

Analiza mikrostrukture i tvrdoće sučeono zavarenog spoja mig postupkom

Ritz, Erik Luka

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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:115:041984>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-12**



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

Erik Luka Ritz

ZAVRŠNI RAD

Sisak, rujan 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

Erik Luka Ritz

ANALIZA MIKROSTRUKTURE I TVRDOĆE SUČEONO ZAVAREN OG SPOJA
MIG POSTUPKOM

ZAVRŠNI RAD

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

Članovi Povjerenstva za ocjenu i obranu završnog rada:

doc. dr. sc. Ivan Jandrić - predsjednik
izv. prof. dr. sc. Martina Lovrenić-Jugović - član
prof. dr. sc. Ljerka Slokar Benić - član
prof. dr. sc. Ladislav Lazić - zamjenski član

Sisak, rujan 2022.

IME: Erik Luka
PREZIME: Ritz
MATIČNI BROJ: BM-3663/18

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 I TVRDOĆE SUČEONO
ZAVARENOG SPOJA MIG POSTUPKOM**

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

Sisak, 30.8.2022.

(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.

Zahvala

Ovim putem zahvaljujem se svima koji su svojim savjetima i prijedlozima pomogli u izradi ovog rada. Posebna zahvala ide mojoj voditeljici izv. prof. dr. sc. Martini Lovrenić-Jugović, Željku Grubišiću mag. ing. met. i Franji Kozini mag. ing. met. na izvanrednoj podršci, dostupnosti, vodstvu, povjerenju i strpljenju koju su mi pružili. Hvala mojoj obitelji i prijateljima na beskrajnoj podršci tijekom studiranja.

SAŽETAK

ANALIZA MIKROSTRUKTURE I TVRDOĆE SUČEONO ZAVARENOG SPOJA MIG POSTUPKOM

U ovom završnom radu napravljen je teorijski pregled i to elektrolučnog postupka zavarivanja s detaljnim opisom postupaka zavarivanja MIG metodom te pregled metoda mjerenja tvrdoće s detaljnim opisom Vickersove metode mjerenja. Ploče debljine 15 mm od konstrukcijskog čelika S235JR zavarene su sučeono K zavarom primjenom MIG metode. Zavareni spojevi hlađeni su nakon zavarivanja na različite načine, jedan je hlađen na zraku, a drugi u vodi. U eksperimentalnom dijelu završnog rada na sučeono zavarenim pločama nakon pripreme najprije je napravljena metalografska analiza mikrostrukture zavarenih spojeva, a zatim je izmjerena njihova tvrdoća Vickersovom metodom. Provedenim metalografskim ispitivanjima zaključilo se da zona utjecaja topline ima sitnozrnatu strukturu, a zona taljenja lijevanu strukturu. Nakon mjerenja tvrdoće vidljivo je da vrijednosti tvrdoća rastu od korijena prema licu zavara kako u zoni taljenja tako i u zoni utjecaja topline.

Ključne riječi: MIG metoda zavarivanja, konstrukcijski čelik, sučeoni K spoj, mikrostruktura, Vickersova tvrdoća

SUMMARY

MICROSTRUCTURAL AND HARDNESS ANALYSES OF WELDED JOINED BY MIG PROCEDURE

In this final paper, a theoretical overview of the electric arc welding process with a detailed description of the MIG welding process and an overview of hardness measurement methods with a detailed description of the Vickers measurement method was made. The 15 mm thick plates made of structural steel S235JR are butt-welded with K welding using the MIG method. Welded joints were cooled after welding in different ways, one was cooled in air and the other in water. In the experimental part of the final work on the butt-welded plates after preparation, a metallographic analysis of the microstructure of the welded joints was first made, and then their hardness was measured using the Vickers method. The conducted metallographic tests concluded that the heat-affected zone has a fine-grained structure, and the melting zone has a cast structure. After measuring the hardness, it is evident that the hardness values increase from the root to the face of the weld, both in the melting zone and in the heat-affected zone.

Keywords: MIG welding method, structural steel, butt K joint, microstructure, Vickers hardness

SADRŽAJ

| | |
|---|----|
| 1. UVOD | 1 |
| 2. ZAVARIVANJE TALJENJEM..... | 3 |
| 2.1. ELEKTROLUČNO ZAVARIVANJE | 5 |
| 2.1.1. REL zavarivanje | 5 |
| 2.1.2. TIG zavarivanje | 5 |
| 2.1.3. Plinsko zavarivanje..... | 6 |
| 2.2. MIG METODA ZAVARIVANJA | 7 |
| 2.2.1. Pištolj/gorionik za zavarivanje MIG metodom | 9 |
| 2.2.2. Plin za zavarivanje MIG metodom | 10 |
| 2.2.3. Sustav za dobavu žica..... | 10 |
| 3. METODE ISPITIVANJA TVRDOĆE | 12 |
| 3.1. Rockwellova metoda | 13 |
| 3.2. Brinellova metoda..... | 14 |
| 3.3. Knoopova metoda..... | 14 |
| 3.4. Vickersova metoda | 15 |
| 4. EKSPERIMENTALNI DIO | 18 |
| 4.1. Osnovni materijal | 18 |
| 4.2. Priprema uzorka za zavarivanje..... | 18 |
| 4.3. Postupak rezanja uzoraka | 20 |
| 4.4. Postupak pripreme uzoraka za metalografsku analizu | 22 |
| 4.5. Postupak mjerenja tvrdoće..... | 24 |
| 5. REZULTATI I RASPRAVA | 26 |
| 5.1. Metalografske snimke..... | 26 |
| 5.2. Mjerenja tvrdoće..... | 29 |
| 6. ZAKLJUČAK | 32 |
| 7. LITERATURA | 33 |
| ŽIVOTOPIS..... | 35 |

1. UVOD

Zavarivanje je tehnika spajanja materijala pri kojem se dijelovi na spojnome mjestu zagriju do točke omekšanja (plastičnosti) ili se rastale, a spajaju se staljivanjem uz dodavanje ili bez dodavanja dodatnog materijala. Često se uz zagrijavanje primjenjuje i povećani tlak, dok je zavarivanje bez djelovanja topline rijetko. Prednosti ovog postupka trajnog spajanja dvaju ili više komada metala su njegova pouzdanost, jednostavnost i prihvatljivi troškovi.

Zavarivanje je posebno važno u gradnji čeličnih konstrukcija (u brodogradnji, mostogradnji, teškoj strojogradnji), ali se zavaruju i gotovo svi metali čak i dio polimernih materijala (plastomeri). Postupci zavarivanja razvrstavaju se prema izvoru energije koja se pretvara u toplinu potrebnu za stvaranje spoja, a to može biti plinski plamen, električni luk, plazma, laser, elektronski snop, te ultrazvuk. U primjeni je više od pedeset različitih postupaka zavarivanja [1-3]. Jedan od najraširenijih postupaka zavarivanja je elektrolučno zavarivanje prikazano na slici 1 (MIG postupak). Nakon zavarivanja konstrukcija se zaštićuje premazima (slika 2).



Slika 1. Primjena MIG postupka zavarivanja [3]

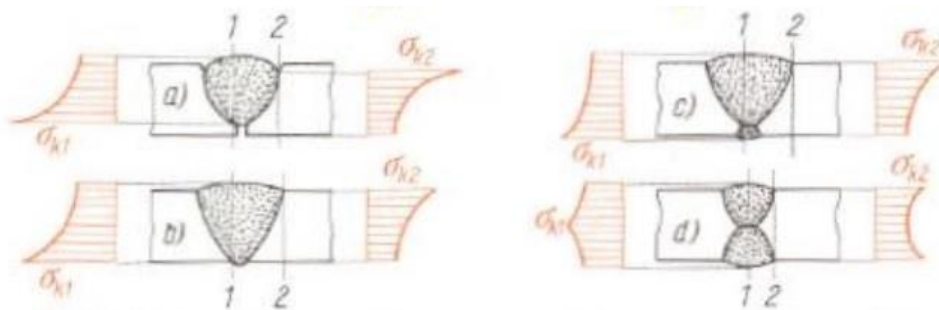


Slika 2. Sušenje zavarenog čeličnog stolića MIG metodom nakon nanošenja zaštitnog premaza

Zavarivanje je trajna metoda spajanja istovrsnih ili različitih materijala kako bi se proizveo trajan i homogen spoj. Homogeno zavarenim spojevima možemo nazvati

zavareni spoj bez pogrešaka sa zahtjevnom kvalitetom, te pogodnim mehaničkim svojstvima.

Pri oblikovanju zavarenih konstrukcija treba voditi računa o izbjegavanju zarezno djelovanja (vršnog naprezanja) koje je u raznim varijantama potpunosti zavara prikazano na slici 3 [4].



Slika 3. Raspodjela naprezanja

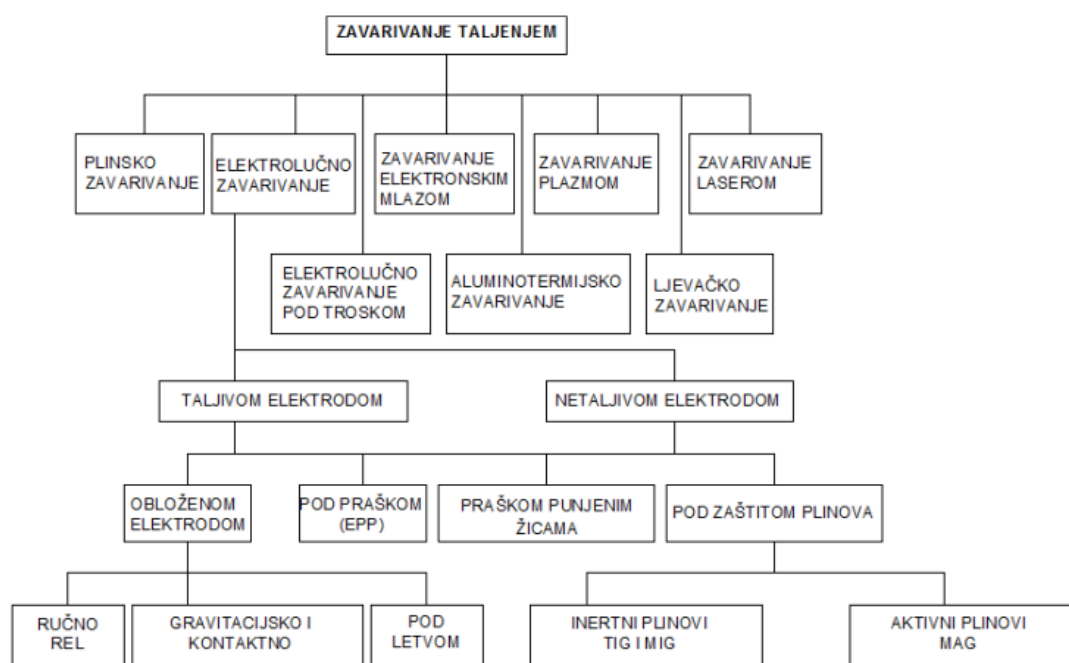
- a) V zavar s lošim provarom korijena, b) V zavar s dobrim provarom korijena, c) zavara s pročišćenim i zavarenim korijenom, d) dvostrani V-zavara [4].

Loš spoj osnovnog i dodatnog materijala uzrokuje velika zarezna djelovanja u korijenu (presjek 1) i na licu zvara (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 [4].

Cilj ovog završnog rada bio je analizirati mikrostrukturu uzoraka sučeono zavarenih K spojeva zavarene MIG postupkom koji su nakon zavarivanja različito ohlađeni. Jedan uzorak je nakon zavarivanja ohlađen na zraku, dok je drugi naglo ohlađen u vodi. Nakon provedene analize mikrostrukture na oba uzorka provelo se mjerenje tvrdoće Vickersovom metodom. Dobiveni rezultati raspravljani su na kraju eksperimentalnog dijela ovog završnog rada.

2. ZAVARIVANJE TALJENJEM

Zavareni spojevi spadaju među nerastavljive veze i upotrebljavaju se prije svega za spajanja nosećih strojnih dijelova i konstrukcija. Zavarivanje se može postići pritiskom sa ili bez dodatnog materijala taljenjem. Standardna podjela metoda zavarivanja taljenjem prikazana je na slici 4. U ovom radu, čelični uzorci su zavareni MIG postupkom zavarivanja, taljivom elektrodom uz dodatak materijala u atmosferi zaštitnog plina te se metalna elektroda i osnovni materijal tale toplinom električnog luka [5].







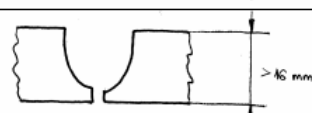



Slika 4. Podjela postupaka zavarivanja taljenjem [5]

Zavareni spoj predstavlja cjelinu ostvarenu zavarivanjem, koja obuhvaća skrtnuti dio metala zavara stvoren taljenjem te rubne dijelove zavarenih komada. Dobro oblikovanje zavara važno je zbog postizanja boljih mehaničkih svojstava spoja pa je bitno napraviti dobru pripremu žlijeba. U tablici 1. prikazani su oblikovani rubni dijelovi osnovnog materijala koji se spajaju sučeono. Sučeoni spoj nastaje zavarivanjem dijelova čiji se krajevi sučeljavaju i međusobno zatvaraju kut koji može biti između 160° i 200° , a najčešće je 180° . Iz tablice 1. primjećuje se da oblici i dimenzije žlijeba mogu biti različiti, a odabir odgovarajućeg oblika žlijeba ovisit će o debljini materijala kojeg treba zavariti. Dimenzioniranje sučeonog spoja ne predstavlja poseban problem, jer je debljina tj. dimenzija zavara određena debljinom osnovnog materijala. Zavarivanje se može izvoditi s jedne strane ili dvostrano. S velikom pažnjom moraju biti pripremljeni rubovi spoja, da bi se omogućilo dobro protaljivanje uz minimalne deformacije i naprezanja u spojevima.

