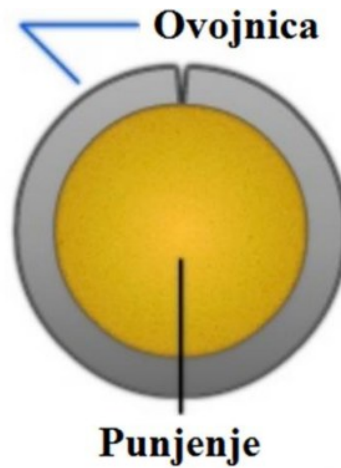
Štrcajući luk je za razliku od prijelaznog luka puno stabilniji proces, veći unos topline s manje količina štrcanja. Primjenjuje se za položene položaje i kod zavarivanja debljih limova.

Impulsni luk je stabilan luk i ima kontrolirani prijenos kapljica metala, nema štrcanja i mali unos topline se ostvaruje. Primjenjuje se zavarivanje u prisilnom položaju i ima čestu primjenu kod zavarivanje aluminija i nehrđajućih čelika.

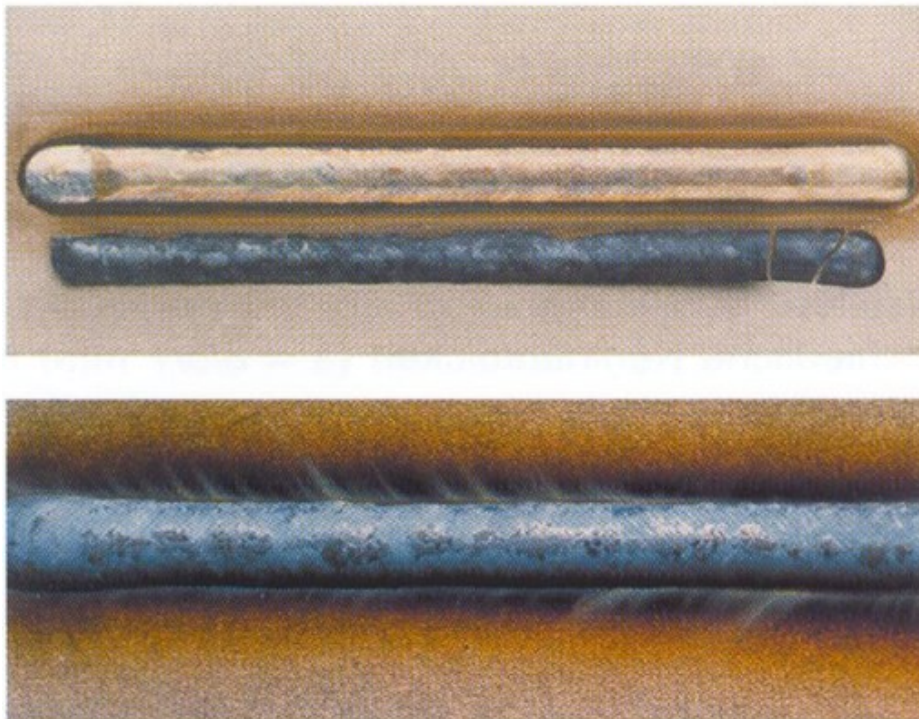
Karakteristike FCAW-praškom punjene žice [8]:

- mogućnost samozaštite (stvaranje troske na površini zavara),
- manja opasnost od naljepljivanja i bolja penetracija,
- veća učinkovitost te veća količina nataljenog materijala,
- bolja svojstva zavarenog spoja,
- manja potrošnja plina,
- potreban oprez kod skladištenja i rukovanja,
- viša cijena dodatnog materijala,
- mogućnost korištenja većih brzina zavarivanja i
- pogodno kod zavarivanja debljih materijala.

Žica koja se primjenjuje za zavarivanje kod MIG/MAG postupka je FCAW-praškom punjena žica (slika 14) [8].



Slika 14. Presjek FCAW-praškom punjene žice [8].



Slika 15. zavareni spoj praškom punjene žice [8].

Na slici 15 je prikazan izgled zavarenog spoja FCAW-praškom punjene žice. Na slici je prikazana visoka kvaliteta zavarenog spoja s malom zonom utjecaja topline i vrlo malo uključaka.

4. ČELICI

4.1 Podjela nehrđajućih čelika

Nehrđajući čelici dijele se u četiri osnovne skupine i još jednu koja se odnosi na precipitacijski očvrsnute nehrđajuće čelike [12].

Prva skupina su martenzitni nehrđajući čelici koji imaju M ili M+K mikrostrukturu. Osnovna svojstva su im dobra korozijska otpornost, visoka čvrstoća i tvrdoća, dobra otpornost na umor. Sadrže od 12 % do 18 % kroma i ugljika od 0,15 % do 1,2 %, ne koriste se pri temperaturama višim od 650°C [12].

Druga skupina su feritni nehrđajući čelici koji imaju feritnu mikrostrukturu. Posjeduju dobru korozijsku otpornost, feritni čelici su feromagnetični, lošije su zavarljivi te su 100 % reciklibilni. Krom je osnovni legirni dodatak koji varira od 10,5 % do 30 %. Ne primjenjuju se pri temperaturama višim od 400°C [12].

Treća skupina su austenitni nehrđajući čelici koji su detaljnije opisani u poglavlju 4.2.

Četvrta skupina su dupleks nehrđajući čelici koji se sastoje od dvije faze, austenitne koja ima FCC kristalnu rešetku i feritne koja ima BCC kristalnu rešetku [12].

Omjer dviju navedenih faza uspostavlja se idealnim omjerom 50:50. Osnovni legirni elementi su krom od 21 % do 33 % i nikal od 4 % do 9 %, također imaju R_m i $R_{p0,2}$ znatno veću od austenitnih nehrđajućih čelika [12].

Precipitacijski očvrsnuti čelici dijele se u tri skupine:

- Martenzitni sa mikrostrukturuom M + precipitati,
- Semi-austenitni sa mikrostrukturuom M + precipitati i
- Austenitni sa mikrostrukturuom A + precipitati.

Primjena nehrđajućih čelika je najčešća u:

- kemijskoj, procesnoj i petrokemijskoj industriji,
- industriji papira i celuloze,
- postrojenjima za preradu mlijeka i mliječnih proizvoda,
- farmaceutskoj industriji,
- postrojenjima za preradu hrane i
- različitim komercijalnim proizvodima poput kućanskih uređaja i dijelova automobila [12].

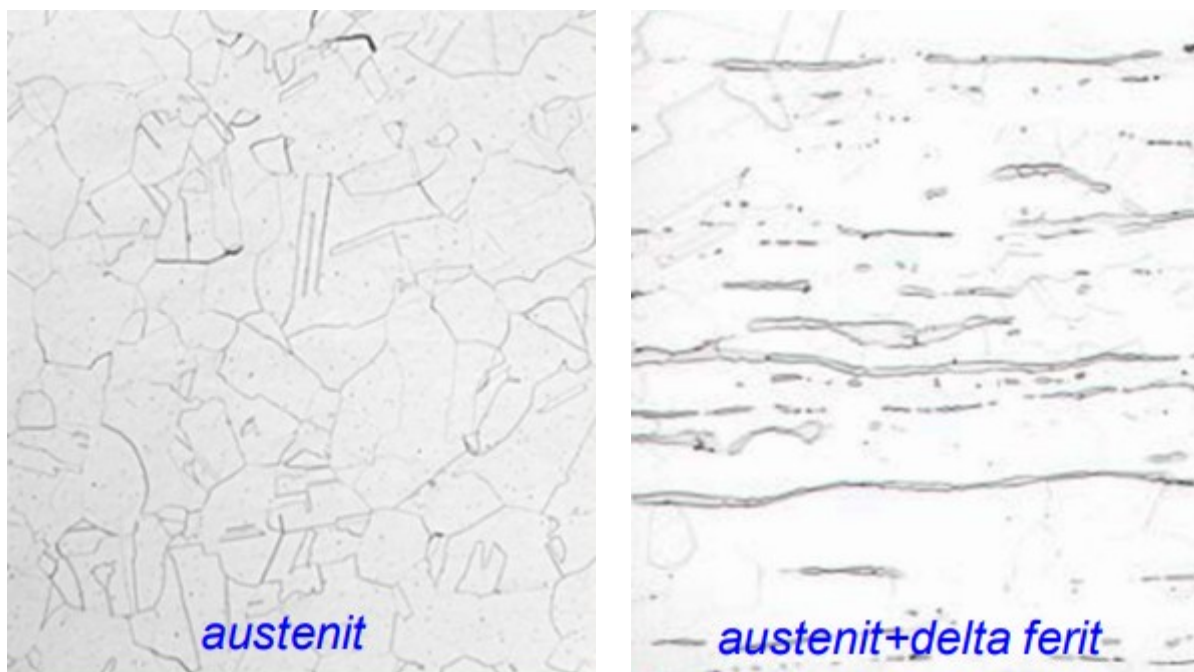
4.2 Austenitni nehrđajući čelici

Austenitni nehrđajući čelici jedni su od najvažnijih tipova nehrđajućih čelika, poznati su po svojoj odličnoj otpornosti na koroziju, dobrim mehaničkim svojstvima i vrlo dobroj obradivosti.

Osnovni legirni elementi su: Cr (16 %...26 %), Ni (8 %...20 %) i $Mn \leq 2\%$

Austenitni nehrđajući čelici sadrže nizak udio ugljika od 0,03% do 0,05%.

Idealna mikrostruktura je 100 % austenit ili austenit + delta ferit (slika 16).



Slika 16. Mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čelika [12].

Nizak udio ugljika osigurava bolju obradivost i oblikovljivost. Zahvaljujući visokom udjelu kroma postiže se vrlo dobra otpornost na koroziju stvaranjem zaštitnog oksidnog sloja na površini čelika. Naravno da bi se postigla ova svojstva krom mora biti upotpunosti otopljen u metalnoj osnovi, a nikako ne smije biti sastavni dio karbida ili drugih strukturnih tvorevina. Krom s kisikom iz zraka na površini formira stabilni oksidni sloj koji sprječava daljnju oksidaciju i koroziju u normalnim uvjetima. Taj oksidni sloj je vrlo tanak od 1 nm do 5 nm i odlično naliježe uz površinu nehrđajućeg čelika i ima mogućnost samoobnovljivosti u različitim medijima. Nikal ima ulogu u stabilizaciji austenitne strukture i povećanju duktilnost. Također povećava otpornost na koroziju. Nehrđajući čelici koji sadrže visoki udio nikla imaju visoku cijenu [12].

Drugi legirajući elementi mogu uključivati mangan (Mn), molibden (Mb), dušik (N) i titan (Ti) koji dodatno poboljšavaju otpornost na koroziju, čvrstoću pri povišenim temperaturama i mehanička svojstva općenito. Austenitni nehrđajući čelik je stabilan pri visokoj temperaturi od 870 °C, ovisno o vrsti legirajućih elemenata. To ga čini prikladnim za primjenu u kemijskoj industriji i procesnoj industriji koja zahtijeva rad na visokim temperaturama. Vrste austenitnih nehrđajućih čelika se obično dijele na nekoliko serija, najčešće serije su 300 i 316. Serija 300, poznatija kao serija 304 podrazumijeva čelike sa dobrom mehaničkom otpornošću i vrlo visokoj korozivskoj izdrživosti. Čelici u ovoj seriji najčešće imaju sadržaj od 18 % kroma i 8 % nikla. Serija 316 identična je prethodnoj, ali s malim dodatkom molibdena od 2 %. Molibden ima takva svojstva da povećava otpornost koroziji. Najčešća primjena ove serije je u kemijskoj industriji. Primjena austenitnih nehrđajućih čelika: kuhinjski uređaji i aparati, razna oprema u industriji, automobilska industrija, medicinski uređaji [12].