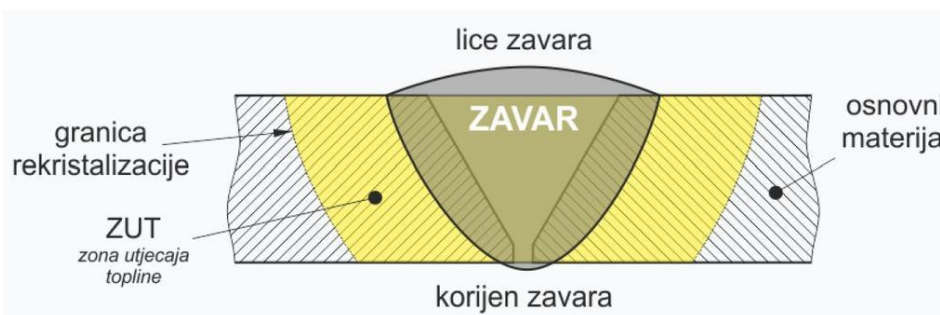
Priprema žljebova za zavarivanje može se izvoditi mehaničkom obradom ili rezanjem različitim postupcima. Kod mehaničke obrade, priprema rubova izvodi se posebnim strojevima i prikladnim alatom, npr. noževima, diskovima, škarama i dr., koji daju traženi oblik rubova zavarivanih dijelova [6,7].

Tablica 1. Vrste i oblici taljenih zavara sučeonih spojeva [6]

| Naziv | Oznaka | Izvedba | Naziv | Oznaka | Izvedba |
|-------------------------|--------|--|-----------------------|--------|--|
| Sučeonni spojevi | | | | | |
| I – zavar | II |  | X – zavar | X |  |
| V-zavar | V |  | Dvostruki U – zavar | U |  |
| Y – zavar | Y |  | Dvostruki – Y – zavar | Y |  |
| U – zavar | U |  | K – zavar | K |  |

U strukturi zavarenog spoja uobičajeno se mogu razlikovati sljedeće karakteristične zone (slika 5): zona taljenja (ZT) - zavar, zona utjecaja topline (ZUT), te zona nepromijenjenog osnovnog metala. Zona taljenja (ZT)/zavar predstavlja dio zavarenog spoja određen granicama taljenja unutar kojih se osnovni metal potpuno istalio, uz udio rastaljenog dodatnog metala. U zoni taljenja dostignu se vrlo visoke temperature, hlađenje metala najduže traje, a nastala metalurška struktura najviše ovisi o samom načinu izvođenja zavarivanja. Strukturu u toj zoni čine, najčešće, krupna kristalna zrna, a u slučaju višeslojnog zavarivanja nastaje normalizirana sitnozrnata struktura.

Zona utjecaja topline (ZUT) nalazi se izvan granica taljenja u rubnim dijelovima osnovnog metala i predstavlja zonu u kojoj je, zbog utjecaja povišenih temperatura, došlo do značajnih strukturnih promjena osnovnog metala, a s time i do promjena u mehaničkim i drugim svojstvima zavarenog spoja. Unutar čitave zone utjecaja topline dolazi do različitih metalurških promjena [6,7].



Slika 5. Elementi zavarenog spoja [7]

2.1. ELEKTROLUČNO ZAVARIVANJE

Elektrolučno zavarivanje je metoda zavarivanja u kojem se uspostavlja električni luk između osnovnog materijala i elektrode koji je izvor topline, a kao dodatni materijal se primjenjuje žica za zavarivanje ili sama elektroda. Postupci elektrolučnog zavarivanja koji se najviše koriste su: REL postupak zavarivanja, TIG postupak zavarivanja, MIG/MAG postupak zavarivanja te zavarivanje plinskim plamenom. Rjeđe se primjenjuju i postupci EPP zavarivanja, plazma zavarivanje i lasersko zavarivanje. Toplinska obrada je također prateća tehnologija postupaka zavarivanja i navarivanja. Kontrola je sastavni dio svih navedenih postupaka [7-9].

Svaka od metoda koristi pogodan izvor električne energije pomoću kojih se dobiva električni luk. Primjenom istosmjerne struje postoji negativni i pozitivni pol, dok se kod izmjenične struje polariteti mijenjaju ovisno o drugoj vrsti uređaja za zavarivanje. Provodljivost električnog zraka je mala, stoga je potrebno osigurati zadovoljavajući napon kako bi se oblikovao odgovarajući električni luk [8,9].

2.1.1. REL zavarivanje

Ručno elektrolučno zavarivanje (REL) postupak je zavarivanja taljenjem. Toplinska energija dobiva se iz električnog luka u kojem se električna energija pretvara u toplinsku i tali dodatni i osnovni materijal. Postupak ručnog elektrolučnog zavarivanja obloženim elektrodama jedan je od najzastupljenijih postupaka. Izvori struje su transformatori, ispravljači i generatori (rotacijski izvori). Izvori struje za REL zavarivanje mogu biti istosmjerni i izmjenični, s tim da kod istosmjernog izvora elektroda može biti spojena na (+) ili na (-) pol. Obložena elektroda sastavljena je od metalne jezgre i nemetalne obloge. Metalna žica ili šipka izrađena je od materijala prema namjeni. Na metalnu jezgru nanosena je obloga prešanjem ili umakanjem. Kako bi se uspostavio stabilniji električni luk trebaju se ispuniti sljedeći uvjeti: prilagođen električni napon u električnom luku, struja pri kontaktu elektrode s radnom površinom mora biti što niža, napon praznog hoda izvora mora biti dovoljno visok kako bi se održao električni luk te jakost i napon struje moraju se regulirati radi prilagodbe pogonskim uvjetima zavarivanja. Glavna prednost ovog postupka je što se mogu zavarivati gotovo svi materijali (nelegirani, niskolegirani i visokolegirani čelici, bakar, nikal, aluminij i njihove legure), oprema je jeftina, prilagodljiv je u svim položajima zavarivanja i rukovanje je jednostavno. Nedostatak postupka je slabija produktivnost uz znatniji otpad obloge elektrode, iskoristivost je oko 60%, stvaraju se znatne količine plinova [5].

2.1.2. TIG zavarivanje

TIG (Tungsten Inert Gas) zavarivanje je elektrolučni postupak zavarivanja u zaštitnoj atmosferi inertnog plina ili njegove mješavine te se uspostavlja električni luk između osnovnog materijala i netaljive volframove elektrode. Zavarivati se mogu raznovrsni materijali, neki od najviše prisutnih su čelici, nehrđajući čelici (Cr-Ni),

aluminij, magnezij, bakar. U ovom postupku električni luk u TIG zavarivanju je trajno i snažno električno pražnjenje u inertnom plinu na prostoru između vrha volframove elektrode i mjesta zavarivanja u strujnom krugu. Uspostava luka vrši se s i bez dodira vrha volframove elektrode s radnim komadom.

Zavarivanje TIG metodom provodi se s ili bez dodatnog materijala. Dodatni materijal (žica promjera 0.5 - 8 mm) dodaje se u prednji rub osnovnog materijala. Pri zavarivanju aluminija, bakra i njihovih legura te nehrđajućih čelika dodatni materijal mora biti metalurški čist zbog inertne atmosfere zaštitnog plina. Tehnika rada kod TIG zavarivanja slična je onoj kao kod plinskog zavarivanja [10,11]. Budući da volfram brzo oksidira pri visokim temperaturama za zaštitu od električnog luka i elektrode se primjenjuje mješavina argona ili helija kako bi se elektrode zaštitile od utjecaja kisika.

Osnovne prednosti TIG postupka su: koncentriranost električnog luka, smanjeni ZUT (zona utjecaja taljenja), nema prskanja, nema pojave troske, minimalna količina štetnih plinova, zavarivanje širokog spektra metala i njihovih legura, mogućnost zavarivanja gotovo svih metalnih materijala, mogućnost izvođenja zavarivanja u svim položajima, mogućnost zavarivanja pozicija male debljine, pogodno za izvođenje reparaturnih radova. Osnovni nedostaci TIG postupka su: mala brzina zavarivanja, veća cijena samih uređaja u odnosu na REL postupak, visoki zahtjevi za pripremu zavarenog spoja i neekonomičnost pri zavarivanju materijala debljih od 6 mm [12].

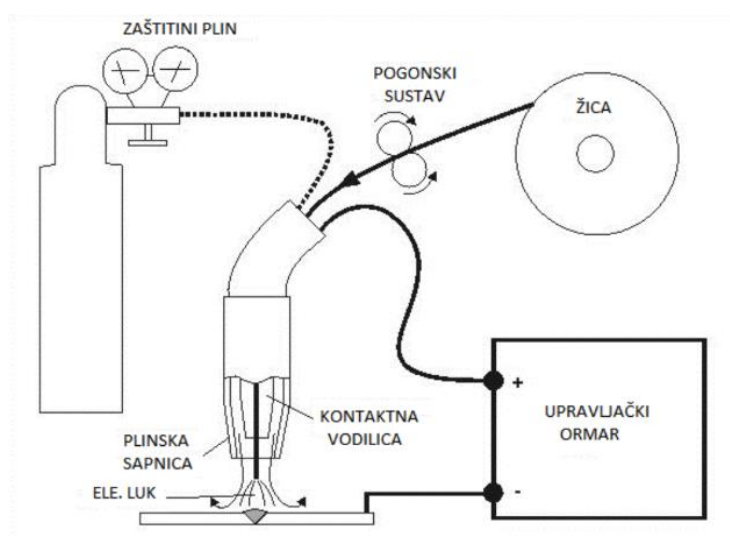
2.1.3. Plinsko zavarivanje

Zavarivanje plinskim plamenom je relativno jednostavan postupak i ne zahtijeva dugotrajnu obuku kao što je kod TIG zavarivanja. Najviše se primjenjuje na područjima gdje nema električne energije. U današnje vrijeme postupak je zamijenjen sve većim razvojem i primjenom MIG/MAG, REL i TIG postupka koji su daleko produktivniji. Jedan od nedostataka je taj što je postupak relativno spor, a prekomjerni unos topline u zavareni spoj uzrokuje deformacije nakon zavarivanja. Osnovna oprema za plinsko zavarivanje su plamenici, boce s kisikom i acetilenom, manometri, gumena crijeva i osigurači povratnoga plamena. Prednost zavarivanja plinskim plamenom je taj što se mogu zavariti praktički svi metali. Potrošnja kisika kod plinskog zavarivanja je u prosjeku 10-20% veća od potrošnje acetilena. Izbor veličine i jakosti plamenika provodi se prema vrsti i debljini materijala koji se zavaruje. Dodatni materijali koji se primjenjuju su žice i šipke, a biraju se na osnovu debljine i vrste materijala koje se zavaruje. Kod zavarivanja bakra i aluminija debljine žice su veće nego kod zavarivanja čelika. Pri zavarivanju sivog lijeva promjeri šipki još su veći [5,13].

2.2. MIG METODA ZAVARIVANJA

Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u atmosferi zaštitnog plina spada u postupke zavarivanja taljenjem. MIG postupak (Metal Inert Gas) je metoda koja se odvija u zaštitnoj atmosferi mješavine argona ili helija. Tim postupkom se zavaruju visokolegirani čelici, aluminij, bakar, titan i njihove legure. Dodatni materijal odgovara osnovnom metalu [5].

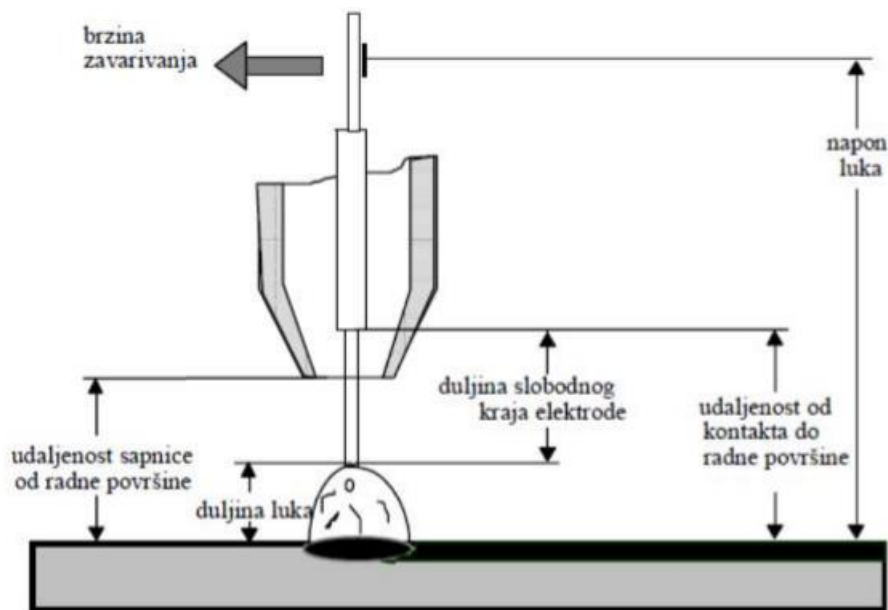
Na slici 6. shematski je prikazan MIG postupak zavarivanja s potrebnom opremom. Dovođenjem taljive elektrode (žice za zavarivanje) je konstantno, a vođenje i držanje gorionika za zavarivanje može biti ručno ili robotizirano.



Slika 6. Shematski prikaz MIG zavarivanja [13]

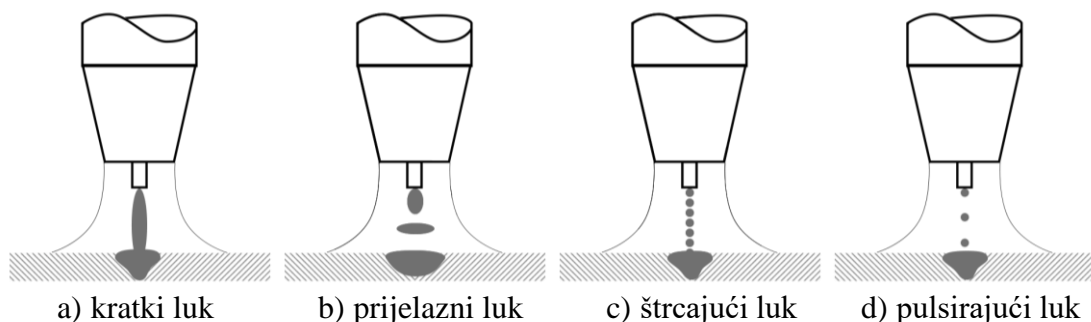
Osnovni elementi kod MIG metode zavarivanja su prema slici 6: upravljački ormar, živa za zavarivanje, zaštitni plin, pogonski sustav, sapnica za plin i kontaktna vodilica za žicu. Žica se dodaje konstantnom brzinom i istovremeno služi kao elektroda i dodatni materijal. Zaštitni plin dolazi na mjesto zavarivanja iz čelične boce putem upravljačkog ormara kroz sapnicu pištolja te se upuhuje u atmosferu luka. Zaštitni plin štiti zavar od negativnih utjecaja iz okoline te utječe na geometriju zavara, unesenu toplinu te penetraciju [5,13].

Parametri zavarivanja koji bitno utječu na kvalitetu zavarenog spoja MIG postupka su: jakost struje zavarivanja, brzina zavarivanja, promjer žice, napon električnog luka, duljina slobodnog kraja žice i količina zaštitnog plina. Neki navedeni parametri MIG postupka zavarivanja prikazani su na slici 7.



Slika 7. Parametri zavarivanja [14]

Tim se postupkom zavaruju nelegirani, niskolegirani čelici i CrNi čelici. Postupci su visoko produktivni, mogu biti automatizirani, poluautomatizirani i robotizirani [9]. Pri izvršenju popravaka se koristi najviše poluautomatski postupak. Navedene metode prikazane su na slici 8.



Slika 8. Shematski prikaz načina prijenosa metala [14]

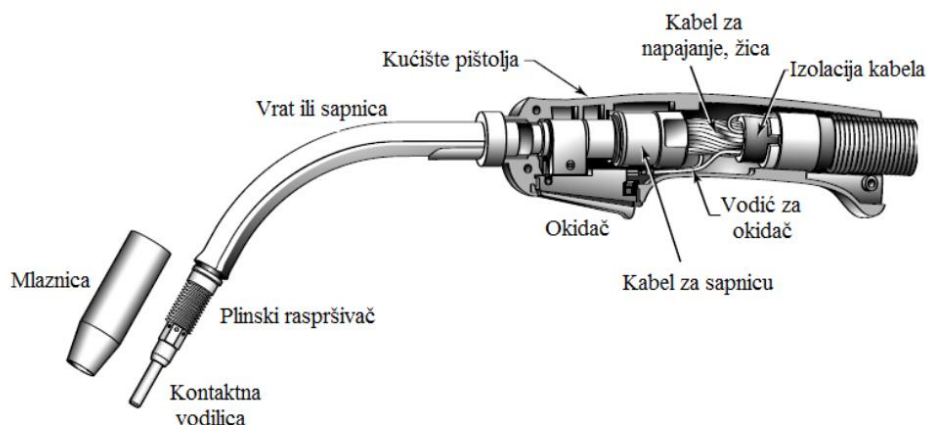
Prema vrsti i debljini materijala te prema debljini žice za zavarivanje i određuje se jakost struje zavarivanja koja utječe na stabilnost električnog luka, unos topline i dubinu protaljivanja. S obzirom na položaj i jakost struje zavarivanja odabire se brzina zavarivanja. Prevelika brzina zavarivanja rezultira slabim protaljivanjem i velikim nadvišenjem zavara, dok premala brzinom zavarivanja rezultira širim zavarom i jačim protaljivanjem. Slobodni kraj žice od vodilice do početka električnog luka potrebno je držati u određenim granicama. Prevelika duljine žice rezultira viškom dodatnog materijala uslijed čega dolazi do većeg prskanja, manjeg protaljivanja i nadvišenja zavara. Premala duljina žice rezultira jačim onečišćenjem sapnica gorionika. Zaštitni plin ima zaštitnu ulogu u očuvanju zavara od negativnih posljedica okoline koja utječe na stabilnost zavara, stabilnost električnog luka i dubinu protaljivanja. MIG postupak je vrlo produktivan i ekonomičan, te zbog svoje univerzalnosti čest je odabir kod popravaka [14].

Ostvarivanje prijenosa metala ovisi o jakosti struje, vrsti zaštitnog plina (mješavina argona), naponu i dodatnom materijalu. Materijali se spajaju kada se žica poveže sa

strujom koja stvara vezu između osnovnog materijala i metala zavara. Prijenos kratkim lukom ostvaruje se primjenom konstantnih kratkih spojeva žice i osnovnog materijala. Pri kontaktu električni luk se prekida, a napon pada dok struja zavarivanja raste. U vremenskim intervalima od nekoliko sekundi dolazi do otkidanja kapljica s elektroda te se ponovno uspostavlja električni luk. Ovim prijenosom prisutan je mali unos topline te je pogodan za zavarivanje materijala do 5 mm. Prijelaznim lukom metal se djelomično prenosi u kratkim dijelovima te se djelomično primjenjuje štrcajući luk. Prijenos metala štrcajućim lukom ostvaruje se uz jaku struju i veliki napon zavarivanja. Žica za zavarivanje ne ostvaruje direktan kontakt s osnovnim materijalom jer se kapi taline aksijalno gibaju. Prijenos je stabilan, unos topline i dubina protaljivanja su veliki te se primjenjuje za zavarivanje debljih materijala. Primjenom pulsirajućeg luka pojačava se struja zavarivanja u trenutku kada se kapi taline odvajaju od žice taline što rezultira pad vrijednosti osnovne struje koja uspostavlja električni luk. Žica za zavarivanje se prenosi bez kratkog spoja [5,13,14].

2.2.1. Pištolj/gorionik za zavarivanje MIG metodom

Pištolj/gorionik je zavarivačev osnovni alat kod MIG zavarivanja. Sama konstrukcija pištolja/gorionika ovisi o jačini uređaja, vrsti zavarivanja (poluautomatsko, automatizirano, robotizirano) te načinu dovođenja žice u sam pištolj. Pištolj/gorionici se izrađuju u dvije osnovne varijante. Za struje od 100 do 500 A proizvode se sa zračnim hlađenjem, dok se za struje od 200 do 600 A proizvode s vodenim hlađenjem. Ovisno o uvjetima rada, dijelovi se mijenjaju po potrebi jer se troše. Pištolj/gorionik kao cjelinu čine pojedini dijelovi, prikazani na slici 8, od kojih su sljedeći: mlaznica, kontaktna vodilica, plinski raspršivač, sapnica, kućište pištolja, kabel za sapnicu, kabel za napajanje (žica), izolacija kabela, vodič za okidač i okidač [15,16].



Slika 9. Komponente pištolja za zavarivanje sa zračnim hlađenjem [16]

Kontaktna vodilica pištolja nalazi se skoro u električnom luku što zahtijeva izdržljivost na mehanička i toplinska naprezanja. Temperature dostižu i do 700 °C u blizini kontaktne vodilice. Vodilica je napravljena od bakra. Unutrašnjost kontaktne vodilice je bitna, radi toga što žica mora lako proći kroz nju kako bi se postigao što bolji električni luk, ali i stabilnost radi boljšeg zavara. Vrste i veličine same kontaktne vodilice ovise o samom pištolju, žici. Mlaznica ili plinska sapnica usmjerava plin u zonu zavarivanja. Postoji više vrsta što ovisi isto tako o pištolju, načinu zavarivanja,

plinu itd. Kroz sam pištolj prolazi još žica, kabel za napajanje (plus pol), zaštitni plin, upravljački signal, a u nekim pištoljima koji se hlade tekućinama prolazi i voda. Pištolji koji su hlađeni zrakom više se preporučuju zbog jednostavnosti. Dok pištolji hlađeni vodom su kompaktniji i obično se koriste za najviše nazivne struje zavarivanja. Pištolji mogu imati zakrivljene sapnice (40° do 60°) ili ravne sapnice [15,16].

2.2.2. Plin za zavarivanje MIG metodom

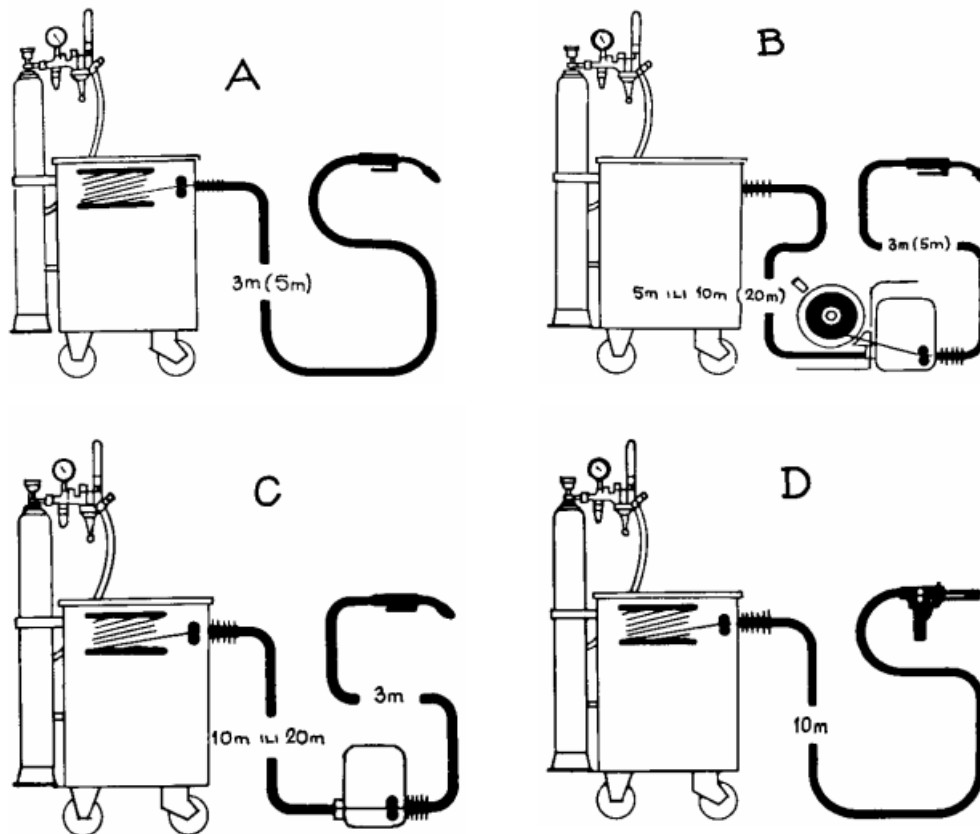
Kod MIG zavarivanja koriste se zaštitni plinovi koji se dovode na mjesto zavarivanja kroz posebnu sapnicu na pištolj. Njihova uloga je da zaštite mjesto zavarivanja i kapljice rastaljenog metala tijekom prolaza električnim lukom i talinom od okolne atmosfere.

Postoji nekoliko opcija zaštitnog plina za MIG zavarivanje, ovisno o primjeni i potrebama. Mješavina 75% argona i 25% ugljičnog dioksida (također zvan 75/25 ili C25) radi kao najbolji univerzalni zaštitni plin za ugljični čelik. Proizvodi najmanju količinu prskanja, najbolji izgled zrna i ne potiče izgaranje na tanjim metalima. Stopostotni CO_2 osigurava dublju penetraciju, ali također povećava prskanje i zrno će biti grublje nego kod primjene plina 75/25 [17].

2.2.3. Sustav za dobavu žica

Za dobavu žice koriste se posebni uređaji koji za vrijeme zavarivanja osiguravaju ravnomjernu dobavu žice na mjesto zavarivanja. Postoji više sustava dovođenja žice. Sustav mora osigurati fleksibilnost i postizanje različitih brzina dobave žice što ovisi o uvjetima zavarivanja.