4.3 Osnovni podaci o čeliku

Čelik je legura ugljika (C) i željeza (Fe), koja se može sastojati od različitih legirajućih elemenata kako bi se poboljšala određena mehanička svojstva. Ovisno o udjelu ugljika i drugih legirajućih elemenata, čelik može imati razne mehaničke, kemijske i toplinske karakteristike te ga čini jednim od najzastupljenijih materijala u mnogim industrijama.

Sadrži ugljik u rasponu od 0,008 % do 2,14 %. Na temelju udjela ugljika kod čelika s < 0,8 % C povišenjem udjela ugljika raste HV, R_m , R_e , a smanjuje se istezljivost i udarni rad loma. Dok kod čelika sa > 0,8 % C povišenjem ugljika i dalje raste HV, ali opada R_m . Općenito porastom ugljika pada hladna deformabilnost i zavarljivost, a raste zakaljivost [12].

Čelici također mogu biti legirani s više ili manje legirajućih elemenata te se dijele u dvije grupe:

- niskolegirani čelici – to su čelici koji nemaju ni jedan udio legirajućeg elementa veći od 5 %, nemaju nikakvu oznaku ispred čelika
- visokolegirani čelici – to su čelici koji imaju barem jedan udio legirajućeg elementa veći od 5 %, njihova je oznaka (X).

Legirni elementi u čelicima se mogu pojaviti: rastvoreni u kristalima mješancima (austenitu i feritu), spojeni u karbidima i intermetanim spojevima (karbidotvorci su: krom, volfram, molibden, vanadij, niobij, tantal), kao nemetalni uključci (oksidi, nitridi, sulfidi, fosbidi) [12].

Legirani elementi se dijele u dvije glavne skupine:

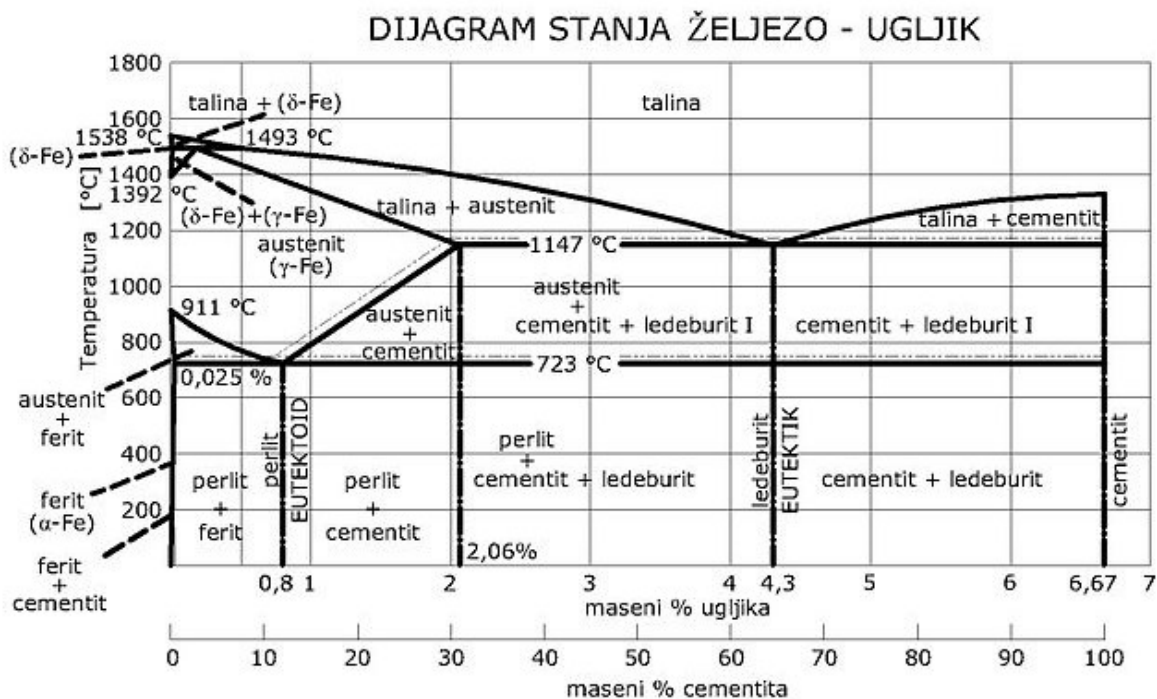
- gamageni – austenitotvorci: nikal, mangan, ugljik, dušik, bakar, kobalt i
- alfageni – feritotvorci: krom, molibden, silicij, niobij, aluminijski, vanadij, volfram.

Podjela čelika prema njihovoj namjeni dijeli se na konstrukcijske čelike i alatne čelike.

Konstrukcijski čelici posjeduju udio čelika manji od 0,6 % C te su legirani uglavnom s manganom, silicijem, niklom, kromom i volframom. Najčešće se koriste kod čeličnih konstrukcija, građevinskih konstrukcija, mostova, cijevi, brodogradnje... Također imaju visoku korozivnu postojanost (zbog udjela kroma), nisku tvrdoću (HV) i nisku otpornost trošenju (zbog nižeg udjela ugljika) [12].

Alatni čelici sadrže viši udio ugljika u rasponu od 0,6 % do 2 % C. Zbog visokog udjela ugljika posjeduju vrlo dobra mehanička svojstva. Imaju visoku tvrdoću, otpornost trošenju, ali nižu kemijsku postojanost. Najčešća primjena je u industriji obrade alata, automobilske industriji, alati koji zahtijevaju visoku otpornost trošenju [13].

Čelici se prema mikrostrukтури dijele na: feritne, perlitne, martenzitne i austenitne čelike. Najbolje opisana stanja nastanka i temperaturna područja u kojima se nalazi pojedina faza je opisano u Fe-C dijagramu (slika 17).



Slika 17. Dijagram Fe-C [14].

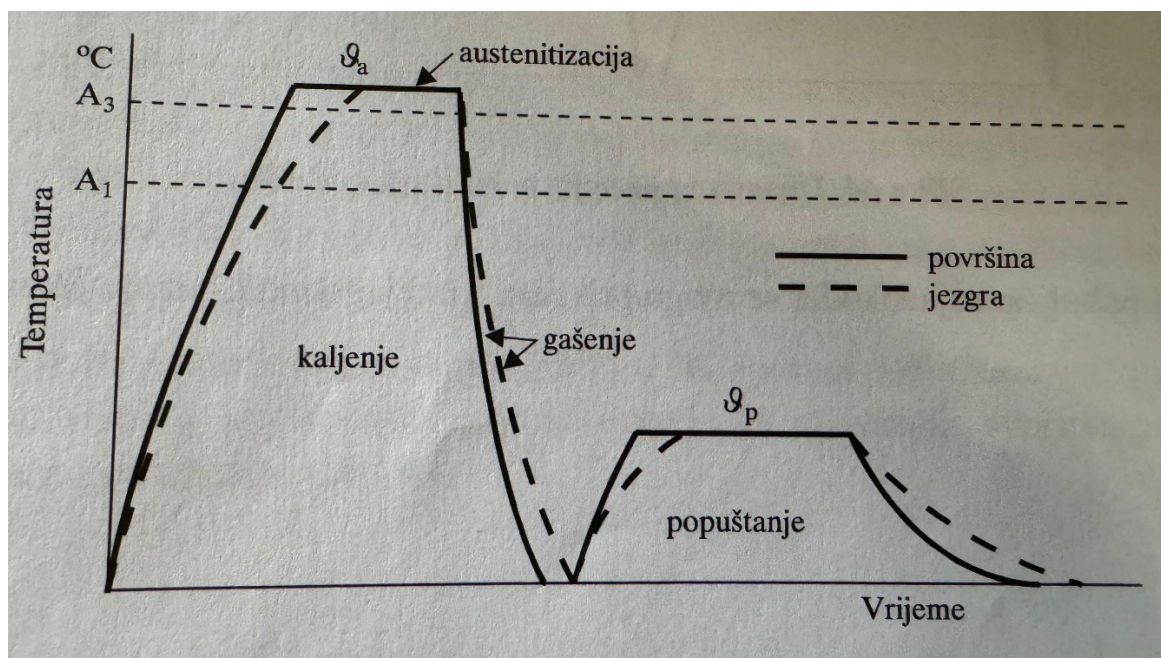
Najčešće primjenjivani postupci kod poboljšanja svojstva čelika su kaljenje i popuštanje prikazanih na (slici 18) [15].

Glavna svrha kaljenja čelika je postizanje najveće tvrdoće ovisno o udjelu ugljika u čeliku i što jednoličnijeg prokaljenja tj. što veće tvrdoće po poprečnom presijeku. Postupak kaljenja se sastoji od [15]:

- ugrijavanja na temperaturu austenitizacije i progrijavanja,
- držanja pri temperaturi austenitizacije i
- gašenja u svrhu postizanja martenzitne mikrostrukture.

Kod popuštanja radi se o postupku ugrijavanja kaljenog čelika na neku temperaturu ispod temperature A_1 u svrhu:

- povišenja žilavosti martenzita postignutog kaljenjem
- sniženjem vlastitih zaostalih napreznja
- postizanje dimenzijske postojanosti [15].



Slika 18. Dijagram kaljenja i popuštanja [15].

Sve pojave koje se odvijaju na određenom čeliku (legiranje, razni postupci toplinske obrade, žarenja i kemijski postupci) rade se u svrhu poboljšanja njegovih svojstava za točno određenu namjenu. U raznim industrijama se primjenjuju navedeni postupci i istražuju novi kako bi se iz svakog čelika izvukla njegova najbolja svojstva [15].

5. STANDARDI ZA OCJENU KVALITETE ZAVARA

Današnja kontrola kvalitete zahtjeva izvršitelja da posjeduje potrebna znanja i vještine. Zavarivač koji provodi postupak zavarivanja mora imati dokaz o osposobljenosti tj. atest zavarivača. Također sami postupak zavarivanja mora se provesti u skladu sa propisanom normom. Postoje norme koje se moraju poštivati od strane zavarivača i tvrtke koja provodi postupak zavarivanja [16].

Provjera o osposobljenosti zavarivača provodi se prema nizu normi HRN EN ISO 9606. Ovisno o postupku i vrsti materijala razlikujemo:

- HRN EN ISO 9606-1 – čelici i nikal, područje pokrivanja na osnovi dodatnih materijala i
- HRN EN ISO 9606-2 – aluminiji, područje pokrivanja na bazi osnovnog materijala [16].

Nekoliko nacionalnih instituta za standarde izdaje preporuke na koji način razmatrati pukotine u zavarenim strukturama, vezane za koncentratore naprezanja. Najpoznatiji su međunarodni institut za zavarivanje, britanski institut za standarde, američko udruženje za zavarivanje i međunarodno udruženje klasifikacijskih zavoda [17].

Tehnologija zavarivanja se dokazuje kvalifikacijom specifikacije postupka zavarivanja. PQR (Procedure Qualification Record) sadrži zapise o odobravanju i ispitivanju određene specifikacije zavarivanja [16].