Na slici 9 prikazani su sustavi dovođenja žice. Kabinski sustavi za dobavu žica (slika 10a) svoju primjenu nalaze kod nepokretnih radnih mjesta, kolut žice i pogonski mehanizmi smješteni su u kućište za napajanje. Univerzalni sustavi (slika 10b) se nalaze izvan kućišta, rad s takvim sustavom koristi se na promjenjivim mjestima i veliki komadima metala. Tandem sustavi (slika 10c) se sastoje od dva pogonska mehanizma, jedan u kućištu dok se drugi nalazi neposredno kod mjesta zavarivanja. Push-pull sustav (slika 10d) također pokreću dva pogonska mehanizma s time da se jedan mehanizam nalazi u kućištu dok je drugi u pištolju [16,17].



Slika 10. Sustavi dovođenja žice: a) kabinski, b) univerzalni, c) tandemski, d) push-pull [17]

Za dobavu žice najčešće se koriste dva načina. Prvi način je guranje žice „push“. Primjenom ovog postupka žica se gura kontroliranom brzinom pomoću pogonskih kotačića kroz vodilicu. Potrebna brzina žice kontrolira se istosmjernim motorima. Pogon osiguravaju 2 ili 4 kotačića koji guraju žicu. Ovaj način omogućuje rad sa žicama od 0.6 do 2.4 mm za čelik, 1.2 do 2.4 mm za aluminij i 1.0 do 2.4 mm za žice koje su punjene praškom. S ovim načinom može se sigurno dodavanje izvesti do nekih 3 do 4 m udaljenosti. Drugi način je „push-pull“. Pomoću pogonskih kotačića „push“ žica se gura do pogonskih kotačića „pull“ koji je vuku do mjesta zavara. Kao i kod prvog načina „push“ je smješten u kućištu, dok je „pull“ smješten u pištolju. Prednost ovog sustava je ta da je žica uvijek zategnuta u vodilici što omogućuje dobavu žica i manjih promjera (0.8 mm) na udaljenostima i do 15 m [16,17].

3. METODE ISPITIVANJA TVRDOĆE

Tvrdoća je otpornost ispitivanog materijala prema prodiranju drugog puno tvrdog tijela u njegovu površinu. Kako bi se rezultati ispitivanja tvrdoće mogli međusobno uspoređivati, moraju biti točno definirani ili standardizirani uvjeti ispitivanja, kao što je model utiskivača (indentora), sila i vrijeme njegovog djelovanja na tijelo. Ispitivanje tvrdoće je najraširenija metoda ispitivanja materijala, koja omogućuje brzo, lako i jednostavno određivanje mehaničkog svojstva tvrdoće na malom uzorku praktički bez njegovog razaranja [18,19].

Prvu metodu mjerenja tvrdoće razvio je njemački mineralog Friedrich Mohs 1822.g., koji je uspostavio ljestvicu tvrdoće na usporedbi deset relativno čestih minerala. Napravljena je podjela prema Mohsovoj ljestvici minerali u 10 razreda tako da svaki sljedeći član ove ljestvice mora zaparati površinu prethodnog člana [18,19].

Za mjerenje tvrdoće tehničkih materijala razvijene su 20. stoljeću niz metoda ispitivanja tvrdoće (npr. Brinell, Vickers, Rockwell, Knoop idr.). Za inženjerski praksu vrlo je važno znati da je tvrdoća u odnosu s nekim drugim svojstvima materijala, npr. s vlačnom čvrstoćom kod nekih čelika i ljevova, s otpornošću na abrazijsko trošenje. Uređaji za ispitivanje tvrdoće su znatno jednostavniji i jeftiniji od kidalica za univerzalna statička ispitivanja materijala. Za ispitivanje tvrdoće bitno je samo izvršiti odgovarajuću pripremu mjernih ploha kako bi se mogla točno izmjeriti veličina, dubina otiska ili visina odskoka utiskivača [18,19].

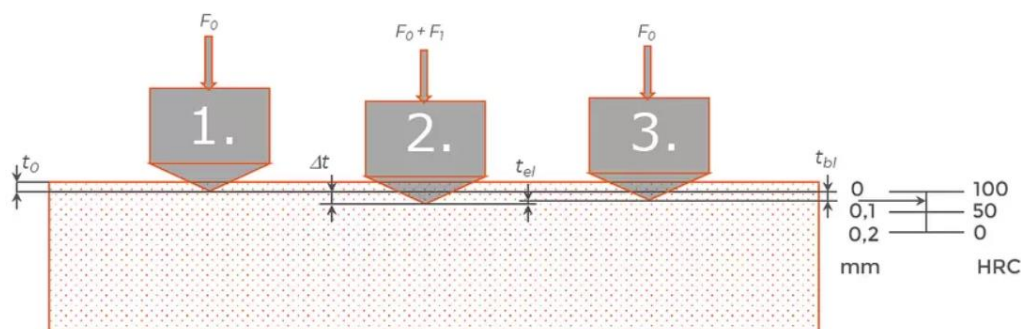
Na području mjerenja tvrdoće koristi se veliki broj različitih metoda i pripadajuće opreme, a izbor odgovarajuće metode najčešće se provodi prema vrsti materijala. S obzirom na materijale, metode za ispitivanje tvrdoće mogu se svrstati u dvije osnovne skupine: metode za ispitivanje tvrdoće metalnih materijala i metode za ispitivanje tvrdoće elastomera i ostalih polimera [18,19].

Najveću primjenu u praksi imaju tzv. statičke metode ispitivanja tvrdoće koje su standardizirane širom svijeta: Brinellova, Vickersova i Rockwellova, kod kojih se ispitivanje tvrdoće izvodi statičkim djelovanjem sile na statičkim uređajima u laboratorijima za kontrolu kvaliteta, osobito poslije toplinskih obrada, kemijsko-toplinskih obrada, razvoja novih materijala i proizvoda ili poslije izvršenih tehnoloških obrada. Nešto manju upotrebu imaju metode ispitivanja tvrdoće koje pretežno nisu normirane i kod kojih se ide na teren u pogone s malim prijenosnim uređajima s dinamičkim djelovanjem sile (udarnim) [18,19].

Prilikom ispitivanja tvrdoće statičkom silom, indentor/utiskivač je izložen djelovanju sile za određeno vrijeme, a pri ispitivanju tvrdoće dinamika djelovanjem sile kugla ili valjak udara s određenom kinetičkom energijom na ispitni komad.

3.1. Rockwellova metod

Metoda ispitivanja tvrdoće po Rockwellu najčešće je korištena metoda ispitivanja tvrdoće. Primjenjuje se na svim metalima, osim u uvjetima kada bi struktura ispitnog metala ili površinski uvjeti unijeli previše varijacija; katkad bi udubljenja bila prevelika za primjenu. Dijamanti stožac/utiskivač, prikazan na slici 11, s vršnim kutom od 120° i radijusom zaobljenja od 0.2 mm utiskuje se u ispitni uzorak pod zadanim uvjetima. Umjesto stošca utiskivač može imati i oblik kugle [20].



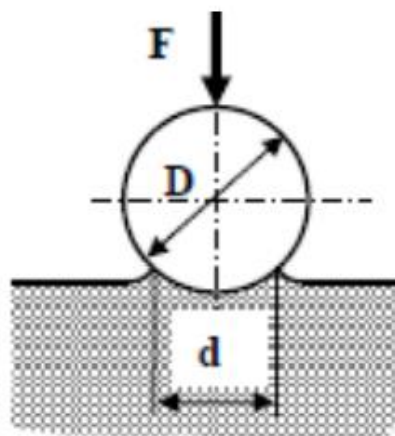
Slika 11. Utiskivači za primjenu Rockwellove metode ispitivanja [20]

Rockwellovom metodom mjeri se dubina prodiranja utisnutog tijela koju stvara sila/opterećenje na utiskivaču. Najprije, preliminarna ispitna sila F_0 (koja se obično naziva prednaprezanje ili manje opterećenje) primjenjuje se na uzorak pomoću dijamantnog stožastog ili kugličnog utiskivača. Ovo prednaprezanje probija površinu kako bi se smanjili učinci završne obrade površine. Nakon držanja preliminarne ispitne sile tijekom određenog vremena zadržavanja, mjeri se temeljna dubina udubljenja. Nakon predopterećenja dodaje se dodatno opterećenje F_1 , glavno opterećenje, kako bi se postiglo ukupno potrebno ispitno opterećenje ($F_0 + F_1$). Ova sila se drži određeno vrijeme (vrijeme zadržavanja) kako bi se omogućio elastični oporavak. Dodatno opterećenje se zatim oslobađa, vraćajući se na prethodno opterećenje. Nakon držanja preliminarne ispitne sile tijekom određenog vremena zadržavanja, mjeri se konačna dubina udubljenja. Vrijednost tvrdoće po Rockwellu izvodi se iz razlike u osnovnim i konačnim mjerenjima dubine. Ova se udaljenost pretvara u broj tvrdoće. Preliminarna ispitna sila se uklanja i utiskivač se uklanja s ispitnog uzorka [18-21].

Mjerenje se provodi pri temperaturi u granicama od $10^\circ\text{C} - 35^\circ\text{C}$, dok optimalni uvjeti ispitivanja zahtijevaju temperaturu od $23 \pm 5^\circ\text{C}$. Tijekom mjerenja ne smije biti nikakvih vibracija, jer bi one mogle negativno utjecati na rezultate ispitivanja. Glavna prednost ove metode je relativno velika brzina mjerenja, budući da se iznos tvrdoće neposredno očitava na skali tvrdomjera, te ne zahtijeva specifičnu ili zahtjevnu pripremu površine uzorka. Jedini nedostatak ove metode što se njome ne mogu dobiti točni izračuni te slaba selektivnost metode [21].

3.2. Brinellova metoda

Tvrdoća po Brinellu predstavlja omjer između primijenjene sile i površine otiska. Utiskivač, prikazan na slici 12, ove metode je u obliku kuglice izrađene od tvrdog metala zadanog promjera (D) koja se utiskuje traženom silom (F) na površinu ispitivanog uzorka. Promjeri kuglice su normirani te mogu iznositi 1-10 mm. Utiskivanjem u ispitivanom materijalu nastaje otisak oblika kugline kalote promjera baze (d) i dubine (h). Uređaj za mjerenje tvrdoće po Brinellu primjenjuju sile utiskivanja od 9.807 N do 29420 N. Primijenjena sila ovisi o svojstvima ispitivanih materijala i promjeru kuglice koja se utiskuje. Opterećenje se primjenjuje u određenom vremenskom intervalu od nekoliko sekundi. Pri ispitivanju čeličnih materijala ili materijala na bazi željeza i ostalih mekih materijala opterećenje mora trajati minimalno 30 sekundi. Promjer dobivenog otiska mjeri se pomoću mjernog mikroskopa ili mjernog povećala. Predmet koji se ispituje mora biti dobro očišćen, a površina glatka kako bi se točnije mogao odrediti promjer kuglinog otiska u usporedbi s ostalim metodama ispitivanja tvrdoće. Brinellova kuglica ostavlja najdublji i najveći otisak, pa funkcionalno i/ili estetski oštećuje površinu (s iznimkom mjerenja tvrdoće na gotovom proizvodu, a ne na uzorku). Time se postiže dobivanje točnijih rezultata kod materijala višefazne i mikrostrukture anizotropnih svojstava. Jedina mana Brinellove metode je nemogućnost mjerenja visokih tvrdoća, tvrdoća tankih prevlaka i ovisnost tvrdoće o opterećenju [18,22].

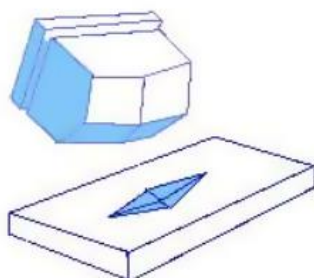


Slika 12. Utiskivač za primjenu Brinellove metode ispitivanja [22]

3.3. Knoopova metoda

Ova metoda je inačica Vickersove metode, koja će biti detaljnije opisana u sljedećem poglavlju, kojom se prvenstveno određuju tvrdoće relativno krhkih materijala poput stakla i keramike. Kao alat za utiskivanje u površinu uzorka primjenjuje se utiskivač dijamantnog oblika, prikazan na slici 13, koji ostavlja rombast otisak s kutevima između nasuprotnih ploha koji iznose 172.5° , odnosno 130° u odnosu na njegovu uzdužnu os.

Knoop indentor je više izduženog ili pravokutnog oblika. Knoopova metoda se obično koristi kada su udubljenja tijesno razmaknuta ili vrlo blizu ruba uzorka. Širina Knoopovog udubljenja omogućuje veću rezoluciju za mjerenje, a udubljenje također ne treba biti duboko [23].



Slika 13. Utiskivač za izvođenje Knoopove metode [23]

3.4. Vickersova metoda

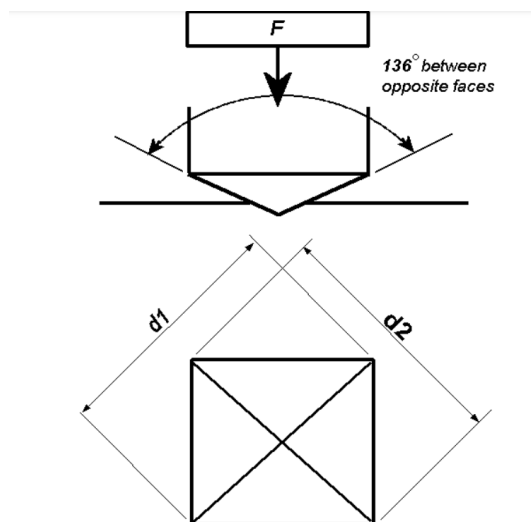
Vickersova metoda ispitivanja može se smatrati univerzalnom. Ona se pojavila oko 25 godina nakon Brinellove metode i kod nje su otklonjeni osnovni nedostaci Brinellove metode. Vickersova metoda ispitivanja tvrdoće koristi se uglavnom za određivanje tvrdoće materijala u opsegu opterećenja testa mikrotvrdoće. Međutim, ovaj test se općenito koristi kada se ispituje tvrdoća tankih slojeva kao što su premazi ili za prevladavanje pucanja u krhkim materijalima. Ova metoda se primjenjuje za sve vrste metalnih materijala pomoću tvrdomjera prikazanog na slici 14 i ima jednu od najširih skala među testovima tvrdoće. Što je veći trag koji ostavlja udubljenje na površini materijala pri definiranoj ispitnoj sili, to je materijal koji se testira mekši [18,19].



Slika 14. Tvrdomjer i njegove komponente

R.I. Smith i G.E. Sanderland predložili su da se tijekom ispitivanja umjesto kuglica, kao utiskivač pri ispitivanju tvrdoće, koristi piramida kako bi otisci bili geometrijski slični, bez obzira na veličinu primijenjenog opterećenja. Prema firmi koja je prva počela da proizvodi tvrdomjere s piramidom kao utiskivačem, ovaj postupak je poznat kao tvrdoća po Vickersu [19].

Utiskivač (prikazan na slici 15) ima oblik prave piramide sa kvadratnom osnovom i uglom između nastranih stranica od 136° . Prema navedenim standardima, utiskivač je prava dijamantna piramida s kvadratnom osnovom i uglom između naspramnih strana od $136^\circ \pm 0.5^\circ$. Sve četiri strane piramide moraju se sjeći u jednoj točki, odnosno linija veze između dviju suprotnih strana ne smije biti duža od 0.002 mm. Utiskivač mora biti dobro poliran i na njegovoj površini ne smije biti grešaka ili napuknuća [19,24].



Slika 15. Utiskivač za primjenu Vickersove metode ispitivanja [24]

Površina uzorka koji se ispituje treba biti ravana i gladaka, kako bi se dijagonale otiska mogle točno izmjeriti. Pri pripremanju površine uzorka treba izbjegavati postupke kojima se mijenja stanje materijala (zagrijavanje, hladna prerada i sl.). Najbolje je da se priprema površine uzorka obavi brušenjem i poliranjem. Otvrđnjavanje površine uzorka, koje nastaje pri mehaničkom poliranju, može se izbjeći primjenom elektrolitičkog poliranja. Kako bi se izbjegao utjecaj ojačavanja uslijed deformacije materijala u blizini otiska, debljina čeličnih uzoraka mora iznositi najmanje $1.2 d$, a debljina uzorka od obojenih i lakih metala najmanje $1.5 d$ (d je oznaka za dijagonalu otiska). Poslije ispitivanja na poleđini uzorka ne smije postojati nikakva vidljiva deformacija. Ispitivanje se izvodi tako što se utiskivač, postavljen normalno na površinu, bez trzaja utiskuje u materijal, sve dok sila utiskivanja ne dostigne određenu vrijednost. Ova sila se održava 10 do 15 sekundi, a kod lakih metala 30 sekundi. Za ispitivanje čelika obično se primjenjuje sila od 294 N, budući da standardi dopuštaju i upotrebu drugih opterećenja, pod uvjetom da nisu manja od 49 N niti veća od 981 N. Za ispitivanje lakih metala i njihovih legura normalno se upotrebljava sila od 98 N [18,19].

Prema definiciji, tvrdoća po Vickersu izračunava se izrazom:

$$HV = k \cdot \frac{F}{A}$$

gdje F predstavlja silu utiskivanja u N, A površinu otiska na površinu nakon rasterećenja u mm^2 , a k predstavlja konstantu koja je recipročna vrijednost ubrzanja zemljine sile teže (g_n) prema:

$$k = \frac{1}{g_n} = \frac{1}{9.80665} \approx 0.102$$

Stoga Vickersovu tvrdoću opisuje sljedeća jednačba:

$$HV = \frac{0.102 \cdot F}{A}$$

Površina otiska izražava se pomoću dijagonale baze otisnuća (kvadrata), pa tako matematički izraz za izračun Vickersove tvrdoće izražava se u sljedećem obliku:

$$HV = 0.102 \cdot \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} \approx 0.1891 \frac{F}{d^2}$$

gdje d predstavlja srednju vrijednost dvije izmjerene dijagonale otiska (slika 13).

4. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu završnog rada ispitana je mikrostruktura i tvrdoća dvaju uzoraka sučeono zavarenih dijelova konstrukcijskog čelika S235JR. Ploče debljine 15 mm od konstrukcijskog čelika zavarene su sučeono K zavarom primjenom MIG metode. Zavareni spojevi hlađeni su nakon zavarivanja na dva različita načina. Prvi zavareni spoj je hlađen na zraku, a drugi u vodi. Prije analize mikrostrukture zavarenog spoja obaju uzoraka i analize njihove tvrdoće u narednim poglavljima opisat će se svojstva primijenjenog čelika te postupak pripreme uzoraka za zavarivanje MIG metodom. Nadalje će biti opisan proces rezanja, postupak pripreme uzoraka za metalografsku analizu te postupak mjerenja tvrdoće.

4.1. Osnovni materijal

Osnovni materijal ovog sučeono zavarenog spoja je konstrukcijski čelik S235JR koji se često koristi u građevinarstvu. Brojne čelične konstrukcije izrađuju se od spomenutog čelika koji služi i za izgradnju industrijskih i stambenih objekata, dijelova stupova za prijenos električne energije, elemenata opreme, mostnih konstrukcija, naftnih i plinskih platformi, automobilskih ovjesa i drugih građevina. Čelik S235JR može se zavarivati bez ograničenja, bez naknadne toplinske obrade i bez zagrijavanja. Zavarivanjem debljih čeličnih proizvoda povećava se rizik od stvaranja hladnih pukotina. U tablici 2 je prikazan kemijski sastav čelika S235JR prema uzorku koji ne smije biti deblji od 40 mm [25, 26].

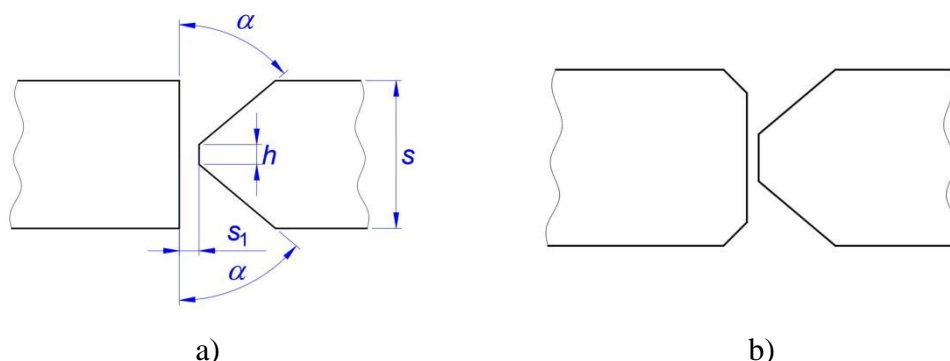
Tablica 2. Kemijski sastav S235JR čelika [25]

| C | Mn | P | S | N | Cu |
|-------|-------|--------|--------|-------|-------|
| ≤0.17 | ≤1.40 | ≤0.035 | ≤0.035 | ≤0.12 | ≤0.55 |

4.2. Priprema uzorka za zavarivanje

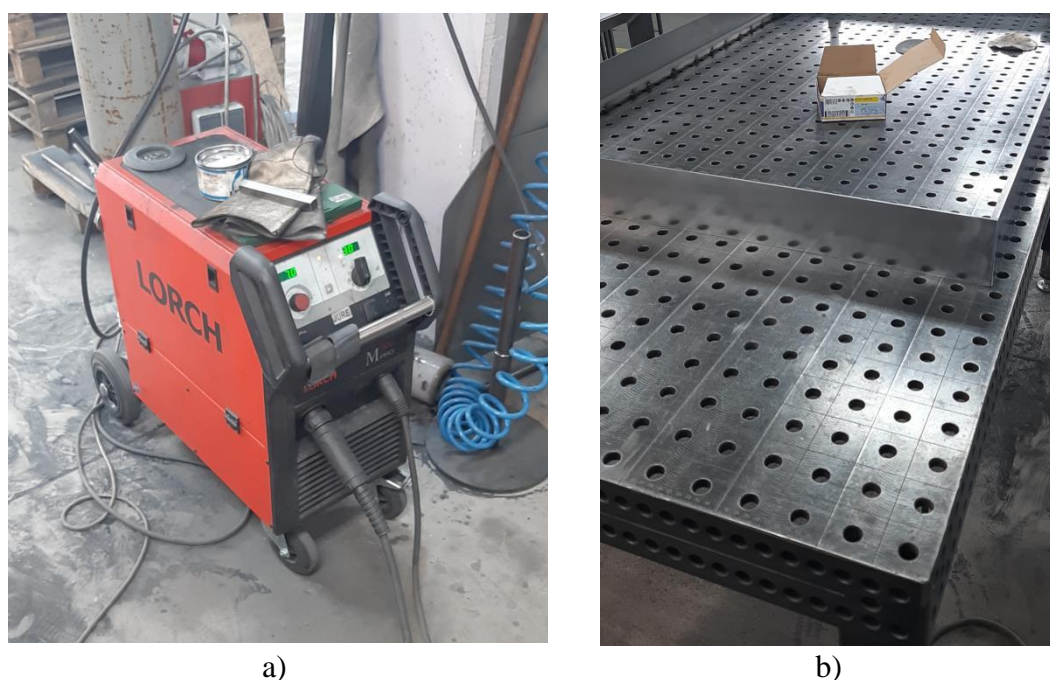
Priprema čeličnih uzoraka za sučeono zavarivanje započinje rezanjem na automatiziranoj tračnoj pili. Osnovni materijal dimenzija 35x15 mm se postavio u nepomičnu donju čeljust pile kako bi se fiksirao za rezanje. Ukupno su se izrezala četiri uzorka duljine 65 mm. Uz pomoć tračne brusilice uzorci su se očistiti i pripremili za sučeoni spoj. S obzirom na to da je ploča osnovnog materijala veće debljine 15 mm potrebna je priprema s gornje i s donje strane. U pripremi K zavarova potrebno je skositi samo jednu bočnu stranu ploče dok je druga bez skošenja. U pripremi naših uzoraka skošene su obje ploče, jedna manje, a druga više. Strana većeg skošenja odgovarala je K pripremi, a druga strana koja je trebala biti bez skošenja dobila je manje skošenje. Provedena priprema uzorka nije slijedila točnu pripremu K zavarova. Priprema K zavar primjenjuje se kod tupih, kutnih i T-spojeva, kao što je o ovom eksperimentu. K zavar koristi se u slučajevima kada s jedne strane nije moguće iskoristiti rub. Ispravno

pripremljen zavar, prikazan na slici 14a, koristi se za ploče debljina veće od 15 mm, a dimenzije su sljedeće: $s_1 = 2-4$ mm, $h=0-3$ mm i $\alpha=50-55^\circ$. Na slici 16b prikazana je približna priprema korištena u ovom eksperimentu. Sa slike 16 je vidljivo da potreban kut skošenja iznosi oko 45° , što nije dovoljno.



Slika 16. Priprema zavora: a) potrebno(standard), b) korištena u eksperimentu

Nakon pripreme skošenja uslijedilo je zavarivanje MIG metodom uz pomoć uređaja prikazanog na slici 15a. Zatim su izbrušeni komadi postavljeni na stol za zavarivanje (slika 17b).



Slika 17. a) uređaj za zavarivanje MIG postupkom, b) stol za provođenje zavarivanja

Sa slike 17b vidljivo je da se na stolu nalazi veliki broj rupa koje su namijenjene za postavljanje stega za učvršćivanje komada metala. Uzorci su se najprije točkasto zavarili na krajevima izbrušenih žljebova kako bi se komadi približili jedan drugom i tako elektrodom u potpunosti zavarili. Oba uzorka u obliku slova L zavarili su se prema slici 18. Jedan komad zavarenog konstrukcijskog čelika je ostavljen na stolu kako bi se postepeno ohladio na sobnoj temperaturi dok je drugi naglo ohlađen u vodi. Budući da

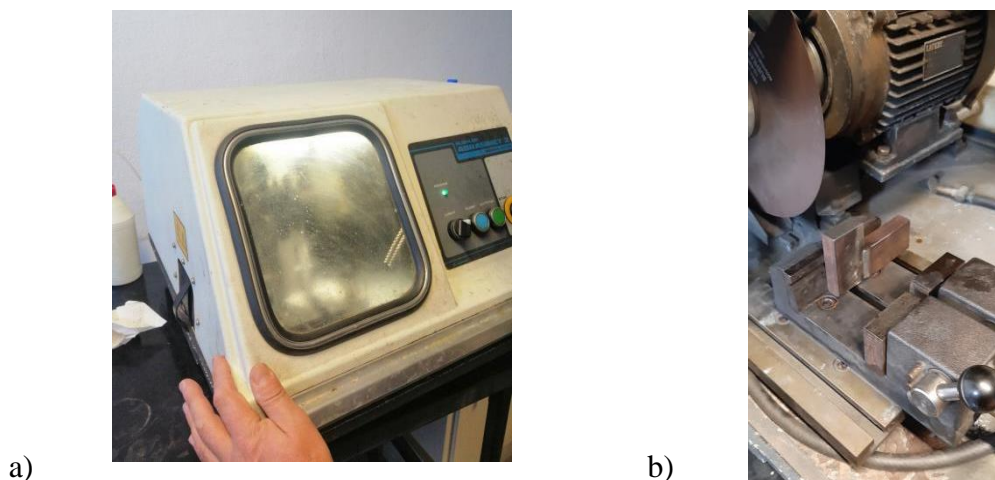
je cilj eksperimenta usporediti mikrostrukturu i tvrdoću obaju uzoraka različito hlađenih, potrebno ih je razlikovati nakon hlađenja. Stoga je uzorak prije zavarivanja koji će biti hlađen u vodi zaobljen na tračnoj brusilici što se može vidjeti na desnom uzorku lijeva donja strana osnovnog materijala na slici 18b.