Glavna norma koja se bavi zahtjevima za kvalitetu zavarivanja tvrtke koja izvodi radove je HRN EN ISO 3834. Zahtjevi sadržani u ovoj normi se mogu prilagoditi i na druge procese zavarivanja [16].

ISO 3834 pokriva nekoliko ključnih područja:

- planiranje kvalitete zavara,
- osposobljenost i obuka zavarivača,
- inspekcija i ispitivanje zavarivačkih spojeva i
- kontrola proizvodnog procesa [16].

Niz normi HRN EN ISO 3834:

HRN EN ISO 3834-1 Zahtjevi za kvalitetu zavarivanja taljenjem metalnih materijala -- 1. dio:
Kriteriji za izbor odgovarajuće razine zahtjeva za kvalitetu,

HRN EN ISO 3834-2 Zahtjevi za kvalitetu zavarivanja taljenjem metalnih materijala -- 2. dio:
Sveobuhvatni zahtjevi za kvalitetu,

HRN EN ISO 3834-3 Zahtjevi za kvalitetu zavarivanja taljenjem metalnih materijala -- 3. dio:
Standardni zahtjevi za kvalitetu,

HRN EN ISO 3834-4 Zahtjevi za kvalitetu zavarivanja taljenjem metalnih materijala -- 4. dio:
Osnovni zahtjevi za kvalitetu,

HRN EN ISO 3834-5 Zahtjevi za kvalitetu zavarivanja taljenjem metalnih materijala -- 5. dio:
Dokumenti kojih se treba pridržavati za traženje usklađivanja prema zahtjevima za kvalitetu
prema ISO 3834-2, ISO 3834-3 ili ISO 3834-4 i

HRI CEN ISO/TR 3834-6 Zahtjevi za kvalitetu zavarivanja taljenjem metalnih materijala --
6. dio: Smjernice za primjenu norme ISO 3834 [16].

6. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu ovoga rada provedeno je ispitivanje tvrdoće zavarenog spoja te analiza mikrostrukture nakon zavarivanja. Ispitni uzorak se sastoji od gornjeg i donjeg dijela koji se razlikuju po dimenzijama i strukturi međusobno povezanih MAG postupkom zavarivanja. Donji dio je čelični kvadar dimenzija 30 mm x 72 mm, dok je gornji dio austenitni nehrđajući čelik u obliku valjka promjera 20 mm i visine 25 mm, prikazano je na slici 27. Postupak zavarivanja je proveden u skladu s propisanom normom ISO 14343-A: G 23 12 L. Ispitni uzorak je prerezan na pola te je provedena standardna metalografska priprema uzorka koja se sastoji od brušenja, poliranja i nagrizanja. Nakon pripreme uzorka provelo se mjerenje tvrdoće HV1 pomoću tvrdomjera Zwick/Roell, model ZHV μ -ST. Mikrostruktura u poprečnom presjeku analizirana je pomoću svjetlosnog mikroskopa OLYMPUS GX51F-5 s integriranom Olympus DP-25-CCD kamerom (Olympus Corporation, Shinjuku City, Tokio, Japan).

6.1 Priprema uzorka

Ispitni uzorak prije samog ispitivanja i nadolazećih obrada je prepolovljen. Uzorak je prepolovljen u skladu sa propisanom normom uređajem naziva Mecatome T260 (slika 19). Korištena je brzina od 3000 okretaja u minuti te je ispitni uzorak hlađen vodom.



Slika 19. Uređaj Mecatome T260 [18].

Postupak brušenja je proces u kojem se uklanja materijal s površine pomoću abrazivnih materijala. Brušenje se provodi pomoću brusnih traka, diskova ili valjaka. Glavni cilj brušenja je ukloniti nesavršenosti kao što su neravnine, sitna izbočenja i udubljenja. Postupak brušenja je proveden na uređaju Mecatech 250 SPI (slika 20).



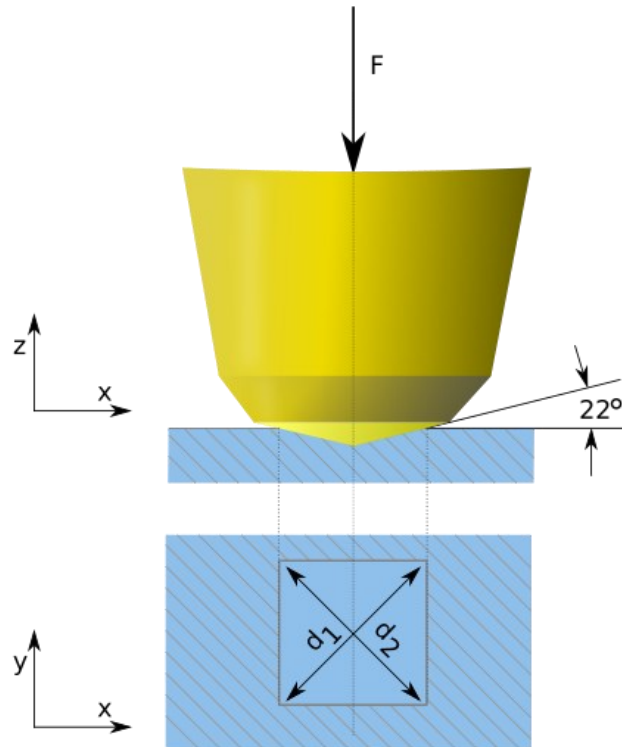
Slika 20. Uređaj Mecatech 250 SPI [19].

Brzina okretanja brusne ploče je 300 okretaja u minuti i tijekom brušenja kontinuirano teče voda koja ohlađuje i podmazuje površinu te odvodi nastale nečistoće.

Nakon postupka brušenja poveden je postupak poliranja. Postupak poliranja je proces koji je sličan brušenju samo se koriste finiji abrazivi kako bi se postigla sjajnija i glađa površina uzorka. Uklanjaju se sitne ogrebotine i neravnine koje se nisu uklonile brušenjem. Postupak poliranja je proveden na uređaju Mecatech 250 SPI prikazanom na slici 20.

6.2 Mjerenje tvrdoće

Mjerenje tvrdoće na ispitnom uzorku je provedeno pomoću Vickersove metode. Tvrdoća predstavlja otpornost materijala prema prodiranju nekog drugog znatno tvrdog tijela. Otpornost materijala ovisi o strukturi i sastavu samog materijala, također i o temperaturi i brzini prodiranja. Mjerenje tvrdoće po Vickersu je mjera otpornosti što ga pruža neki materijal prilikom prodiranja četverostrane dijamantne piramide sa vršnim kutom od 136° , opterećen određenom silom (slika 21) [20].



Slika 21. Utiskivanje penetratora Vickers metodom [20].

Tvrdoća se određuje pomoću slijedećeg izraza (1):

$$HV = \frac{F}{S} \quad (1)$$

gdje je:

F – primijenjena sila, N

S – površina šuplje piramide otisnute u materijalu, mm^2

Prilikom mjerenja tvrdoće primjenjuju se sile od 50 N do 1000 N, prilikom mjerenja vrlo tankih slojeva koristi se sila od 2 N do 30 N. Mikrotvrdomjeri koji rade po Vicekrsovoj metodi mogu mjeriti silu čak i sa 0,098N [20].

Pomoću mjernog mikroskopa mjere se dijagonale (d_1 i d_2) baze piramide otisnute na materijalu uzorka, a tvrdoća se dobiva pomoću izraza (2):

$$HV = \frac{F \times 0,189}{d^2} \quad (2)$$

gdje su:

F - primijenjena sila, N

d – srednja vrijednost dijagonala baza piramide u mm, koji se računa kao (3):

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (3)$$

gdje su:

d_1 - udaljenost između jednih suprotnih vrhova romba (duljina dijagonale)

d_2 – udaljenost između drugih suprotnih vrhova romba (duljina dijagonale) [20].

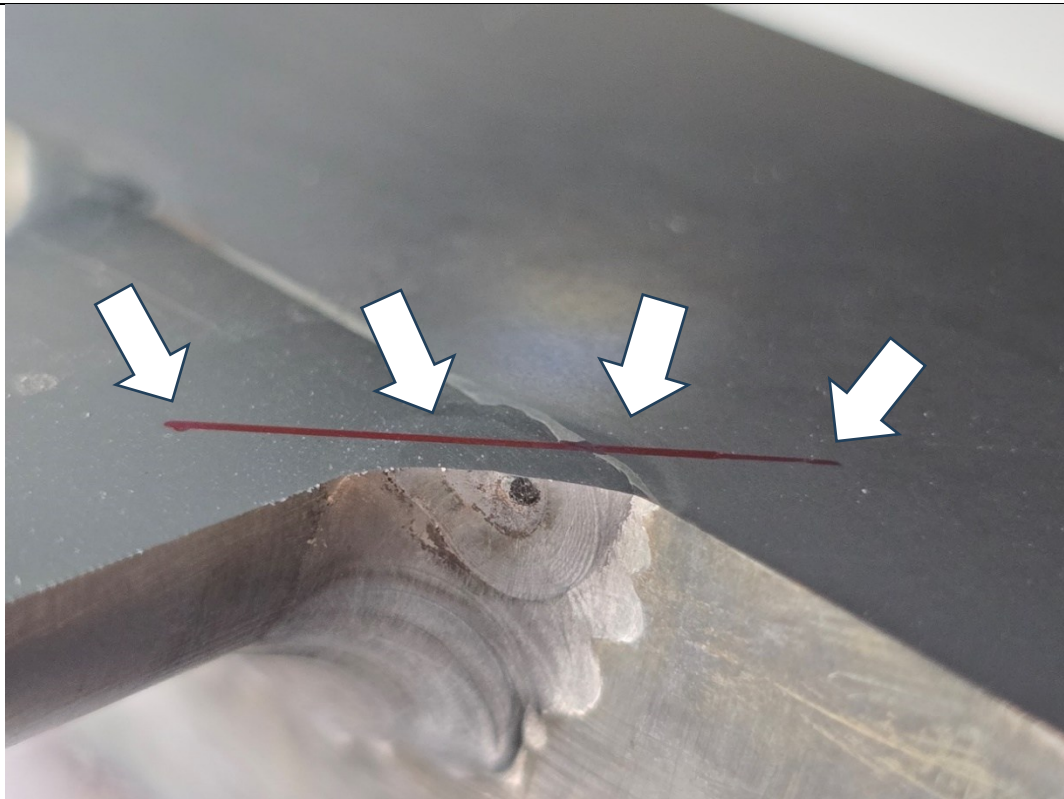
Prednosti Vickersove metode:

- tvrdoća nije ovisna o primijenjenoj sili,
- moguće je mjeriti tvrdoće i najtvrdih materijala,
- moguće je mjeriti tvrdoće i vrlo tankih uzoraka te čak tvrdoće pojedinih zrna,
- primjenjiva je u znanstveno istraživačkom radu u području materijala,
- otisak je vrlo malen pa ne oštećuje površinu,
- vrlo precizno određivanje tvrdoće i
- primjenjiva je u mikro i makro razini.

Nedostaci Vickersove metode:

- potrebna je pažljiva priprema površine uzorka na kojem se obavlja mjerenje,
- za mjerenje veličine otiska potreban je mjerni mikroskop,
- postupak zahtijeva više vremena,
- potrebno precizno postavljanje i kalibracija opreme,
- dovodi do oštećenja uzorka i
- kvaliteta uzroka jako ovisi o rezultatima.