Slika 18. Uzorak: a) hlađen na zraku, b) hlađen u vodi

4.3. Postupak rezanja uzoraka

Iz spojeva sučeono zavarenih komada konstrukcijskog čelika zbog metalografske analize potrebno je izdvojiti jedan segment zavarenog spoja. Budući da su napravljeni uzorci pogodne veličine za rukovanje, daljnji postupak će se izvesti na rezalici Buehler ABRASIMET. Rezalica sadrži vertikalnu kružnu pilu, sustav za dovod emulzije, steznike i poklopac (slika 19a). Manipulacija reznom pločom provodi se ručno preko drške. Na slici 19b prikazan je uzorak koji će biti stegnut kako bi se mogao rezati kružnom pilom. Tijekom rezanja dodaje se emulzija kako bi se reducirala toplina uzrokovano trenjem/rezanjem kako ne bi došlo do promjene u mikrostrukturi ispitivanih uzoraka.



Slika 19. a) rezalica Buehler ABRASIMET, b) postavljeni uzorci

Nakon što su karakteristični segmenti obaju uzoraka izrezani provest će se metalografska analiza.

Uzorci su rezani tako da je uzorak hlađen na zraku dulji, a uzorak hlađen u vodi je kraći. Izrezani uzorak hlađen na zraku dimenzija je 55x15x8.5 mm (slika 20a), a uzorak hlađen u vodi iznosi 34x15x10 mm (slika 20b). Debljina ploče osnovnog materijala iznosi 15 mm.



a)



b)

Slika 20. Izrezani uzorci: a) spoja hlađenog na zraku, b) spoja hlađenog u vodi

4.4. Postupak pripreme uzoraka za metalografsku analizu

Izrezane uzorke zbog njihove veličine nije moguće postaviti u uređaj za izostatsko prešanje u vodljivu masu stoga će se postupak brušenja izvesti ručno. Nakon rezanja uzoraka slijedi njihovo brušenje i naknadno poliranje uz pomoć uređaja BUEHLER Phoenix Beta koji je prikazan na slici 21.



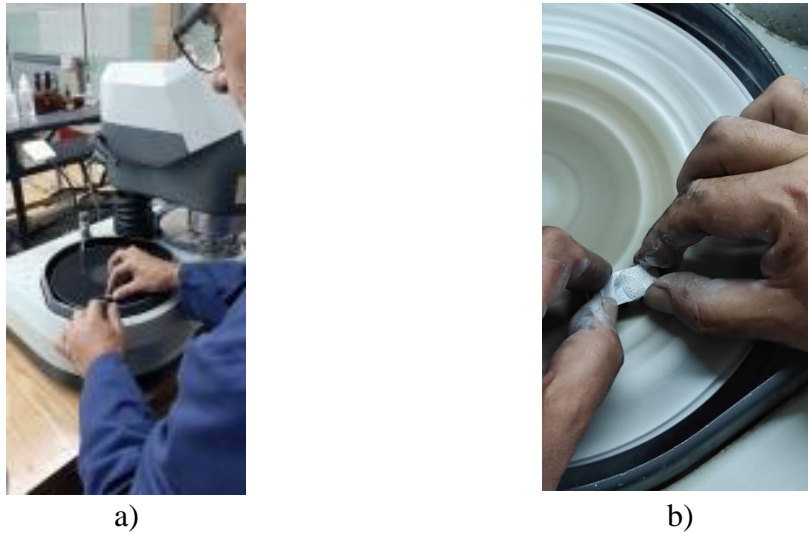
Slika 21. Uređaj za brušenje i poliranje “BUEHLER Phoenix Beta”

Postupak brušenja izvodi se pomoću vodobrusnih papira različitih gradacija. Počinje se s najgrubljim, a završava s onim čija je gradacija najmanja kako bi se dobila što finije izbrušena površina uzorka. Postupak započinje primjenom brusnog papira gradacije 400, te se onda koriste gradacije 600 i 800. Tijekom brušenja uzorci se konstantno trebaju hladiti vodom kako ne bi došlo do promjene u mikrostrukturama uzoraka.

Nakon brušenja slijedi proces poliranja na tkanini za poliranje koje se provodi primjenom praha Al_2O_3 granulacije $0.3 \mu m$ pomiješanog s vodom. Postupak brušenja prikazan je na slici 21a, a postupak poliranja na slici 20b. Parametri brušenja i poliranja navedeni su u tablici 3.

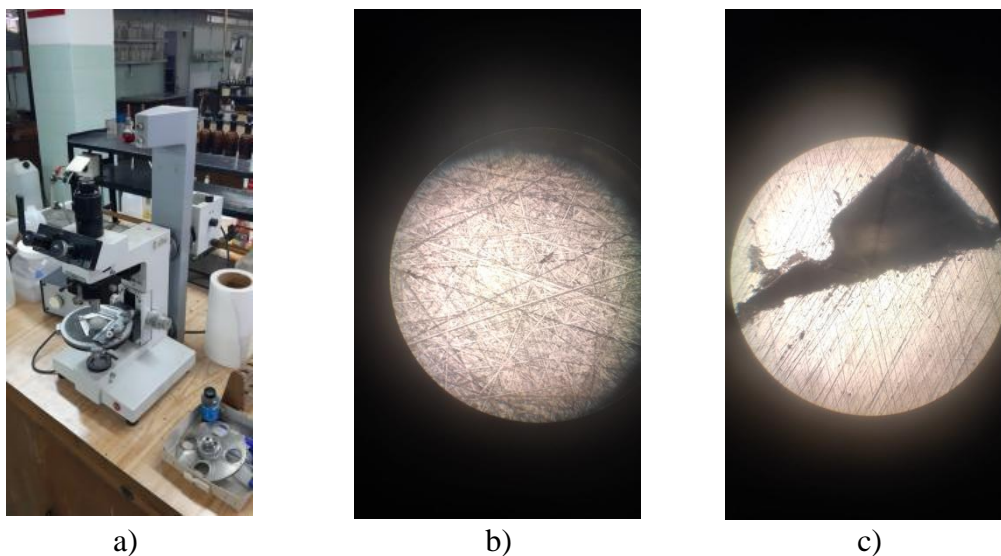
Tablica 3. Parametri brušenja i poliranja uzoraka čelika (S235JR) rukom

| Brušenje | | | | |
|---------------------|------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------|
| Podloga | Granulacija zrna | Medij | Brzina rotacije ploče, okret/min | Vrijeme, min |
| SiC – papir | 400 | voda | 150 | 6 |
| | 600 | | | 5 |
| | 800 | | | 5 |
| Poliranje | | | | |
| Podloga | Granulacija zrna | Medij | Brzina rotacije ploče, okret/min | Vrijeme, min |
| Tkanina (tzv. filc) | mikrovlakna | voda + Al_2O_3 ($0.3 \mu m$) | 150 | 5 |



Slika 22. Priprema za metalografsku analizu: a) brušenje i b) poliranje

Svaka faza brušenja i poliranja kontrolirana je pomoću svjetlosnog mikroskopa, prikazanog na slici 23a, kako bi se pratio napredak brušenja odnosno poliranja. Na slikama 23b i 23c prikazano je navedena kontrola. Uzorci se poliraju sa svrhom eliminiranja riseva odnosno ogrebotina sve dok nije postignuta zrcalna površina uzorka.



Slika 23.a) Metalografski svjetlosni mikroskop Leica Ortholux, b) djelomično izbrušena površina uzorka i c) vidljive nepravilnosti na površini uzorka

Nakon brušenja i poliranja slijedi nagrivanje nital-om (5 %-tna otopina dušične kiseline u alkoholu). Nagrivanje se provodi radi omogućavanja promatranja mikrostrukture. Nakon što su uzorci nagriveni ispiru se vodom i čiste alkoholom te suše sušilom za kosu. Nakon provedenog nagrivanja provodi se završna vizualna kontrola mikroskopom radi provjere nagrivenosti uzoraka te se pristupa analizi mikrostrukture zavarenih uzoraka pod različitim povećanjima.

Metalografska analiza zavarenih nagrizenih uzoraka provedena je pomoću invertnog metalografskog mikroskopa Olympus GX 51 s digitalnom kamerom DP70 prikazanim na slici 24. Uređaj je opremljen programskim paketom za automatsku obradu slike 22 Analysis Materials Research Lab.



Slika 24. Invertni metalografski mikroskop Olyimpus GX51 s digitalnom kamerom DP70

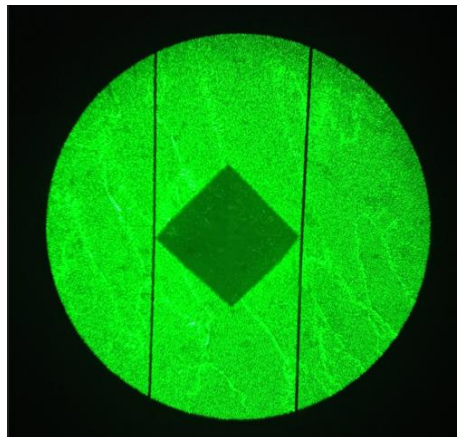
4.5. Postupak mjerenja tvrdoće

Nakon metalografske analize zavarenim uzorcima mjerena je tvrdoća metodom po Vickersu na uređaju Mitutoyo koji je prikazan na slici 25. U teorijskom dijelu metodom po Vickersu indenter u obliku četverostrane dijamantne piramide s vršnim kutom od 136° utiskuje se u materijal silom F , dok materijal pruža otpor tom prodiranju. Dobiveni otisak nakon utiskivanja u materijalu je kvadratnog oblika i pomoću navedenog uređaja mjerimo njegove dijagonale kako bi uređaj mogao izračunati površinu utiskivanja što je prikazano na slici 26.

Prije početka mjerenja tvrdoće uređaj je potrebno nulirati i kalibrirati, tj. provjeriti točnost njegovog mjerenja. Nuliranje operater provodi primicanjem indikatora na uređaju dok ne dođu u kontakt, te onda pritiskom na tipku za nuliranje izvrši se podešavanje očitavanja uređaja na nulu. Kalibracija uređaja provodi se pomoću etalona (ploče poznatih vrijednosti tvrdoće i za poznatu vrijednost opterećenja).

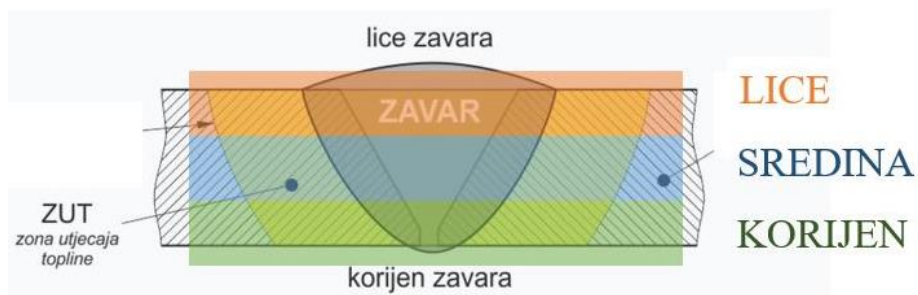


Slika 25. Uređaj Mitutoyo za mjerenje tvrdoće metodom po Vickersu



Slika 26. Mjerenje dijagonala otisku

Nakon kalibracije uređaja provedeno je mjerenje tvrdoće zavarenih uzoraka po područjima prikazanim na slici 27. S obzirom na to da korišteni uređaj nema mogućnost horizontalnog i vertikalnog pomicanja uzorka između svakog mjerenja, izmjerene tvrdoće provedene su po prikazanim područjima (lice, sredina i korijen u zavaru i u zoni utjecaja topline). Mjerenja tvrdoće provedena su s opterećenjem od 10 kg što odgovara sili $F= 98.1\text{N}$ i s vremenom utiskivanja od 10 sekundi.



Slika 27. Područja mjerenja tvrdoće

5. REZULTATI I RASPRAVA

U prvom dijelu ovog završnog rada dan je detaljan teorijski pregled provedenih mjerenja zavarenog spoja. Prije provedenih mjerenja uzorke je bilo potrebno izrezati kako bi se detaljnije vidio ostvareni zavareni spoj. Vizualnom kontrolom sučeonog poprečnog presjeka ostvarenog K-zavara može se uočiti loša provarenost korijena zavara s obje strane (slika 20). Kako bi se postigla bolja provarenost korijena potrebno je pri pripremi sučeonog zavarenog spoja dobro pripremiti bočne strane prema uputama s nagibom od 50 do 55° te koristiti mjerilo za njihovu kontrolu. Potrebno je koristiti i mjerilo za mjerenje razmaka između ploča prikazano na slici 28a. Mjerilo se postavlja okomito između ploča koje trebaju biti zavarene što je prikazano na slici 28b [27].