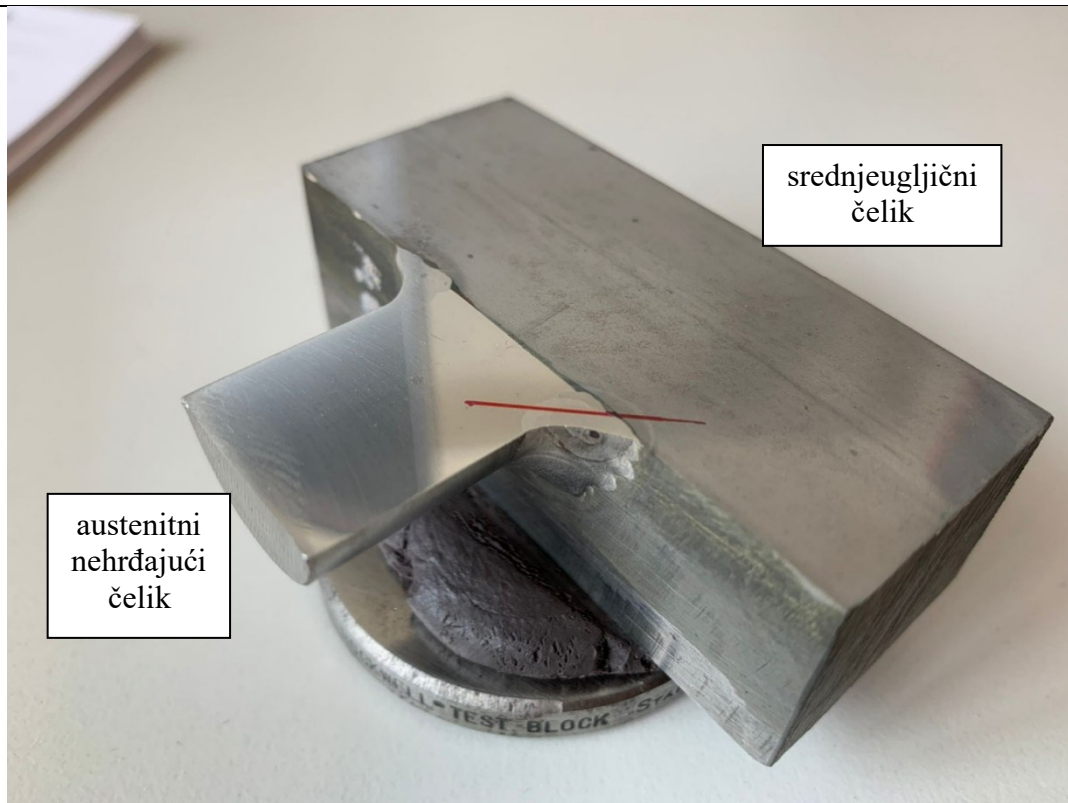
Mjerenje tvrdoće na uzorku je provedeno primjenom HV1, odnosno sila prodiranja dijamantnog penetratora je iznosila 9,98 N.



Slika 22. Pravac kojim se provodilo mjerenje tvrdoće.

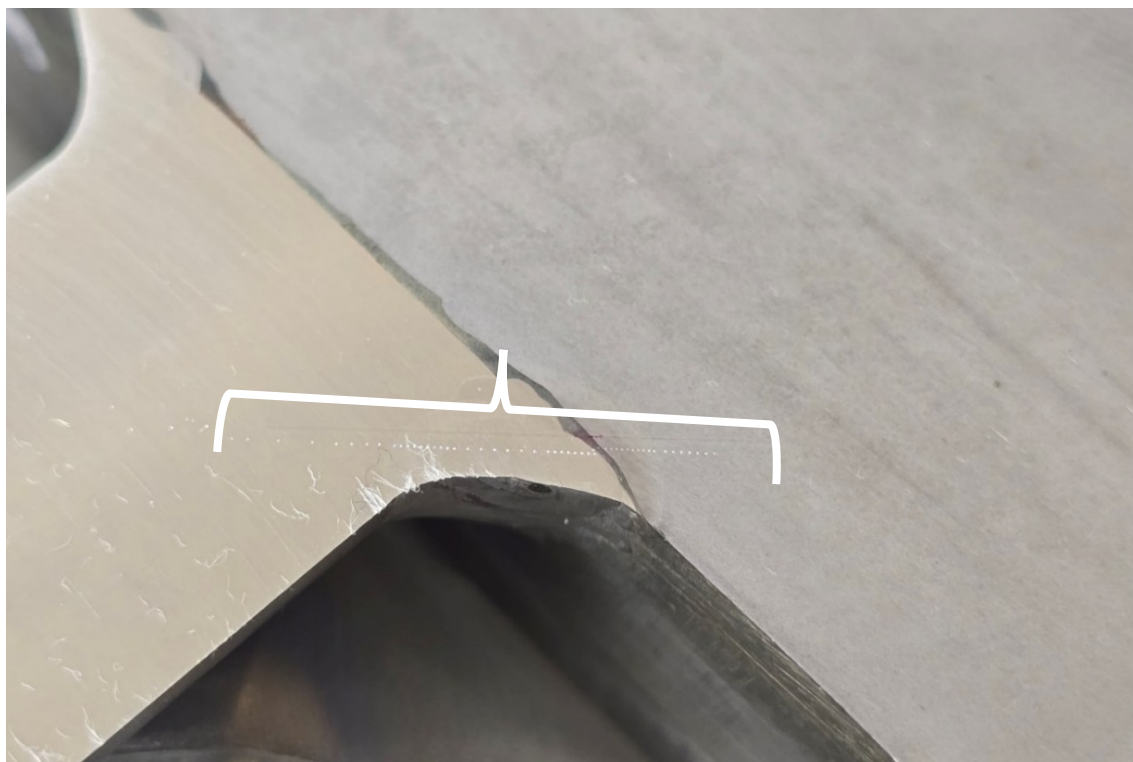
Na slici 22 je prikazana površina i pravac po kojem se provodilo mjerenje tvrdoće. Mjerenje je obuhvatilo dio osnovnog materijala srednjeugljičnog čelika prikazano prvom strelicom zdesna, a područje ZUT-a s drugom strelicom zdesna. Isti postupak je ponovljen kod austenitnog nehrđajućeg čelika, gdje je osnovni materijal označen lijevom strelicom, a područje ZUT-a drugom strelicom slijeva.

Mjerenje tvrdoće po Vickersu provedeno je na tvrdomjeru Zwick/Roell, model ZHV μ -ST. Ispitni uzorak sastoji se od spojenog čeličnog kvadra i austenitnog nehrđajućeg valjka. Kako se radi o valjkastom obliku, da bi se osiguralo što preciznije mjerenje, ispitni uzorak je učvršćen pomoću ručne preše i smole koji omogućuju mjerenje tvrdoće na dijelu koji se odnosi na austenitni nehrđajući čelik, slika 23.



Slika 23. Ispitni uzorak pričvršćen ručnom prešom i smolom.

Smola osigurava stabilnost i planparalelnost ispitnog uzorka tijekom mjerenja tvrdoće na dijelu prikazanom na slici 23.



Slika 24. Mjesta provođenja ispitivanja tvrdoće.

Slika 24 prikazuje mjesta na kojima su se provodila mjerenja tvrdoće te sukladno tome su formirane tablice s podacima.

Tablica 3. Mjerenje tvrdoće HV1 za čelik

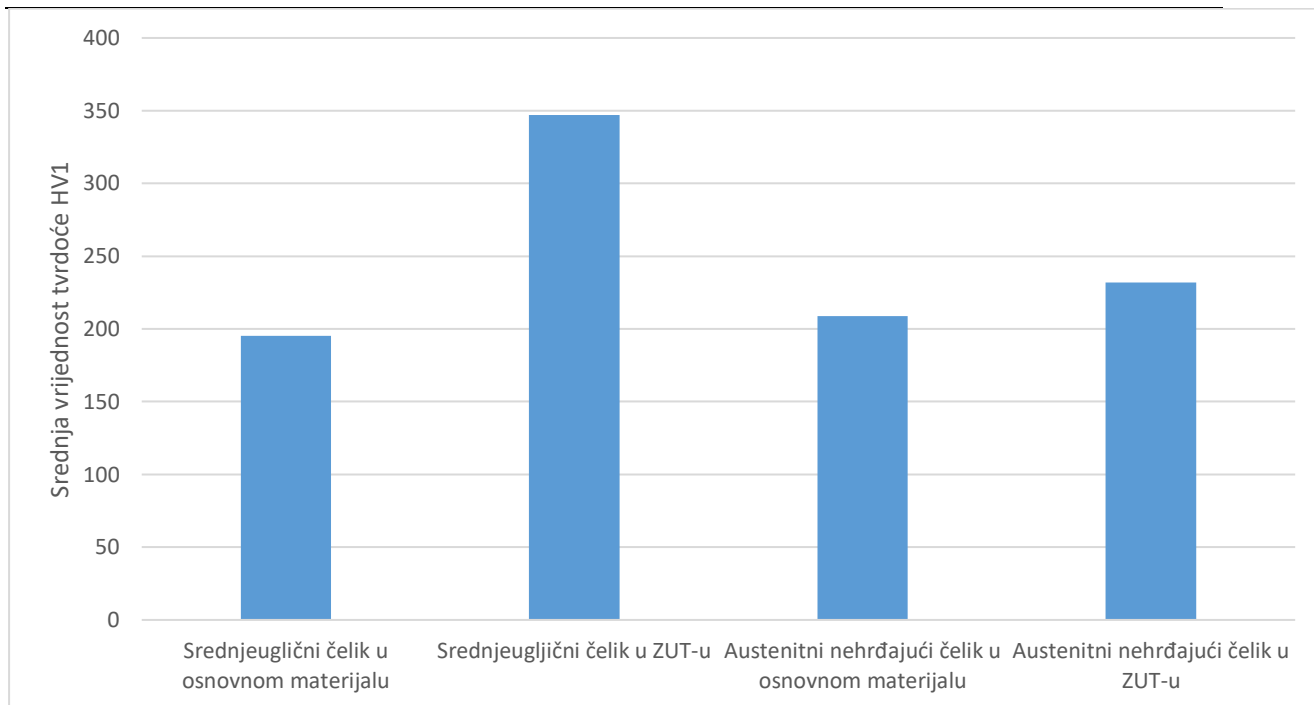
NAZIV UZORKA/MJERENJE	1	2	3	4	5	6	7	8	Srednja vrijednost	Standardna devijacija
Čelik, osnovni materijal, HV	183	188	195	193	194	201	204	205	196	7
Čelik, ZUT, HV	254	267	280	307	362	407	441	457	347	76

Tablica 4. Mjerenje tvrdoće HV1 za austenitni nehrđajući čelik

NAZIV UZORKA/MJERENJE	1	2	3	4	5	6	7	8	Srednja vrijednost	Standardna devijacija
Austenitni nehrđajući čelik, osnovni materijal, HV	193	211	217	218	211	207	210	204	209	7
Austenitni nehrđajući čelik, ZUT, HV	220	224	231	225	233	240	239	242	232	8

Dobiveni rezultati iz tablice 3 i tablice 4 su izmjereni utiskivanjem dijamantnog penetratora i očitavanjem njegovih dijagonala na nastalom uzorku.

Sa slike 25 može se očitati pomoću histograma srednja tvrdoća dobivena na različitim čelicima i u zoni utjecaja topline za pojedini čelik.



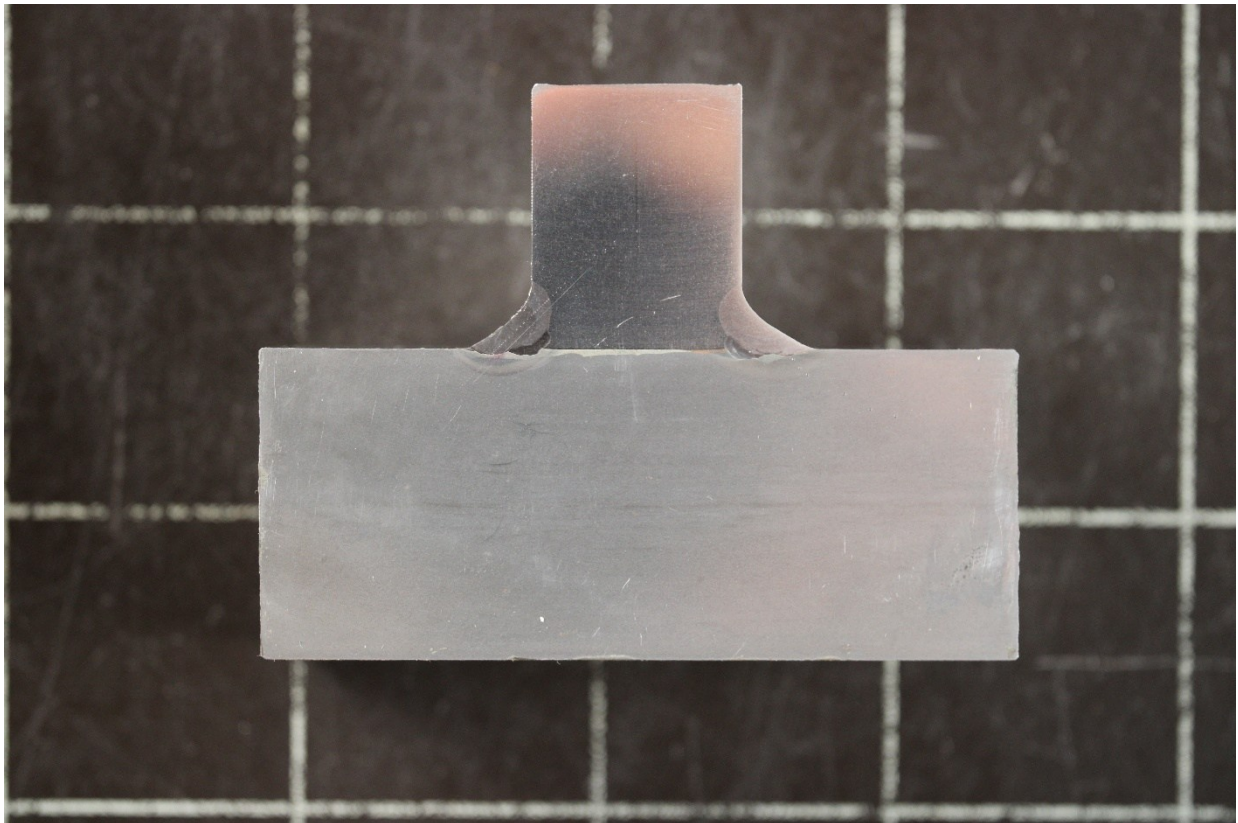
Slika 25. Histogram srednjih vrijednosti tvrdoća HV1.



Slika 26. Otisak nakon ispitivanja tvrdoće HV1 koji je nastao tijekom mjerenja tvrdoće.

Slika 26 prikazuje otisak koji bi nastajao nakon utiskivanja dijamantnog penetratora u ispitni uzorak.

6.2 Makrostrukturna analiza ispitnog uzorka



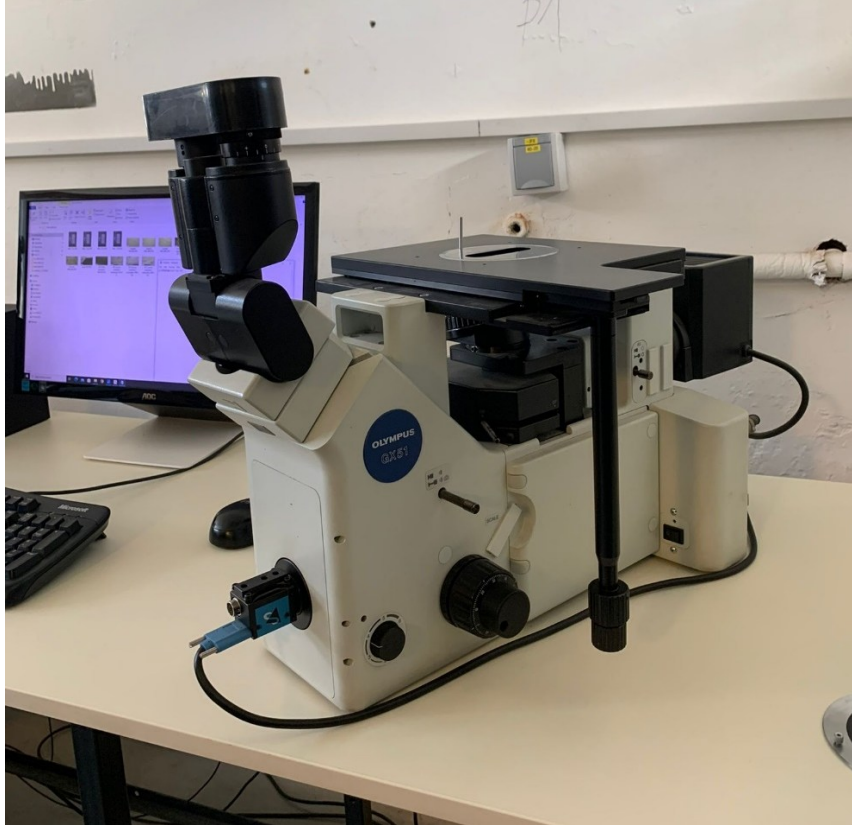
Slika 27. Makrostrukturna analiza ispitnog uzorka.

Na slici 27 je prikazana makrostrukturna analiza ispitnog uzorka. Na slici je vidljivo područje zavarenog spoja i zona utjecaja topline u austenitnom nehrđajućem čeliku (gornji dio) i srednjeugljičnom čeliku (donji dio).

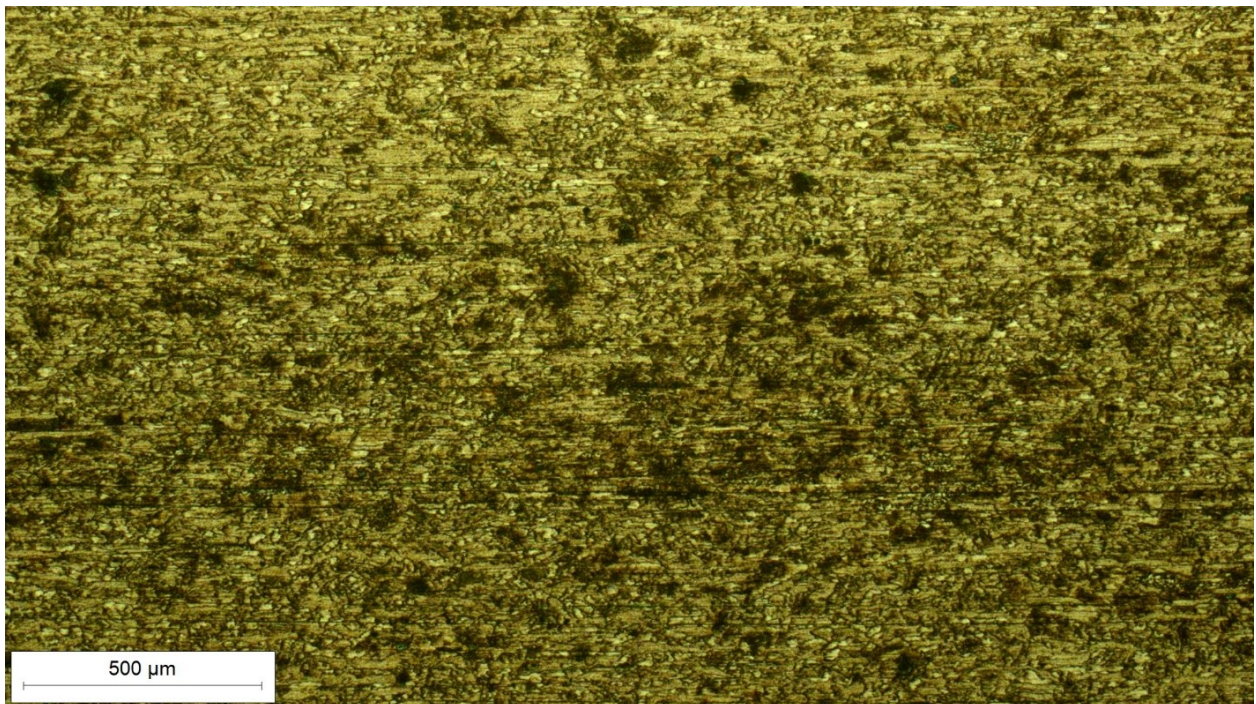
6.4 Mikrostrukturna analiza ispitnog uzorka

Mikrostrukturna analiza je provedena na ključnim mjestima ispitnog uzorka, kako bi se utvrdilo eventualno postojanje mikrostrukturnih promjena nakon postupka zavarivanja. Analiza je provedena svjetlosnim mikroskopom OLYMPUS GX51F-5 (slika 28).

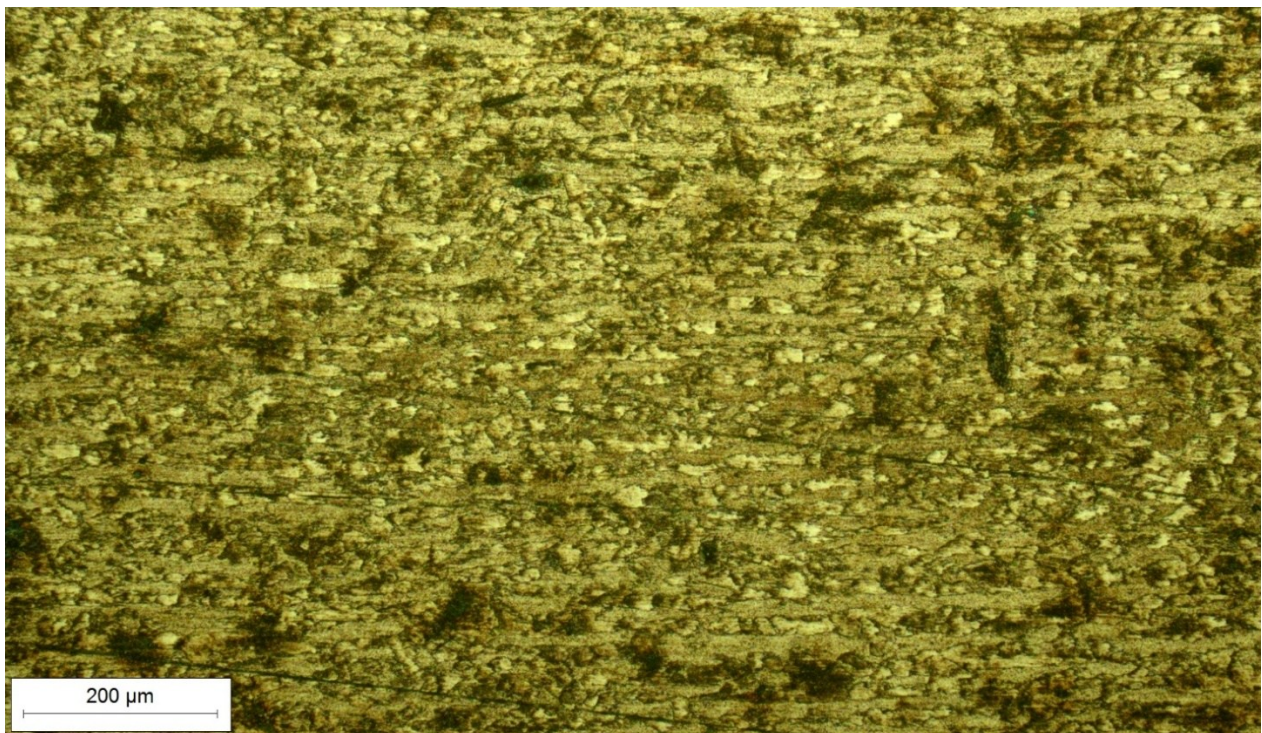
Korištena su uvećanja od 50x i 100x u područjima osnovnog materijala i ZUT-a.