Slika 28. Mjerilo za mjerenje razmaka [27]: a) mjerilo, b) pravilna primjena mjerila

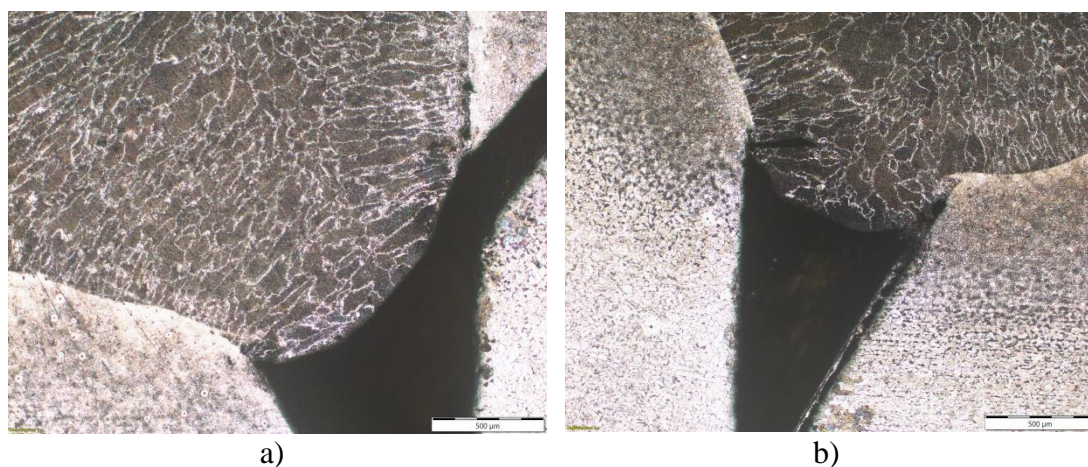
Nakon provedenog zavarivanja jedan od uzoraka hlađen je na zraku, dok je drugi naglo ohlađen u vodi. Cilj ovog istraživanja je uočiti razlike u mikrostrukтури uzoraka i usporediti izmjerene tvrdoće. Nadolazeća potpoglavlja razdvojena su s obzirom na izvedbu cjelokupne analize. Najprije će biti predstavljeni rezultati metalografske analize koji će odmah biti analizirani, a potom će biti predstavljeni rezultati mjerenja tvrdoće s analizom.

5.1. Metalografske snimke

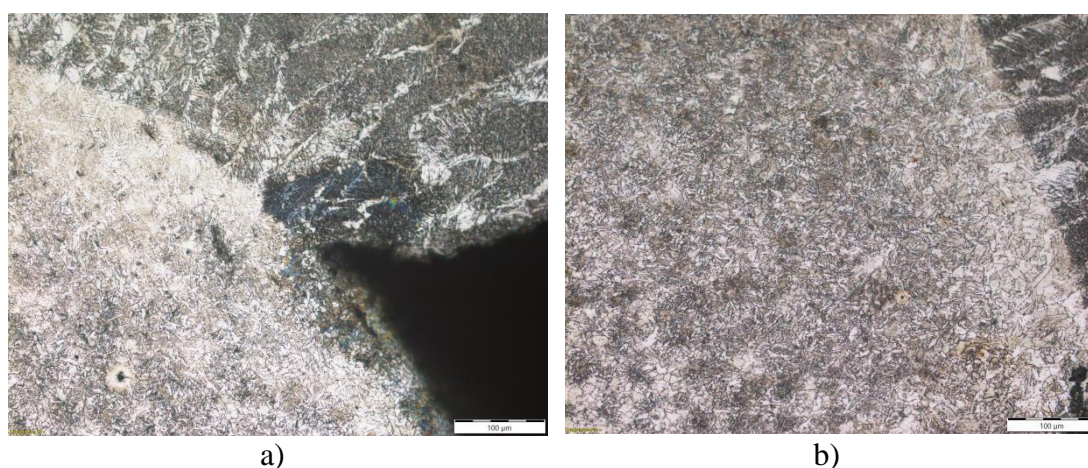
Metalografskom analizom na invertnom mikroskopu napravljena je analiza mikrostrukture sučeono zavarenih ploča konstrukcijskog čelika MIG postupkom. Ploče su debljine 15 mm i sučeoni K-zavar izveden je s gornje i donje strane. U ovoj analizi promatrana je samo jedna zavarena strana obaju uzoraka.

Zbog loše provarenosti korijena s obje strane zavara njihove metalografske slike promatrane su prve. Slika 29a i 30a prikazuju mikrostrukтуру korijena zavara na uzorku koji je nakon zavarivanja hlađen na zraku, dok slike 29b i 30b prikazuje mikrostrukтуру

korijena zavara uzorka koji je nakon zavarivanja naglo hlađen (kaljen) u vodi pri različitim povećanjima. Povećanje na slici 29 je 50x, dok je povećanje na slici 30 200x.



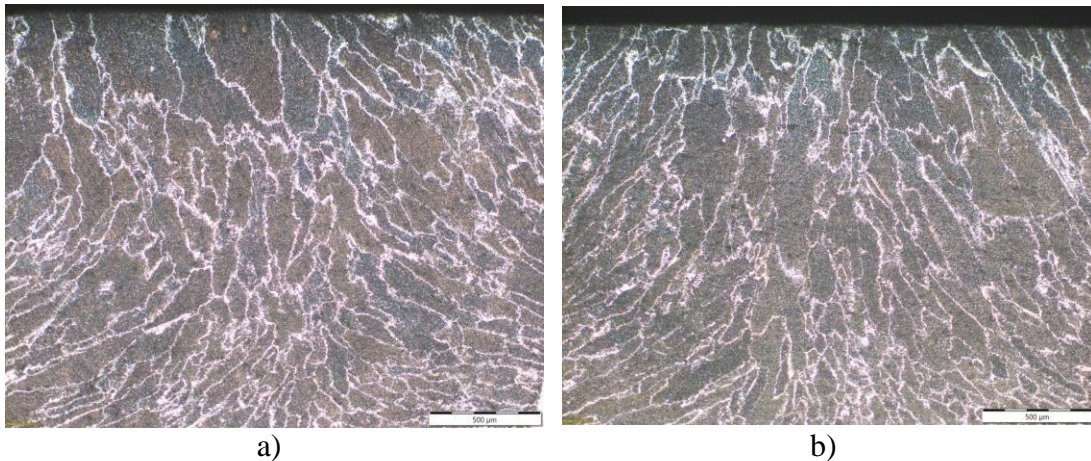
Slika 29. Mikrostruktura u korijenu zavarenog spoja pri povećanju 50x: a) hlađen na zraku, b) kaljen u vodi



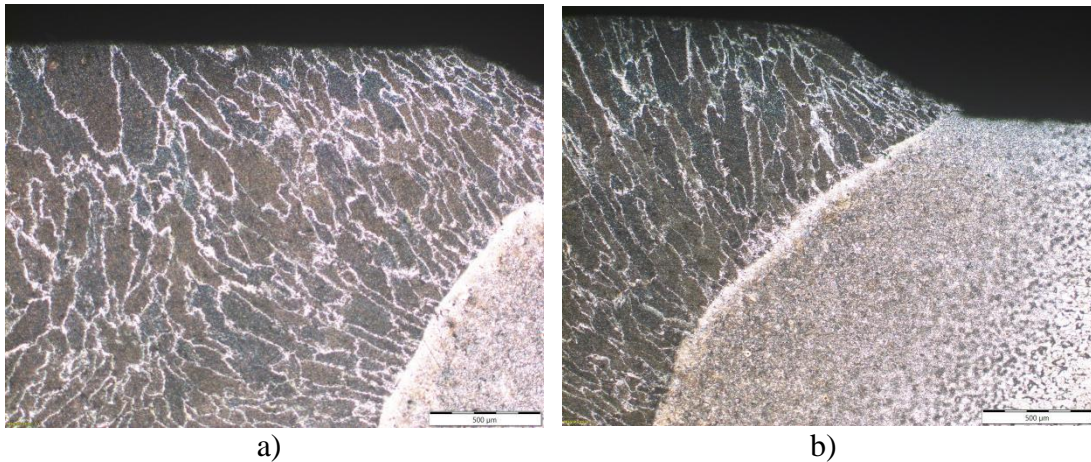
Slika 30. Mikrostruktura u korijenu zavarenog spoja pri povećanju 200x: a) hlađen na zraku, b) kaljen u vodi

S metalografskih slika je vidljiva praznima u korijenu zavara koja se ne bi smjela dogoditi. Loša provarenost korijena zavara oba uzorka izrazito je uočljiva. Ona je inicijacija širenja pukotine pri opterećenju zavarenog spoja, a ujedno i razlog stvaranja korozije. U odjeljku ispred navedene su kontrole pripreme uzorka prije zavarivanja.

Nadalje slika 31a i 32a prikazuju mikrostrukturu lica zavarenog spoja na uzorku koji je nakon zavarivanja hlađen na zraku, dok slike 31b i 32b prikazuje mikrostrukturu lica zavarenog spoja uzorka koji je nakon zavarivanja naglo hlađen (kaljen) u vodi pri istim povećanjima. Slika 31 uzeta je sa sredine lica zavara, dok je slika 32 uzeta s desne strane lica zavara.



Slika 31. Mikrostruktura na sredini lica zavarenog spoja pri povećanju 50x: a) hlađen na zraku, b) kaljen u vodi

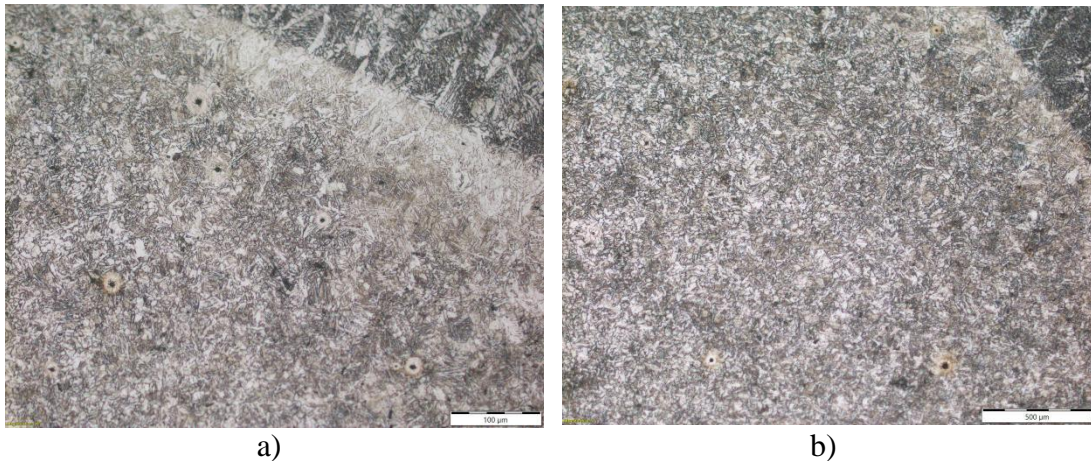


Slika 32. Mikrostruktura na desnoj strani lica zavarenog spoja pri povećanju 50x: a) hlađen na zraku, b) kaljen u vodi

Na svim prikazanim metalografskim snimkama vidi se da zavar ima strukturu lijeva. S metalografskih snimki sredina lica zavarenog spoja (slika 31) mogu se uočiti razlike u veličini zrna. Uzorak naglo hlađen u vodi nakon zavarivanja ima sitnija zrna od uzorka hlađenog na zraku nakon zavarivanja na sredini lica zavarenog spoja.

Na oba uzorka sa slike 33 uočava se da su zrna zavara unutar zone utjecaja topline izdužena prema zoni utjecaja topline. Sitnozrnatija struktura primjećuje se u zoni utjecaja topline nego u osnovnom materijalu, koji je zadržao prvobitnu strukturu.

Kako bi bolje uočili razlike u zoni utjecaja topline metalografske snimke uzete su na lijevoj strani zone utjecaja topline i prikazane na slici 33 pod povećanjem 200x.

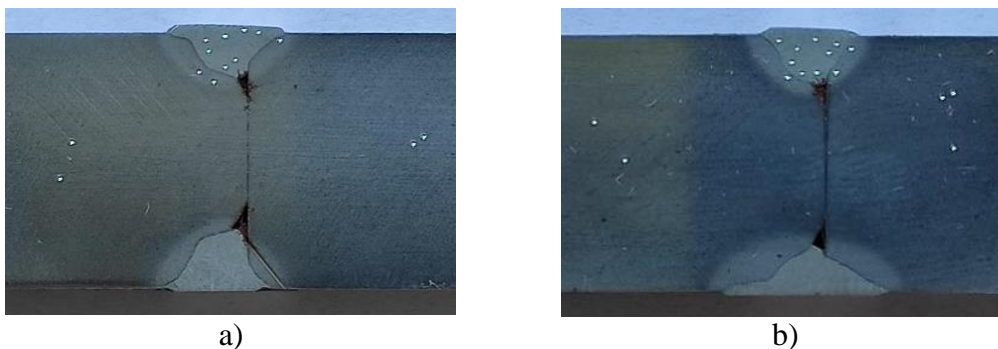


Slika 33. Mikrostruktura na lijevoj strani zone utjecaja topline zavarenog spoja pri povećanju 200x: a) hlađen na zraku, b) kaljen u vodi

Analizom metalografskih snimki u zoni utjecaja topline te uvećanjem prikazanih slika na slici 33 uočava se sitnozrnatija struktura kod uzorka koji je naglo hlađen u vodi u odnosu na uzorak hlađen na zraku nakon zavarivanja.