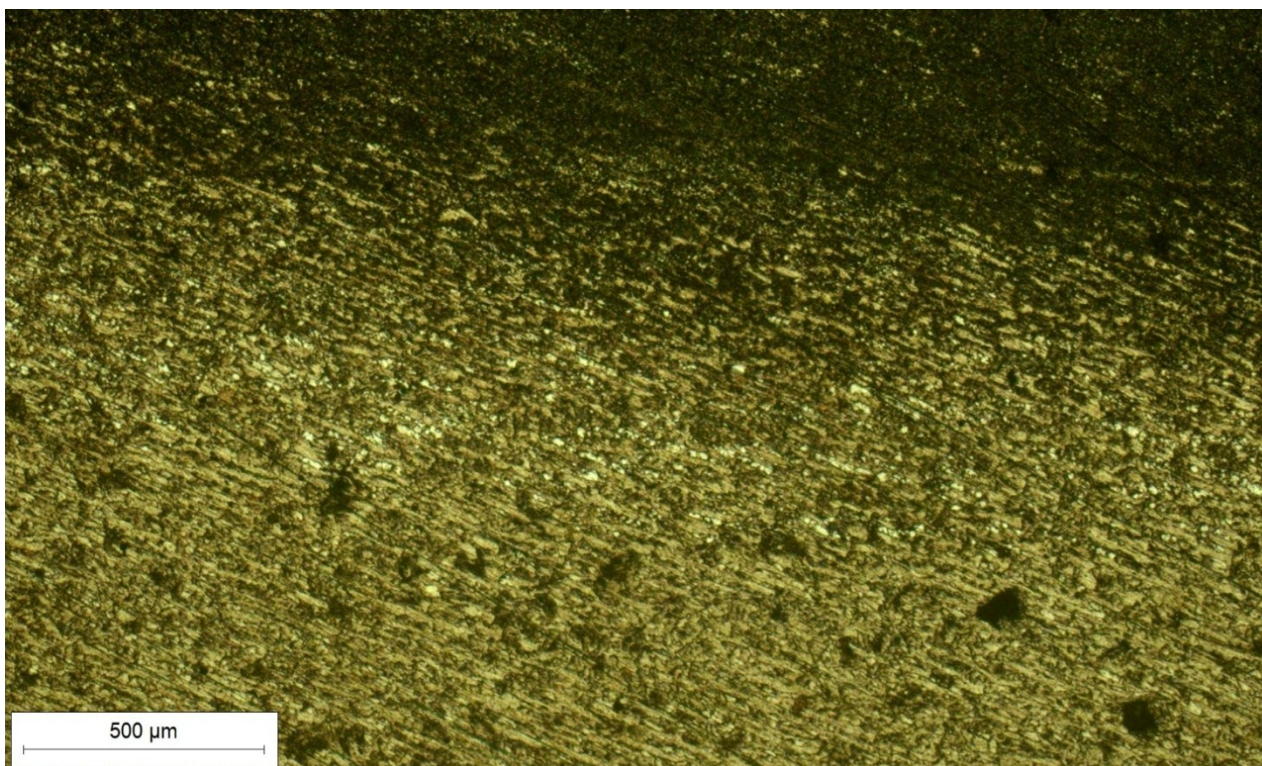
Slika 28. Svjetlosni mikroskop OLYMPUS GX51F.



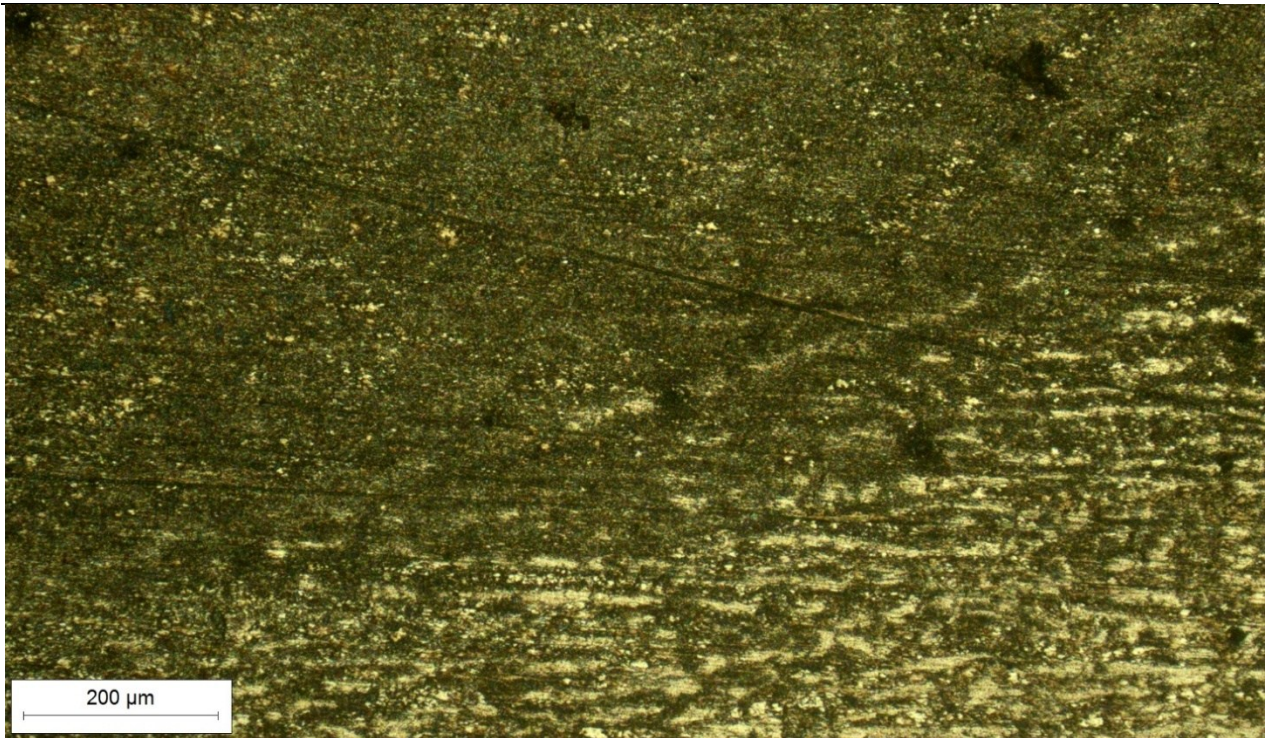
Slika 29. Nagriženo stanje: osnovni materijal čelika.



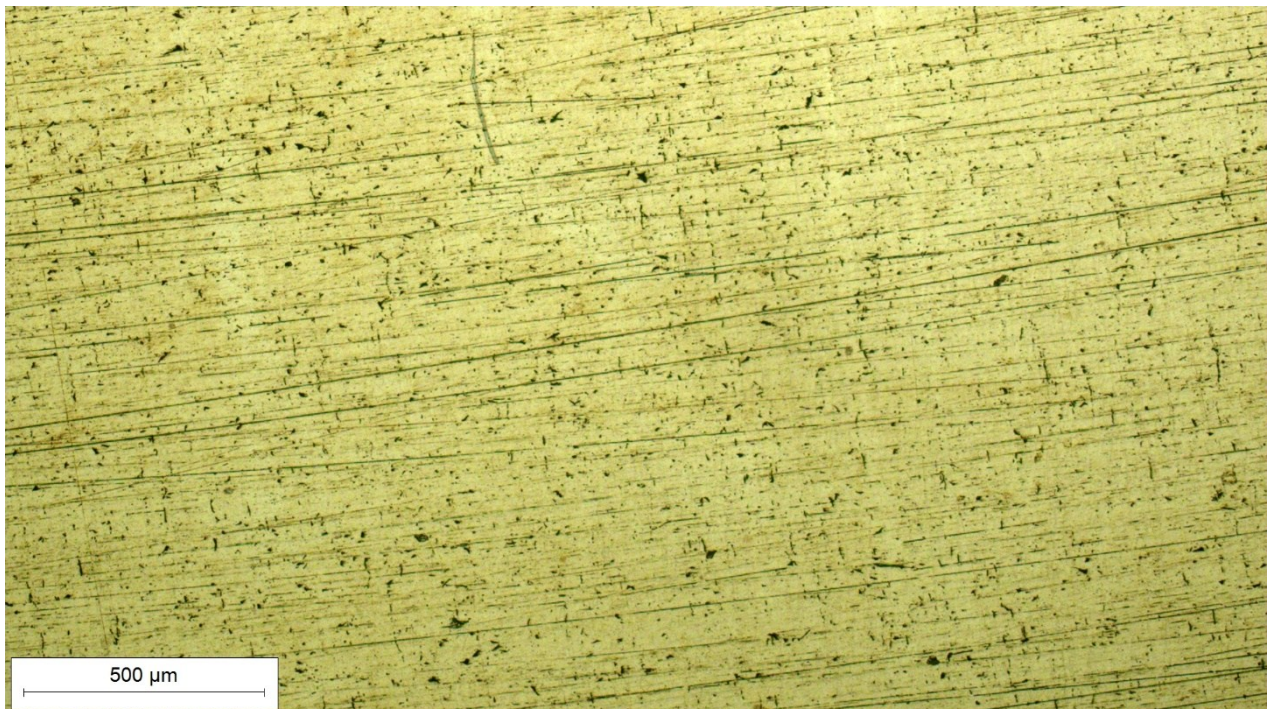
Slika 30. Nagriženo stanje: osnovni materijal čelika.



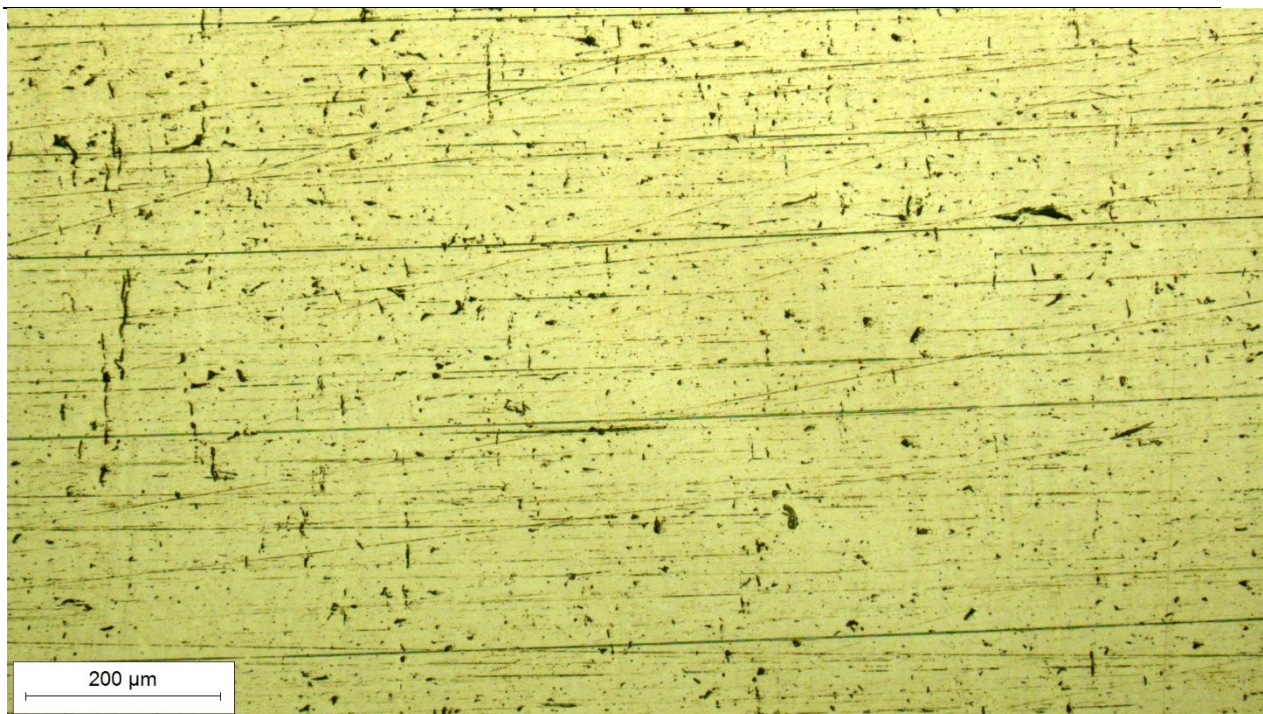
Slika 31. Nagriženo stanje: čelik osnovnog materijala i ZUT-a.



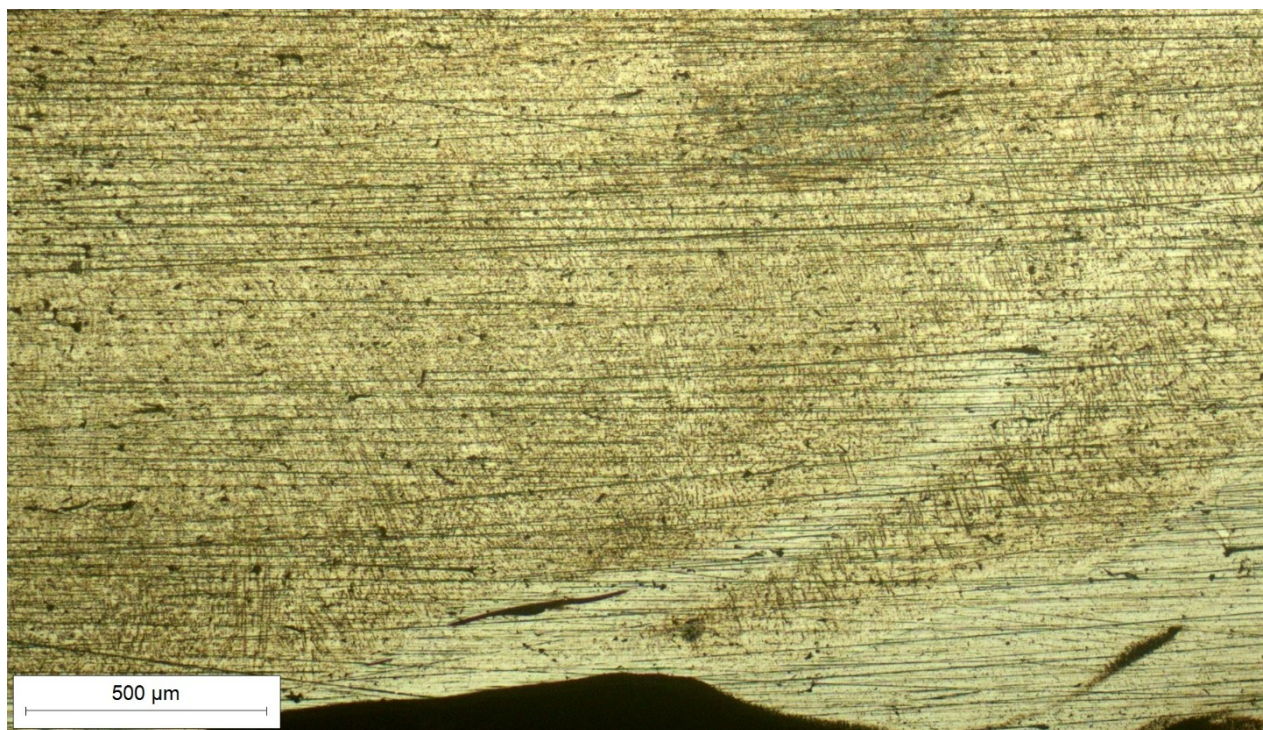
Slika 32. Nagriženo stanje: čelik osnovnog materijala i ZUT-a.



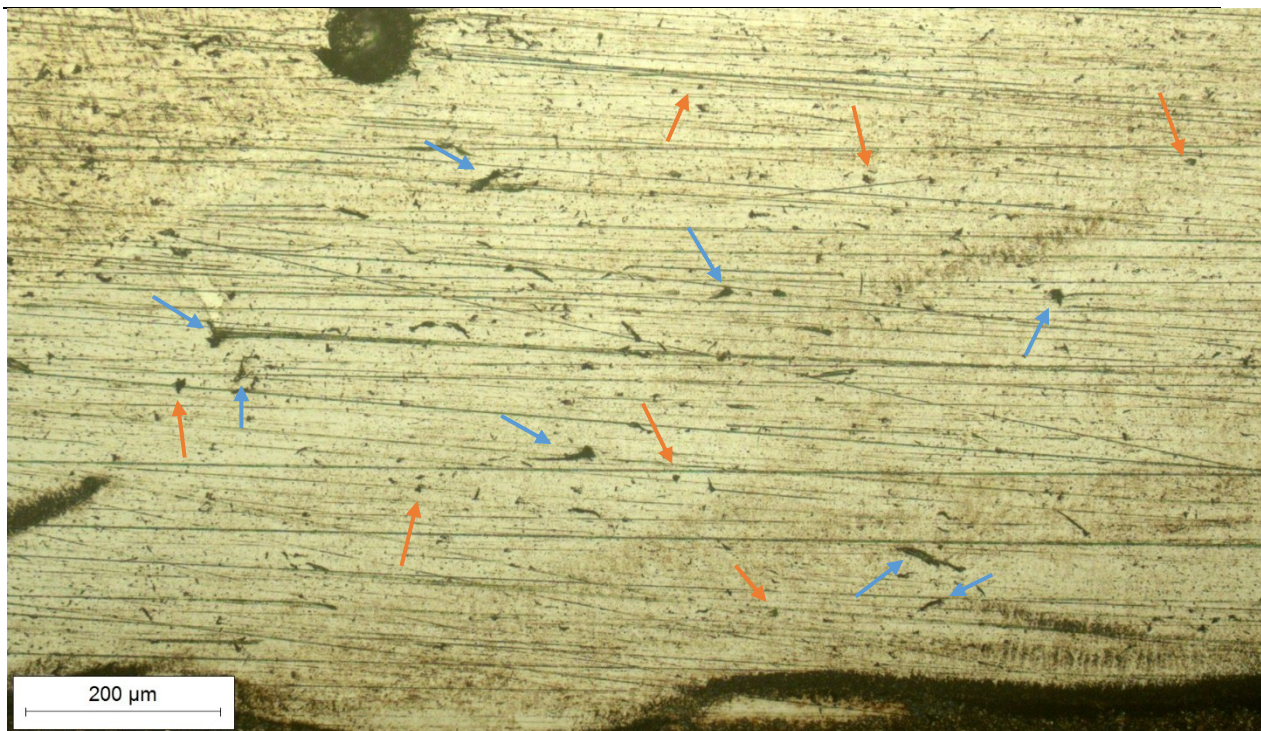
Slika 33. Nagriženo stanje: austenitni nehrđajući čelik u osnovnom materijalu.



Slika 34. Nagriženo stanje: austenitni nehrđajući čelik u osnovnom materijalu.



Slika 35. Nagriženo stanje: austenitni nehrđajući čelik u području ZUT-a.



Slika 36. Nagriženo stanje: austenitni nehrđajući čelik u području ZUT-a.

Na slici 29 i slici 30 je vidljiv osnovni materijal čelika kojemu se mikrostruktura sastoji od ferita (svjetlijeg zrna) i perlita (tamnijeg zrna). Vidljiv je ravnomjeran raspored kristalnih zrna. Na slici 31 i na slici 32 se jasno uočava prijelaz iz osnovnog materijala čelika i zone utjecaja topline. Linija prijelaza iz svjetlije u tamniju boju je granica od koje počinje područje ZUT-a. Dio koji je u području ZUT-a (tamniji dio) je bogatiji s karbidima koji povećavaju tvrdoću ispitnog uzroka.

Na slici 33 i slici 34 je prikazan osnovni materijal austenitnog nehrđajućeg čelika, gdje se također uočavaju ravnomjerno raspoređena austenitna zrna. Vidljiva je prisutnost jednofaznog austenita bez prisustva sekundarnih faza. Vidljive sitne linije na slici posljedica su brušenja i poliranja.

Na slici 35 i slici 36 vidljiva su područja prijelaza osnovnog materijala i ZUT-a. Male crne točkice nepravilnih oblika predstavljaju porozitet u zavaru i označene su plavim strelicama. Dok su male crne točkice pravilnih oblika označene s crvenim strelicama. Također kod austenitnog nehrđajućeg čelika u području ZUT-a vidljiva je tamnija nijansa bijele boje, koja sugerira kako je u tom djelu prisutan veći udio izlučenih karbida.

7. ZAKLJUČAK

Nakon provedenih laboratorijskih ispitivanja koje su obuhvatile mjerenja tvrdoće i analizu mikrostrukturnih promjena došlo se do slijedećih zaključaka:

- U području osnovnog materijala tvrdoća je bila nižih vrijednosti u odnosu na područje oko zavarenog spoja. Približavanjem zoni utjecaja topline dolazi do postupnog porasta tvrdoće.
- Rast tvrdoće je očekivan s obzirom da dolazi do promjena u mikrostrukтури uslijed toplinskog ciklusa zavarivanja. Najveća tvrdoća zabilježena je u području neposredno uz materijal zavara, što ukazuje na prisustvo karbida, dok je osnovni materijal zadržao niže vrijednosti tvrdoća.
- Kod mikrostrukturne analize utvrđene su promjene u strukturi materijala prije i nakon zavarivanja. Primijećene su različite faze u ZUT-u koje mogu utjecati na svojstva zavarenog spoja. Uočene su određene nepravilnosti u obliku poroznosti i segregacija, koje mogu utjecati na dugoročnu pouzdanost spoja.