5.2. Mjerenja tvrdoće

Nakon provedene metalografske analize oba ispolirana uzorka postavljena su na uređaj za mjerenje tvrdoće po Vickersu. Tvrdoća po Vickersu izmjerena je s opterećenjem od 10 kg (HV 10) uz vrijeme utiskivanja indentora od 10 sekundi. Otisci utiskivanja indentorta po uzorku prikazani su na slici 34.



Slika 34. Otisci utiskivanja indentora po uzorcima: a) hlađen na zraku, b) kaljen u vodi

Rezultati mjerenja tvrdoće na uzorku koji je hlađen na zraku nakon zavarivanja prikazani su u tablici 4, dok su rezultati mjerenja tvrdoće na uzorku koji je naglo hlađen u vodi nakon zavarivanja prikazani u tablici 5. Mjerenja tvrdoće provedena su na osnovnom materijalu te u korijenu, sredini i licu zavara i zone utjecaja topline.

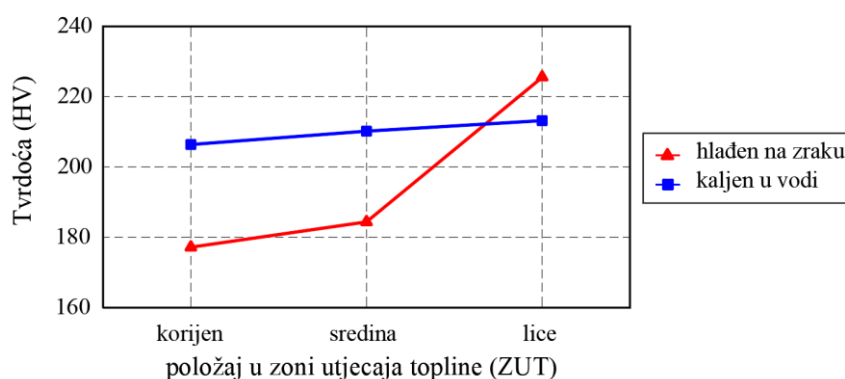
Tablica 4. Rezultati mjerenja tvrdoće za uzorak hlađen na zraku nakon zavarivanja (HV 10)

| OSNOVNI MATERIJAL | Prva ploča | Druga ploča | |
|--------------------------|------------|-------------|-------------|
| | | 179,6 | 181,9 |
| | 178,6 | 180,5 | |
| ZONA UTJECAJA TOPLINE | Korijen | Sredina | Gore (lice) |
| | 177,2 | 184,4 | 225,5 |
| ZAVAR | Korijen | Sredina | Gore (lice) |
| | 249,6 | 261,9 | 263,2 |
| | 249,6 | 259,1 | 265,1 |
| | | | 263,8 |

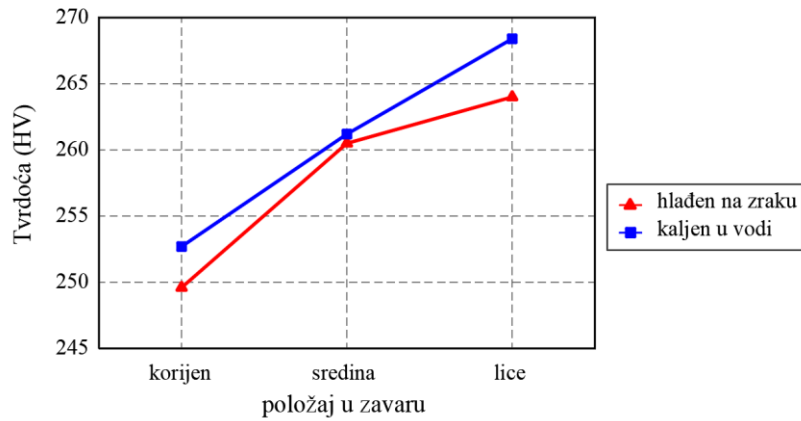
Tablica 5. Rezultati mjerenja tvrdoće za uzorak hlađen/kaljen u vodi nakon zavarivanja (HV 10)

| OSNOVNI MATERIJAL | Prva ploča | Druga ploča | |
|--------------------------|------------|-------------|-------------|
| | | 177,6 | 181,1 |
| | 179,3 | 183,8 | |
| ZONA UTJECAJA TOPLINE | Korijen | Sredina | Gore (lice) |
| | 206,4 | 210,2 | 213,2 |
| ZAVAR | Korijen | Sredina | Gore (lice) |
| | 253,3 | 258,0 | 270,1 |
| | 252,1 | 262,0 | 262,9 |
| | | 263,7 | 272,3 |

Iz tablica može se primijetiti da je više mjerenja provedeno po određenom području. Izmjerene vrijednosti po području su uprosječene i prikazane dijagramom ovisnosti tvrdoće po području za zavar (slika 35) i za zonu utjecaja topline (slika 36). Ovisnosti promjene tvrdoće po položaju prikazane su na istom dijagramu za oba uzorka kako bi ih bolje mogli usporediti.



Slika 35. Vrijednosti uprosječenih izmjerenih tvrdoća po položaju u zoni utjecaja topline (ZUT)



Slika 36. Vrijednosti uprosječenih izmjerenih tvrdoća po položaju u zoni taljenja (ZT) tj. u zavaru

Iz oba dijagrama je vidljivo da vrijednosti tvrdoća rastu od korijena prema licu zavara kako u samom zavaru (slika 36) tako i u zoni utjecaja topline (slika 35). Porast tvrdoće u zavaru je približan i u uzorku koji je hlađen na zraku i koji je hlađen u vodi nakon zavarivanja, dok porast tvrdoće u zoni utjecaja topline veći je kod uzorka koji je hlađen na zraku. Tvrdoća kod uzorka koji je hlađen u vodi u zoni utjecaja topline veća je nego kod uzorka hlađenog na zraku.

6. ZAKLJUČAK

Cilj ovog završnog rada bio je analizirati uzorke sučeono zavarenog spoja zavarene MIG postupkom koji su nakon zavarivanja različito ohlađeni. Jedan uzorak je nakon zavarivanja ohlađen na zraku, dok je drugi naglo ohlađen u vodi. Analizom oba uzorka utvrdila se njihova različitost. Provedena analiza sastojala se od metalografske analize i mjerenja tvrdoće.

Provedena istraživanja pokazala su sljedeće:

- sučeono zavareni spojevi nisu bili dobro pripremljeni prije zavarivanja prema standardu za K zavar, stoga je došlo do loše provarenosti korijena s obje strane zavara i time do zadržavanja zraka u sredini zavarenih ploča koji može biti inicijalno mjesto početka korozije i inicijalno mjesto početka širenja pukotine zbog velike koncentracije naprezanja uslijed opterećenja;
- metalografskom analizom utvrđeno je da je u zoni taljenja (zavaru) zrno sitnije kod uzorka hlađenog u vodi u odnosu na uzorak hlađen na zraku;
- metalografskom analizom utvrđeno je u zoni taljenja izduženje zrna prema zoni utjecaja topline kod oba uzorka;
- metalografskom analizom utvrđeno je da je u zoni utjecaja topline sitnozrnatija struktura kod uzorka koji je naglo hlađen u vodi u odnosu na uzorak koji je hlađen na zraku;
- metalografskom analizom utvrđena je sitnozrnatija struktura u zoni utjecaja topline nego osnovnog materijala kod oba uzorka;
- mjerenjem tvrdoće ustanovljeno je da tvrdoće rastu od korijena prema licu zavara kako u samoj zoni taljenja (zavaru), tako i u zoni utjecaja topline ;
- mjerenjem tvrdoće ustanovljeno je da je porast tvrdoće u zoni taljenja (zavaru) približan u oba uzorka;
- mjerenjem tvrdoće ustanovljeno je da je prirast (gradijent) tvrdoće u zoni utjecaja topline veći kod uzorka koji je hlađen na zraku, ali tvrdoća uzorka koji je hlađen u vodi u zoni utjecaja topline od korijena do lica veća je nego kod uzorka hlađenog na zraku;
- rezultati metalografske analize i mjerenja tvrdoće pokazuju da je kod sitnozrnatije strukture i tvrdoća veća u zoni utjecaja topline.

7. LITERATURA

- [1] Jelaska, D.: Elementi strojeva, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split, 2005.
- [2] <https://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=66965> (preuzeto 10.6.2022.)
- [3] <https://pit.ba/vrste-zavarivanja-prednosti-i-nedostaci/> (preuzeto 10.6.2022.)
- [4] Decker, K.-H.: Elementi strojeva, Tehnička knjiga, Zagreb, 1975.
- [5] Gojić, M.: Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2008.
- [6] Podrug, S.: Elementi strojeva, Sveučilište u Splitu, FESB, Split, 2008. (preuzeto 8.7.2022.)
- [7] <https://www.ffri.hr/~mdundjer/Elementi%20strojeva%20I/05-ZavareniIzalemljeniSpojevi.pdf> (preuzeto 25.6.2022.)
- [8] Rakin, M.: Zavarivanje i srodni postupci, V izdanje, Beograd, 1986
- [9] Sedmak, A., Šijački-Žeravčić, V. Miloslavljenić, A., Đorđević, V., Vukićević, M.: Mašinski materijali II deo, izdanje Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu
- [10] Drk, P.: Tehnološki postupak zavarivanja plašta kućišta za rasklopna postrojenja EPP postupkom, završni rad, Sveučilište Sjever, Varaždin, 2015. (preuzeto 15.6.2022.)
- [11] <https://preventa.hr/zastita-na-radu-upit/elektrolucno-zavarivanje> (preuzeto 15.6.2022.)
- [12] Horvat, M., Kondić, V., Brezovečki, D.: Teorijske i praktične osnove TIG postupka zavarivanja, Technical Journal 8 (4), 2014., 426-432.
- [13] <https://mechanical.engineeringtalks.com/notes/manufacturing-technology/types-of-welding-r11/> (preuzeto 1.7.2022.)
- [14] Komar, M.: Utjecaj parametara MIG zavarivanja na strukturna svojstva zavarenog spoja, završni rad, Sveučilište Sjever, Varaždin, 2021. (preuzeto 2.6.2022.)
- [15] <http://www.dtzi.hr/upload/pdf/2.%20SEMINAR/Brosura%20seminar%202.pdf> (preuzeto 4.7.2022.)
- [16] Klobučar, M.: Teorijske i praktične osnove MIG/MAG postupka zavarivanja, Sveučilište Sjever, Varaždin, 2016.
- [17] Milotić, M.: Priručnik za zavarivače, Saobraćeni fakultet Doboj, Doboj, 2008. (preuzeto 9.7.2022.)
- [18] Vitez, I.: Ispitivanje mehaničkih svojstava metalnih materijala, Sveučilište Josipa Jurija Strossmayera u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavanskom Brodu, Slavonski Brod, 2006.
- [19] Vitez, I., Oruč, M., Snulahpašić, R.: Ispitivanje metalnih materijala, Univerzitet u Zenici Fakultet za metalurgiju i materijale, Zenica, 2006. (preuzeto 20.6.2022.)
- [20] https://www.qatm.com/products/hardness-testing/rockwell-hardness-tester/?gclid=CjwKCAjwquWVBhBrEiwAt1KmwhN0aq5Mwbb4seKR_Cc6kWI5sBI00CPx27ofqwCNU3CGdKO57Y_ZHxoCsFYQAvD_BwE (preuzeto 19.7.2022.)
- [21] <https://www.hardnesstesters.com/test-types/rockwell-hardness-testing> (preuzeto 10.7.2022.)
- [22] Ivaniš, D.: Određivanje tvrdoće materijala Vickersovom metodom uz različita opterećenja, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009. (preuzeto 20.6.2022.)

- [23] <https://www.hardnesstesters.com/test-types/knoop-hardness-testing>
(preuzeto 10.7.2022.)
- [24] <https://www.ispitivanje.com/smjernice-za-ispitivanje-tvrdoce/>
(preuzeto 11.7.2022.)
- [25] <https://metinvestholding.com/en/products/steel-grades/s235jr>
(preuzeto 11.7.2022.)
- [26] <https://www.otaisteel.com/products/carbon-steel/s235jr-mild-steel/>
(preuzeto 12.7.2022.)
- [27] Budimlić, M.: Mjerila za vizualno ispitivanje zavarenih spojeva, završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.

ŽIVOTOPIS

OSOBNI PODATCI

Ime i prezime: Erik Luka Ritz
Datum i mjesto rođenja: 27.siječanj 1999., Zagreb
Adresa: Ulica Vladimira Varičaka 24, 10000 Zagreb
E-mail: erik.luka.ritz@gmail.com

OBRAZOVANJE

2006. - 2014. - Osnovna škola Otok Zagreb
2014. - 2018. - Škola primijenjene umjetnosti i dizajna Zagreb
2018. - Metalurški fakultet Sisak, preddiplomski sveučilišni
studij Metalurgija, smjer Metalurško inženjerstvo

VJEŠTINE

- Strani jezici: Engleski jezik
- poznavanje rada na računalu