Preporuka za poboljšanja na temelju dobivenih rezultata je daljnja optimizacija parametara zavarivanja kako bi se smanjile nepovoljne promjene u mikrostrukтури i povećala stabilnost spoja. Također, dodatna toplinska obrada može se primijeniti kako bi se poboljšala svojstva zavarenog spoja.

LITERATURA

- [1] Proinstal, Korijen zavara: sve što trebate znati. Dostupno na: <https://proinstal.hr/korijen-zavara-sve-sto-trebate-znati/> [Pristupljeno 9. prosinca 2024.].
- [2] E Daibau d.o.o., Zavarivanje aluminija (MIG, MAG i TIG zavarivanje). Dostupno na: https://www.emajstor.hr/clanak/457/zavarivanje_aluminija_mig_mag_i_tig_zavarivanje [Pristupljeno 9. prosinca 2024.].
- [3] Dundjer, M., Elementi strojeva I - Zavareni i zalemljeni spojevi. Dostupno na: <https://www.ffri.hr/~mdundjer/Elementi%20strojeva%20I/05-ZavareniIzalemljeniSpojevi.pdf> [Pristupljeno 10. prosinca 2024.].
- [4] Wikipedija, Alotropije željeza. Dostupno na: https://hr.wikipedia.org/w/index.php?title=Alotropije_%C5%BEeljeza&oldid=6019497 [Pristupljeno 11. prosinca 2024.].
- [5] Tianqiao Welding, Four positions of electric welding and welding points: overhead welding, flat welding, vertical welding and horizontal welding. Dostupno na: <https://www.tianqiaowelding.com/news/four-positions-of-electric-welding-and-welding-points-overhead-welding-flat-welding-vertical-welding-and-horizontal-welding/> [Pristupljeno 13. prosinca 2024.].
- [6] Scribd [Internet]. Postupci zavarivanja | pdf. Dostupno na: <https://www.scribd.com/doc/220944326/Postupci-zavarivanja> [Pristupljeno 14. prosinca 2024.].
- [7] Varjenje.net, Aparat za zavarivanje GYS MIG/MAG Smartmig 142. Dostupno na: <https://www.varjenje.net/hr/aparat-za-zavarivanje-gys-migmag-smartmig-142> [Pristupljeno 15. prosinca 2024.].
- [8] Fakultet strojarstva i brodogradnje, MIG_MAG_PS2021.pdf. Dostupno na: https://e-ucenje.fsb.hr/pluginfile.php/33677/mod_folder/content/0/MIG_MAG_PS2021.pdf?forcedownload=1 [Pristupljeno 16. prosinca 2024.].
- [9] SIGMAT d.o.o., Čelične boce za tehničke plinove. Dostupno na: <https://www.sigmat.hr/oprema-za-industriju/plinska-tehnika/2706-celicne-boce-za-tehnicke-plinove> [Pristupljeno 21. prosinca 2024.].
- [10] Nacionalna i sveučilišna knjižnica, Završni rad – FFRI. Dostupno na: <https://zir.nsk.hr/islandora/object/ffri%3A826/datastream/PDF/view> [Pristupljeno 22. prosinca 2024.].

- [11] TSI, TOIS MIG/MAG postupak zavarivanja. Dostupno na: <https://tsi.webador.com/tois-mig-mag-postupak-zavarivanja> [Pristupljeno 23. prosinca 2024.].
- [12] Fakultet strojarstva i brodogradnje, Konstrukcijski čelici – osnovni. Dostupno na: https://e-ucenje.arhiva.fsb.hr/pluginfile.php/144009/mod_resource/content/2/2%20Konstrukcijski%20%C4%8Delici%20-%20osnovni.pptx [Pristupljeno 27. prosinca 2024.].
- [13] Wikipedija, Čelik. Dostupno na: <https://hr.wikipedia.org/w/index.php?title=%C4%8Celik&oldid=6898984> [Pristupljeno 27. prosinca 2024.].
- [14] Wikimedia, Dijagram Fe-C legure. Dostupno na: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/hr/thumb/3/31/Dijafram_Fe-C.jpg/375px-Dijafram_Fe-C.jpg [Pristupljeno 28. prosinca 2024.].
- [15] Ivušić V, Franz M, Španiček Đ, Ćurković L. Materijali 1. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb; 2019.
- [16] Fakultet strojarstva i brodogradnje, Osiguravanje kvalitete PS 2020. Dostupno na: https://e-ucenje.fsb.hr/pluginfile.php/33677/mod_folder/content/0/Osiguravanje_kvalitete_PS_2020.pptx?forcedownload=1 [Pristupljeno 4. siječnja 2025.].
- [17] Randić, M. (2020). Optimizacija postupka zavarivanja čelika povišene čvrstoće za rad u niskotemperaturnim uvjetima. Doktorska disertacija. Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet. Dostupno na: https://www.riteh.uniri.hr/media/filer_public/e0/c6/e0c6c864-5ec3-4c9d-8ca5-3f5cc3efec95/doktorska_disertacija_miroslav_randic.pdf [Pristupljeno 5. veljače 2025.].
- [18] Fakultet strojarstva i brodogradnje, FSB završni radovi. Dostupno na: <https://repositorij.fsb.unizg.hr/islandora/object/fsb%3A7846/datastream/PDF/view#page31> [Pristupljeno 8. siječnja 2025.].
- [19] Mecatech, Mecatech 250 SPI. Dostupno na: https://cdn11.bigcommerce.com/s-n1rxrwv6m0/images/stencil/1280x1280/products/1634/2184/Mecatech_250_SPI_08560.1622116011.png?c=2 [Pristupljeno 10. siječnja 2025.].
- [20] Wikipedija, Tvrdoa po Vickersu. Dostupno na: https://hr.wikipedia.org/w/index.php?title=Tvrd%C4%87a_po_Vickersu&oldid=6318989 [Pristupljeno 13. siječnja 2025.].

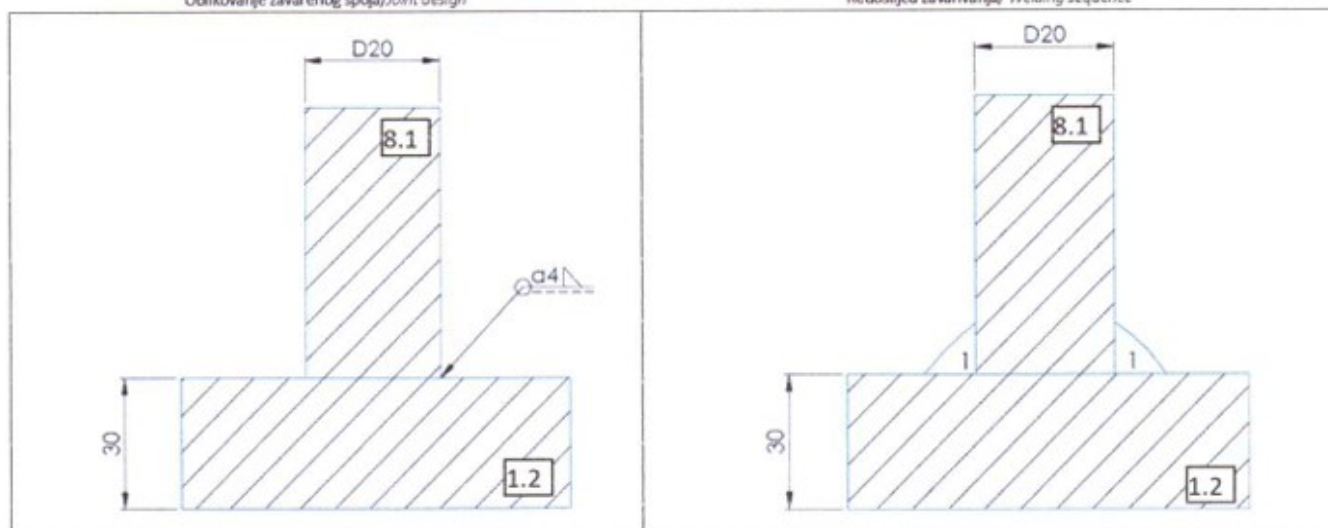
PRILOZI

I. Tehnički podatci vezani za postupak zavarivanja

Mjesto: Location:		Ispitno mjesto: Examining body:	
Oznaka specifikacije za zavarivanje: Manufacturers WPS:		Način pripreme rubova i čišćenja: Method of bevel preparation and cleaning:	rezanje i brušenje cutting and grinding
Broj izvještaja o kvalifikaciji postupka: WPQR No.:		Specifikacija osnovnog materijala: Parent metal specification:	1.2/8.1 (S355J2+H šarža/heat: 256445 1.4301 šarža/heat: CE663)
Poduzeće: Manufacturer:		Debljina osnovnog materijala: Material thickness:	Ploča/plate: 30,0mm Šipka/bar: 20,0mm
Ime zavarivača: Welders name:		Vanjski promjer: Outside diameter:	20,0mm
Postupak zavarivanja: Welding process:	135-P (MAG)	Položaj zavarivanja: Welding position:	PB
Vrsta spoja: Joint type:	T-spoj FW T-joint FW	Dodatne pojedinosti: Additional details:	Poluautomatsko zavarivanje Semiautomatic welding

Oblikovanje zavarenog spoja/joint design

Redoslijed zavarivanja/ Welding sequence



Pojedinosti postupka zavarivanja/ Welding details

Prolaz Run	Postupak Welding process	Promjer dodatnog materijala Filler material diameter	Struja Current	Napon Voltage	Vrsta struje, polaritet Type of current and polarity	Brzina dodavanja žice Wire feed speed	Brzina zavarivanja Welding speed	Unos topline Heat input
		mm	A	V		m/min	cm/min	kJ/cm
1	135-P	1,2	225	24,4	DC, +	7,4	26,0	10,14
Dodatni materijal Filler material					Temperatura predgrijavanja: Preheat temperature:		30mm: 120°C	
Vrsta i trgovačko ime: Type and trade name:			EN ISO 14343-A: G 23 12 L CN 23/12-IG, Böhrler, Ø1,2mm, šarža /batch: 103081		Međuslojna temperatura: Interpass temperature:		-	
Posebne napomene za sušenje: Special remarks for drying:					Toplinska obrada: PWHT:		-	
Zaštitni plin ili prašak Shielding gas or flux					Vrijeme, temperatura, postupak: Time, temperature, method:		-	
Zaštitni plin (vrsta i protok): Shielding gas (type and flow):			M12 (97,5%Ar/2,5%CO ₂) 15 l/min		Oscilacija, amplituda, frekvencija, vrijeme zadržavanja: Oscillation, amplitude, frequency, dwell time:		Bez nihanja No weaving	
Korijenska zaštita: Backing gas:					Pojedinosti impulsnog zavarivanja: Pulse welding details:		-	
Prašak, vrsta i trgovačko ime, sušenje: Flux, type and trade name, drying:			-		Udaljenost kontaktne sapnice: Standoff distance:		20-25 mm	
Wolfram-elektroda, vrsta i promjer: W-electrode, type and diameter:			-		Kut postavljanja pištolja: Torch angle:		Desna tehnika 80-85° Rightward technique 80-85°	
Pojedinosti o žljebljenju i podloškama: Details of gouging and backing:					Dodatne informacije: Izvor struje za zavarivanje Fronius TPSi Pulse Additional information: Welding power source			
Poduzetnik/Manufacturer: Z. Sinković, IWF, IWIP-C					Provjetnik/Checked by: Dr. sc. I. Garašić, CIWF, IWIP-C			
Potpis/ Signature:					Potpis/ Signature:			